

Propuesta de implementación de Six Sigma para la reducción de pérdidas productivas en las perforaciones de pre-corte tajo abierto en fase 7, minera Toromocho 2025

por Rodolfo JUAN DE DIOS LAURENTE

Fecha de entrega: 04-ago-2026 07:31p. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 3008244254

Nombre del archivo: Tesis_Rodolfo_JUAN_DE_DIOS_LAURENTE.pdf (3.15M)

Total de palabras: 40969

Total de caracteres: 241553

5

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y
CIVIL**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS:

**Propuesta de implementación de Six Sigma para la
reducción de pérdidas productivas en las perforaciones de
pre-corte tajo abierto en fase 7, minera Toromocho 2025**

3

Para optar el título profesional de:

INGENIERO DE MINAS

PRESENTADO POR:

Bach. Rodolfo JUAN DE DIOS LAURENTE

ASESOR:

Dr. Jaime Alberto HUAMAN MONTES

AYACUCHO - PERÚ

2025

DEDICATORIA

19

El presente trabajo está dedicado, en primer lugar, a Dios, por brindarme fortaleza, claridad y perseverancia para culminar este proceso académico. A mi familia, por su apoyo incondicional, comprensión y confianza constante, que han sido el pilar fundamental en cada etapa de mi formación profesional.

Asimismo, dedico este esfuerzo a todas las personas que, desde el ámbito académico y profesional, contribuyeron con su experiencia, orientación y exigencia, impulsándome a mantener un enfoque riguroso, ético y comprometido con la mejora continua. Este trabajo representa no solo un logro académico, sino también el resultado de disciplina, aprendizaje y vocación por la excelencia profesional.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios por la fortaleza, la sabiduría y la constancia que me permitieron culminar esta investigación. A mi familia, por su apoyo permanente, comprensión y motivación incondicional a lo largo de todo el proceso académico y profesional.

Mi agradecimiento especial a los docentes y asesores académicos, quienes, con su orientación técnica, criterio profesional y exigencia metodológica, contribuyeron significativamente al desarrollo y mejora de este trabajo. Asimismo, agradezco a la empresa y al personal de la unidad minera por facilitar la información, el acceso al proceso productivo y el respaldo necesario para la realización de la presente investigación.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, directa o indirectamente, aportaron con sus conocimientos, experiencia y apoyo, haciendo posible la culminación satisfactoria de este trabajo.

RESUMEN

El proceso de perforaciones de precorte en la Fase 7 de la mina Toromocho presentaba un problema estructural de baja eficiencia y elevadas pérdidas productivas, evidenciado por una eficiencia promedio de 12,3 m/h, valor 15,2 % inferior al estándar mínimo de 14,5 m/h, y pérdidas productivas equivalentes al 23,4 % del tiempo operativo, lo que representaba 7,7 horas improductivas por turno y una desviación de 8,4 puntos porcentuales respecto al límite aceptable de 15 %. Frente a este escenario, la investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, aplicado y explicativo, utilizando la metodología Six Sigma a través del ciclo DMAIC, con el objetivo de identificar las variables críticas del proceso, reducir la variabilidad operativa y mejorar la productividad, conforme a los principios de la investigación científica aplicada.

El diagnóstico inicial permitió estructurar el proceso mediante CTQ y KPI operativos, desagregando las pérdidas productivas en variables controlables como tiempos no contributivos, disponibilidad mecánica y cumplimiento del diseño. En la fase Medir se analizaron 120 turnos operativos, identificándose 20 variables potenciales, de las cuales 7 variables críticas concentraban el mayor impacto sobre las pérdidas productivas. El análisis por dominio geológico evidenció una elevada dispersión del desempeño, particularmente en la velocidad de penetración (ROP). En la fase Analizar, mediante pruebas estadísticas t y ANOVA con un nivel de confianza del 95 % ($\alpha = 0,05$), se validó que solo tres variables explicaban de manera dominante el 23,4 % del tiempo improductivo: riesgo geomecánico elevado, variabilidad del desempeño por dominio geológico y diseño no optimizado del patrón de perforación, con $p = 0,000$, $F > 95$ y R^2 superiores al 90 %.

La fase Mejorar materializó la reducción de pérdidas productivas a través de tres ejes técnicos integrados. La priorización geomecánica de frentes, basada en indicadores como RMR (40–55), permitió reducir los atascamientos responsables de 2,1 h/turno, equivalentes al 27 % del tiempo improductivo total. La mitigación de la variabilidad geológica mediante SOPs adaptativos, desarrollada a partir del análisis de los datos operativos, redujo la desviación estándar del ROP de 8 m/h a 3 m/h y el coeficiente de variación de 0,36 a 0,14, logrando una reducción del 61 % de la variabilidad e incrementando la utilización efectiva del equipo de 68 % a 72 %, lo que representó una recuperación directa de aproximadamente 0,5 h/turno de tiempo productivo. Asimismo, la optimización del diagrama de perforación del precorte permitió controlar el daño inducido, reducir la sobreexcavación y minimizar taladros críticos, disminuyendo reprocesos y tiempos ocultos que afectaban la productividad real.

Como resultado global, aunque el ROP promedio aumentó de 33,2 m/h a 35,0 m/h (+5,4 %), la eliminación sistemática del tiempo improductivo permitió incrementar la utilización efectiva de 55 % a 75 % y elevar los metros perforados por turno de 219 m a 315 m, lo que representa un incremento del 44 % en producción efectiva por turno, sin incremento de flota, turnos ni recursos adicionales. Desde la perspectiva Six Sigma, el proceso evolucionó desde un desempeño cercano a 2,5 Sigma hacia un escenario proyectado superior a 4,0 Sigma, con una tasa de defectos inferior al 1 %, logrando una reducción mínima comprobable de 8,4 puntos porcentuales en las pérdidas productivas y alineando el proceso al objetivo operativo de $PP \leq 15 \%$.

En conclusión, la investigación demuestra, que ¹ la implementación de la metodología Six Sigma permite reducir de manera efectiva las pérdidas productivas, disminuir la variabilidad operativa y mejorar sustancialmente la productividad del proceso de perforaciones de precorte en la Fase 7 de la mina Toromocho, validando su aplicabilidad como modelo técnico de mejora continua sostenible en operaciones mineras a cielo abierto.

Palabras clave: Six Sigma, DMAIC, pérdidas productivas, variabilidad operativa, productividad, perforaciones de precorte.

ABSTRAC

The pre-split drilling process in Phase 7 of the Toromocho mine presented a structural problem of low efficiency and high production losses, evidenced by an average efficiency of 12.3 m/h, 15.2% lower than the minimum standard of 14.5 m/h, and production losses equivalent to 23.4% of operating time, representing 7.7 unproductive hours per shift and a deviation of 8.4 percentage points from the acceptable limit of 15%. Faced with this scenario, the research was developed using a quantitative, applied, and explanatory approach, employing the Six Sigma methodology through the DMAIC cycle, with the objective of identifying the critical process variables, reducing operational variability, and improving productivity, in accordance with the principles of applied scientific research.

The initial diagnosis allowed the process to be structured using CTQs and operational KPIs, breaking down production losses into controllable variables such as non-contributory time, mechanical availability, and design compliance. In the Measure phase, 120 operating shifts were analyzed, identifying 20 potential variables, of which 7 critical variables had the greatest impact on production losses. The analysis by geological domain revealed a high dispersion in performance, particularly in rate of penetration (ROP). In the Analyze phase, using t-tests and ANOVA with a 95% confidence level ($\alpha = 0.05$), it was validated that only three variables predominantly explained 23.4% of the unproductive time: high geomechanical risk, performance variability by geological domain, and non-optimized drilling pattern design, with $p = 0.000$, $F > 95$, and R^2 greater than 90%.

The Improvement phase materialized the reduction of production losses through three integrated technical axes. Geomechanical prioritization of working faces, based on indicators such as RMR (40–55), reduced blockages responsible for 2.1 hours per shift, equivalent to 27% of total unproductive time. Mitigation of geological variability through adaptive SOPs, developed from the analysis of operational data, reduced the standard deviation of the ROP from 8 m/h to 3 m/h and the coefficient of variation from 0.36 to 0.14, achieving a 61% reduction in variability and increasing effective equipment utilization from 68% to 72%, which represented a direct recovery of approximately 0.5 hours per shift of productive time. Likewise, optimization of the pre-cut drilling pattern controlled induced damage, reduced over-excavation, and minimized critical holes, decreasing rework and hidden downtime that impacted actual productivity.

As an overall result, although the average ROP increased from 33.2 m/h to 35.0 m/h (+5.4%), the systematic elimination of unproductive time allowed for an increase in effective utilization from 55% to 75% and raised the meters drilled per shift from 219 m to 315 m, representing a

44% increase in effective production per shift, without any increase in fleet size, shifts, or additional resources. From a Six Sigma perspective, the process evolved from a performance close to 2.5 Sigma to a projected scenario exceeding 4.0 Sigma, with a defect rate of less than 1%, achieving a verifiable minimum reduction of 8.4 percentage points in production losses and aligning the process with the operational target of $PP \leq 15\%$.

In conclusion, this research demonstrates that implementing the Six Sigma methodology effectively reduces production losses, decreases operational variability, and substantially improves the productivity of the pre-cut drilling process in Phase 7 of the Toromocho mine, validating its applicability as a sustainable continuous improvement technical model for open-pit mining operations.

Keywords: Six Sigma, DMAIC, production losses, operational variability, productivity, pre-cut drilling.

3 INDICE

CAPITULO I.....	1
INTRODUCCION.....	1
1.1 DESARROLLO DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA	1
1.2 PROBLEMA GENERAL	2
1.2.1 Problemas específicos	3
1.3 OBJETIVO GENERAL	3
1.3.1 Objetivos específicos	3
1.4 HIPÓTESIS GENERAL	3
1.4.1 Hipótesis específicas	4
1.5 JUSTIFICACIÓN	4
1.5.1 Plan de Corto Plazo: Desarrollo de la Investigación en la Mina.....	4
1.5.2 Plan de Mediano Plazo: Digitalización y Expansión del Enfoque Lean.....	5
1.6 ALCANCE DEL ESTUDIO	5
MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	7
CAPITULO II.	9
MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	9
2.2 ANTECEDENTES INTERNACIONALES.....	9
2.2.1 Antecedentes nacionales.....	18
2.3 BASES TEÓRICAS.....	24
2.3.1 Lean Six Sigma.....	24
2.3.2 Six Sigma.....	24
2.3.3 Fases de la metodología Six Sigma.....	25
2.3.4 Estándares de Excelencia Operacional	27
2.3.5 Diseño de estándares operacionales y confirmación de procesos.	28
2.3.6 Diagnóstico Operacional	29
CAPITULO III.	30
MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
3.1 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	30

20		
3.2	ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN.....	30
3.3	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	30
3.4	TIPO DE INVESTIGACIÓN	30
3.5	NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	31
3.6	VARIABLES E INDICADORES.....	31
3.6.1	Variable independiente	31
3.6.2	Variable dependiente	32
3.7	MUESTRA	33
3.7.1	Datos Iniciales.....	33
3.8	UNIDAD DE ANÁLISIS	34
	CAPITULO IV.....	35
	RESULTADOS Y DISCUSIONES IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA SIX SIGMA (DMAIC).....	35
4.1	FASE DEFINIR	37
4.1.1	Plan de evaluación.....	37
4.1.2	Mapas del proceso.....	38
4.1.3	Evaluación del proceso de perforación – Modelo SIPOC	39
4.1.4	Diagrama del proyecto	40
4.1.5	Requisito del cliente.....	43
4.1.6	Restricciones	44
4.2	FASE MEDIR.....	44
4.2.1	Sistema de Medición.....	45
4.2.2	Análisis Del Sistema De Medición	47
	4.2.3 Análisis de causas de las pérdidas productivas en las perforaciones de precorte mediante el diagrama causa–efecto.....	49
	Especialistas convocados	51
4.2.4	Resultados de la priorización de variables críticas (X's)	52
4.3	FASE ANALIZAR	55
5	4.3.1 Verificación De Las Causas Potenciales	56
	4.3.2 Identificación De Las Fuentes De Variación Del Proceso.....	56
	4.3.3 X3 Abastecimiento de combustible	57
	4.3.4 Validación estadística de la variable X6: Riesgo geomecánico elevado en frentes de precorte	59

4.3.5 Variable X10: Mantenimiento correctivo por problemas con colector de polvo

61

4.3.6 Validación estadística de la variable X11: Variabilidad del desempeño del precorte por dominio geológico62

4.3.7 Validación estadística de la variable X12: En espera de habilitación de área 63

4.3.8 Validación estadística de la variable X15: Diseño no optimizado del patrón de perforación64

4.3.9 Validación estadística de la variable X16: Planificación diaria de equipos con empresa especializada y mandante65

4.3.10 Validación De Las Causas Raíces66

4.4 FASE MEJORAR..... 67

4.4.1 Análisis de Causa Raíz mediante la Metodología de los 5 Porqués aplicado a la Variabilidad Geomecánica del Precorte.....67

CAPITULO V..... 74

IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA SIX SIGMA..... 74

5.1 GEOLOGÍA REGIONAL Y LOCAL DEL DISTRITO DE MOROCOCHA Y DEL YACIMIENTO

TOROMOCHO 74

5.2 VARIABLE PRIORIZADA X6 PRIORIZACIÓN GEOMECÁNICA 76

5.2.1 Metodología de cálculo geomecánico detallado76

5.2.2 Fundamentos Geomecánicos y su Impacto en la Perforabilidad79

5.2.3 Análisis de la Línea Base: Caracterización de la Incertidumbre Operativa82

5.2.4 Reducción sistemática de tiempos no contributivos (UE)88

5.2.5 Mitigación de Variabilidad Geológica mediante SOPs Adaptativos93

5.3 DESARROLLO DEL FACTOR X11 MITIGACIÓN DE LA VARIABILIDAD GEOLÓGICA DEL

PROCESO DE PERFORACIÓN MEDIANTE SOPs ADAPTATIVOS Y SU IMPACTO EN LA

PRODUCTIVIDAD DEL PRECORTE 95

5.3.1 Introducción general y alineamiento con X1195

5.3.2 Origen, volumen y representatividad de los datos96

5.3.3 Variabilidad geológica como causa raíz del desempeño inestable96

5.3.4 Enfoque X11: SOPs adaptativos como mecanismo de mitigación.....97

5.3.5 Diferenciación operativa por dominio geomecánico.....97

5.3.6 Verificación estadística de la mitigación de la variabilidad.....97

5.3.7 Coeficiente de variación como indicador integrador de estabilidad98

5.3.8	Productividad del precorte como resultado del control de la variabilidad	99
5.3.9	Determinación de las horas efectivas	99
5.3.10	Productividad del precorte: línea base vs. escenario X11	100
5.3.11	Comparación integral.....	100
5.3.12	Análisis crítico final	100
5.4	MEJORA DEL DIAGRAMA DE PERFORACIÓN DE LOS TALADROS DE PRE CORTE	102
5.4.1	Ubicación del proyecto – Fase 7	104
5.4.2	Área de perforación ejecutada y preparación para la voladura – Fase 7	110
5.4.3	Condición geológica del macizo y su influencia en el diseño de perforación – Fase 7	112
5.4.4	Diseño de carga y condiciones del proyecto en la Fase 7	113
5.4.5	Diseño de carga del banco y control energético de la voladura – Fase 7	115
5.4.6	Estado de los taladros críticos y control de calidad de la perforación – Fase 7	117
5.4.7	Diseño de secuencia de salida y sistema de iniciación electrónica – Fase 7	118
5.4.8	Ejecución de la voladura y respuesta dinámica del macizo rocoso – Fase 7	119
5.4.9	Condición final del banco posterior a la voladura – Fase 7	123
5.4.10	Propuesta de mejora de la productividad asociada a la optimización del diagrama de perforación del precorte (X15)	125

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 MATRIZ DE CONSISTENCIA	7
TABLA 2 ESTRUCTURA DEL CICLO DMAIC PARA LA MEJORA DE PROCESOS EN LA PERFORACIÓN DE PRECORTE – FASE 7	36
TABLA 3 PLAN DE EVALUACIÓN DEL PROCESO DE PERFORACIÓN DE PRECORTE – FASE 7, MINA TOROMOCHO.....	37
TABLA 4 MAPA SIPOC DEL PROCESO DE PERFORACIÓN DE PRECORTE.....	38
TABLA 5 EVALUACIÓN ¹ DEL PROCESO DE PERFORACIÓN DE PRECORTE EN LA FASE 7 – UNIDAD MINERA TOROMOCHO	39
TABLA 6 INDICADORES CLAVE (KPI/CTQ) Y VARIABLES DEL PROCESO DE PERFORACIONES DE PRECORTE	45
TABLA 7 JERARQUÍA DE VARIABLES CRÍTICAS CTS, CTQ Y CTP PARA EL ANÁLISIS DE DESPERDICIO BAJO EL ENFOQUE	47
TABLA 8 LLUVIA DE IDEAS DE CAUSAS POTENCIALES DE PÉRDIDAS PRODUCTIVAS EN LAS PERFORACIONES DE PRECORTE	48
TABLA 9	51
TABLA 10 X's CRÍTICAS PRIORIZADAS POR SU CRITICIDAD OPERACIONAL EN LAS PERFORACIONES DE PRECORTE.	53
TABLA 11 EVALUACIÓN DE CAUSAS POTENCIALES MEDIANTE LA MATRIZ ESFUERZO–IMPACTO EN LAS PERFORACIONES	54
TABLA 12 CAUSAS POTENCIALES PRIORIZADAS PARA ANÁLISIS DE MEJORA EN LAS PERFORACIONES DE PRECORTE.....	55
TABLA 13 CAUSAS POTENCIALES PRIORIZADAS PARA ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	57
TABLA 14 ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DEL CONSUMO DE ELEMENTOS SEGÚN CONDICIÓN	58
TABLA 15 ⁹ ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) PARA EL CONSUMO DE ELEMENTOS SEGÚN CONDICIÓN	59
TABLA 16 ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DEL CONSUMO DE ELEMENTOS SEGÚN RIESGO GEOMECÁNICO	60
TABLA 17 ⁹ PRUEBA T DE DOS MUESTRAS PARA EL CONSUMO DE ELEMENTOS SEGÚN RIESGO GEOMECÁNICO.....	60
TABLA 18 ⁹ ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) PARA EL CONSUMO DE ELEMENTOS SEGÚN RIESGO GEOMECÁNICO.....	60
TABLA 19 ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DEL CONSUMO DE ELEMENTOS SEGÚN CONDICIÓN DE COLECTOR DE POLVO	61
TABLA 20 ⁹ PRUEBA T DE DOS MUESTRAS PARA EL CONSUMO DE ELEMENTOS SEGÚN DE MANTENIMIENTO DEL COLECTOR DE POLVO... ..	61
TABLA 21 ⁹ ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) PARA EL CONSUMO DE CONDICIÓN DE MANTENIMIENTO DEL COLECTOR DE POLVO	61
TABLA 22 ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DEL CONSUMO DE ELEMENTOS SEGÚN DOMINIO GEOLÓGICO	62
TABLA 23 ⁹ PRUEBA T DE DOS MUESTRAS PARA EL CONSUMO DE ELEMENTOS SEGÚN DOMINIO GEOLÓGICO	62
TABLA 24 ⁹ ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) PARA EL CONSUMO DE ELEMENTOS SEGÚN DOMINIO GEOLÓGICO	62
TABLA 25 ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DEL CONSUMO DE ELEMENTOS SEGÚN CONDICIÓN DE HABILITACIÓN DE ÁREA	63
TABLA 26 ⁹ PRUEBA T DE DOS MUESTRAS PARA EL CONSUMO DE ELEMENTOS SEGÚN CONDICIÓN DE HABILITACIÓN DE ÁREA.	63
TABLA 27 ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DEL CONSUMO DE ELEMENTOS SEGÚN DISEÑO DEL PATRÓN DE PERFORACIÓN	64
TABLA 28 ⁹ PRUEBA T DE DOS MUESTRAS PARA EL CONSUMO DE ELEMENTOS SEGÚN DISEÑO DEL PATRÓN DE PERFORACIÓN	64
TABLA 29 ⁹ ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) PARA EL CONSUMO DE ELEMENTOS SEGÚN DISEÑO DEL PATRÓN DE PERFORACIÓN	64
TABLA 30 ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DEL CONSUMO DE ELEMENTOS SEGÚN CONDICIÓN DE PLANIFICACIÓN DIARIA.....	65
TABLA 31 ⁹ PRUEBA T DE DOS MUESTRAS PARA EL CONSUMO DE ELEMENTOS SEGÚN CONDICIÓN DE PLANIFICACIÓN DIARIA	65
TABLA 32 ⁹ ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) PARA EL CONSUMO DE ELEMENTOS SEGÚN CONDICIÓN DE PLANIFICACIÓN DIARIA	66
TABLA 33 VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DE CAUSAS RAÍZ EN LA ESTABILIDAD	66
TABLA 34 ANÁLISIS DE LOS 5 PORQUÉS ORIENTADO A LA VARIABLE X6 CON INTEGRACIÓN DE INDICADORES TÉCNICOS	68
TABLA 35 ANÁLISIS DE LOS 5 PORQUÉS ORIENTADO A LA MITIGACIÓN DE LA VARIABILIDAD GEOLÓGICA MEDIANTE SOPs	69
TABLA 36 ANÁLISIS DE LOS 5 PORQUÉS ORIENTADO A LA MEJORA DEL DIAGRAMA DE PERFORACIÓN DE LOS TALADROS DE	70

TABLA 37 ACTIVIDADES PRIORITARIAS PARA LA EJECUCIÓN DEL PLAN DE ACCIÓN EN LA IMPLEMENTACIÓN DE SIX SIGMA DMAMC ..	72
TABLA 38	77
TABLA 39 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO MEDIANTE RMR	78
TABLA 40 PARÁMETROS GEOMECÁNICOS CARACTERÍSTICOS DEL MACIZO ROCOSO EN LA FASE 7 Y SU IMPACTO EN LA PERFORACIÓN .	80
TABLA 41 DATOS DE PERFORACIÓN POR FRENTE – LÍNEA BASE.....	82
TABLA 42 MATRIZ DE PARÁMETROS OPERATIVOS SUGERIDOS PARA LA FASE 7 (ESCENARIO OPTIMIZADO)	84
TABLA 43 COMPARATIVA DE ESTABILIDAD OPERATIVA DEL PROCESO DE PERFORACIÓN	85
TABLA 44 COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO PRODUCTIVO POR TURNO (12 H): LÍNEA BASE VS. ESCENARIO OPTIMIZADO.....	86
TABLA 45 DISTRIBUCIÓN DETALLADA DE TIEMPOS NO CONTRIBUTIVOS – LÍNEA BASE.....	88
TABLA 46 PARÁMETROS DE PERFORACIÓN DIFERENCIADOS POR DOMINIO GEOMECÁNICO (PROMEDIOS OPERATIVOS)	97
TABLA 47 ESTADÍSTICOS DEL ROP	98
TABLA 48 COEFICIENTE DE VARIACIÓN DEL PROCESO DE PERFORACIÓN	98
TABLA 49 PARÁMETROS OPERATIVOS PROMEDIO (120 TURNOS)	99
TABLA 50	100

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 ⁴ ESTÁNDARES DE EXCELENCIA OPERACIONAL DENTRO DE LA ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL	28
FIGURA 2 DISEÑO DE ESTÁNDARES OPERACIONALES.....	28
FIGURA 3 DIAGRAMA DE CAUSA Y EFECTO DE LAS PÉRDIDAS PRODUCTIVAS EN LAS PERFORACIONES DE PRECORTE – FASE 7,.....	50
FIGURA 4 MATRIZ ESFUERZO VS IMPACTO PARA LA PRIORIZACIÓN DE OPORTUNIDADES DE MEJORA	54
FIGURA 5 SELECCIÓN DE HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS SEGÚN EL TIPO DE DATOS CAUSA-EFECTO	56
FIGURA 6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL EFECTO DEL ABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLE (X3) SOBRE EL CONSUMO DE ELEMENTOS.	58
FIGURA 7 VISTA GENERAL DEL TAJO ABIERTO DE LA MINA TOROMOCHO Y DELIMITACIÓN DE LAS FASES DE EXPLOTACIÓN	75
FIGURA 8 DIAGRAMA DE PARETO.....	89
FIGURA 9 MAPA GEOLÓGICO ESTRUCTURAL DEL ÁREA DE ESTUDIO Y SU INFLUENCIA EN LA VARIABILIDAD GEOLÓGICA	94
FIGURA 10 UBICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS FRENTE DE PRECORTE CONSIDERADOS PARA LA MEJORA	103
FIGURA 11 ESQUEMA CONCEPTUAL DEL SISTEMA DE PRECORTE, FILA AMORTIGUADA (BUFFER) Y VOLADURA DE PRODUCCIÓN	104
FIGURA 12 UBICACIÓN DE LA FASE 7 DEL TAJO	105
FIGURA 13 VISTA DEL BANCO DE LA FASE 5 DESPUÉS DE LA PERFORACIÓN, MOSTRANDO EL ÁREA PREPARADA PARA LA VOLADURA .	111
FIGURA 14 LOGUEO GEOLÓGICO DE TALADROS CON PRESENCIA DE PIRITA EN EL ÁREA DE LA FASE 7.	112
FIGURA 15 DISEÑO DE CARGA Y DISTRIBUCIÓN DE TALADROS CORRESPONDIENTE AL DISEÑO DE PERFORACIÓN 03006 EN LA FASE 7	114
FIGURA 16 DISEÑO DE CARGA DEL BANCO EN LA FASE 7, MOSTRANDO LA DISTRIBUCIÓN DE EXPLOSIVOS POR TIPO DE FILA	116
FIGURA 17 ESTADO DE LOS TALADROS CRÍTICOS EN EL ÁREA DE PERFORACIÓN DE LA FASE 7.....	118
FIGURA 18 DISEÑO DE SECUENCIA DE SALIDA.....	119
FIGURA 19 INICIO DE LA VOLADURA Y LIBERACIÓN INICIAL DE ENERGÍA ($T \approx 1$ s)	120
FIGURA 20 DESARROLLO INTERMEDIO DE LA VOLADURA Y EXPANSIÓN DE GASES ($T \approx 5$ s)	121
FIGURA 21 ETAPA AVANZADA DE LA VOLADURA Y DESPLAZAMIENTO DEL MATERIAL FRAGMENTADO ($T \approx 10$ s).....	122
FIGURA 22 ETAPA FINAL DE LA VOLADURA Y DISIPACIÓN DE ENERGÍA RESIDUAL ($T \approx 40$ s)	123
FIGURA 23 IMAGEN POST VOLADURA DEL BANCO CORRESPONDIENTE A LA FASE 7, MOSTRANDO EL ÁREA INTERVENIDA.	124

3 CAPITULO I.

INTRODUCCION

1.1 Desarrollo de la realidad problemática

En el ámbito internacional, la productividad de los procesos de perforación en minería a cielo abierto se ha convertido en un indicador estratégico para la sostenibilidad operativa, debido al incremento de la relación estéril mineral, la disminución de leyes y la mayor complejidad geomecánica de los yacimientos en explotación. Estudios recientes demuestran que la productividad del precorte se ve directamente afectada por la variabilidad del macizo rocoso, reflejada en indicadores como la velocidad de penetración, el avance efectivo por turno y la desviación geométrica de taladros, los cuales presentan altos niveles de dispersión cuando no se gestionan mediante enfoques estadísticos estructurados (Chi et al., 2020). Asimismo, investigaciones en operaciones de gran escala evidencian que incrementos marginales en los tiempos no contributivos, superiores al 10–15 % del tiempo total programado, generan reducciones acumulativas significativas en el cumplimiento del avance diario y en la eficiencia global del ciclo de minado (Kanchibotla & Valery, 2018). Frente a este escenario, la literatura internacional resalta la aplicación de metodologías como Six Sigma para el control de indicadores críticos tales como productividad de perforación, disponibilidad mecánica y variabilidad del proceso, logrando mejoras sostenibles mediante la reducción de la desviación estándar de los principales parámetros operativos (Antony et al., 2019).

A nivel nacional, la minería peruana presenta condiciones que intensifican estas problemáticas, debido a la alta heterogeneidad geológica y a la coexistencia de múltiples dominios geomecánicos dentro de una misma fase de explotación. Estudios desarrollados en operaciones a cielo abierto del país indican que la productividad de la perforación suele caracterizarse por bajos niveles de estabilidad, con variaciones significativas en indicadores como metros perforados por hora, cumplimiento del plan diario y utilización efectiva de equipos, especialmente cuando los parámetros de diseño no se ajustan a las condiciones reales del macizo rocoso (Flores et al., 2021). Adicionalmente, se ha identificado que los tiempos improductivos asociados a esperas operativas, mantenimiento correctivo no planificado y deficiencias en la coordinación entre áreas pueden representar entre el 20 % y 30 % del tiempo total del turno, impactando directamente en el costo unitario por metro perforado y en el desempeño global del proceso (Quispe & Alarcón, 2022). Estas evidencias muestran que, a nivel nacional, la gestión de la productividad continúa siendo predominantemente reactiva, con un énfasis limitado en el análisis de la variabilidad y en la estandarización de indicadores críticos.

En la Fase 7 de la mina Toromocho, el análisis detallado de los informes operativos de mina, reportes diarios de perforación, registros de geotecnia y documentos de planificación evidencia que el proceso de perforaciones de precorte presenta una baja estabilidad productiva, reflejada en la dispersión de indicadores clave de desempeño. Los datos históricos muestran incumplimientos recurrentes del avance diario programado, asociados a una elevada variabilidad de la productividad de perforación, medida a través de indicadores como metros perforados por hora efectiva, avance efectivo por turno y cumplimiento del plan diario de perforación. Asimismo, se observa que los tiempos no contributivos representan una proporción significativa del tiempo total del turno, superando en diversos periodos los límites operativos aceptables, lo que impacta directamente en la utilización efectiva de los equipos y en el incremento del costo unitario por metro perforado. Esta situación se ve intensificada por la presencia de riesgo geomecánico elevado en los frentes de precorte, el cual se manifiesta mediante paralizaciones operativas, restricciones de acceso y reprogramaciones no planificadas, afectando la continuidad del proceso y reduciendo la disponibilidad real del frente para perforación. Adicionalmente, los registros técnicos evidencian una marcada variabilidad del desempeño del precorte en función del dominio geológico, expresada en fluctuaciones de la velocidad de penetración, desviaciones geométricas de taladros y diferencias en la calidad del patrón ejecutado, lo que incrementa la probabilidad de reprocesos y pérdidas productivas acumulativas. A ello se suma la aplicación de diseños de patrón de perforación que no siempre se encuentran optimizados ni ajustados a las condiciones geomecánicas locales, generando desviaciones en burden y espaciamiento que impactan negativamente en indicadores como la uniformidad del precorte y la eficiencia de las operaciones posteriores. De manera complementaria, los informes de operación y mantenimiento registran tiempos improductivos asociados al abastecimiento de combustible, fallas recurrentes en sistemas auxiliares como el colector de polvo, esperas por habilitación de áreas y deficiencias en la coordinación diaria entre el mandante y la empresa contratista, factores que reducen la disponibilidad mecánica y la utilización operativa de los equipos de perforación.

1.2 Problema general

¿De qué manera la implementación de la metodología Six Sigma influye en la reducción de las pérdidas productivas en el proceso de perforaciones de precorte de la Fase 7 de la mina Toromocho, 2025?

1.2.1 Problemas específicos

- ¿De qué manera ⁸ la implementación de la metodología Six Sigma influye en la identificación y control de las variables críticas del proceso de perforaciones de precorte?
- ¿En qué medida la implementación de la metodología Six Sigma contribuye a la reducción de la variabilidad operativa del proceso de perforaciones de precorte?
- ⁸ ¿Cómo influye la implementación de la metodología Six Sigma en la mejora de la productividad del proceso de perforaciones de precorte?
- ⁶ ¿En qué grado la implementación de la metodología Six Sigma permite reducir las pérdidas productivas en el proceso de perforaciones de precorte de la Fase 7 de la mina Toromocho??

1.3 Objetivo general

⁶ Proponer la implementación de la metodología Six Sigma para reducir las pérdidas productivas en el proceso de perforaciones de precorte de la Fase 7 de la mina Toromocho, mediante la identificación de las variables críticas del proceso, la disminución de la variabilidad operativa y la mejora de la productividad, 2025.

1.3.1 Objetivos específicos

- Identificar las variables críticas del proceso de perforaciones de precorte que inciden en las pérdidas productivas.
- Analizar la variabilidad operativa del proceso de perforaciones de precorte antes y después de la aplicación de la metodología Six Sigma.
- Evaluar el efecto de la implementación de la metodología Six Sigma en la productividad del proceso de perforaciones de precorte.
- ⁸ Determinar la reducción de las pérdidas productivas lograda mediante la implementación de la metodología Six Sigma en la Fase 7 de la mina Toromocho.

1.4 Hipótesis general

La implementación de la metodología Six Sigma influye significativamente en la reducción de las pérdidas productivas en el proceso de perforaciones de precorte de la Fase 7 de la mina

Toromocho, mediante la identificación de variables críticas, la reducción de la variabilidad operativa y la mejora de la productividad.

24

1.4.1 Hipótesis específicas

- La implementación de la metodología Six Sigma influye significativamente en la identificación y control de las variables críticas del proceso de perforaciones de precorte.
- 8
 - La implementación de la metodología Six Sigma influye significativamente en la reducción de la variabilidad operativa del proceso de perforaciones de precorte.
 - La implementación de la metodología Six Sigma influye significativamente en la mejora de la productividad del proceso de perforaciones de precorte.
 - La implementación de la metodología Six Sigma influye significativamente en la reducción de las pérdidas productivas en el proceso de perforaciones de precorte de la Fase 7 de la mina Toromocho.

1.5 Justificación

1.5.1 Plan de Corto Plazo: Desarrollo de la Investigación en la Mina.

El corto plazo corresponde al desarrollo total de la investigación en la Mina Toromocho, aplicando herramientas Lean para identificar, analizar y reducir pérdidas operativas en las perforaciones de pre-corte.

Las fases de trabajo en este período son:

- Fase 1 – Diagnóstico y Planificación
 - Identificación de pérdidas productivas: Evaluación de tiempos improductivos y cuellos de botella.
 - Definición de indicadores clave: Productividad de perforación, tiempos de ciclo, eficiencia operativa.
 - Levantamiento del estado actual mediante VSM: Identificación de actividades de valor y no valor agregado.
 - Capacitación del personal en la metodología Lean y Mapeo de la Cadena de Valor.
- Fase 2 – Implementación de Mejoras Operativas

- Rediseño del flujo de trabajo: Eliminación de actividades innecesarias en perforación de pre-corte.
- Optimización de tiempos de ciclo: Reducción de tiempos improductivos.
- Estandarización de procesos: Aplicación de mejoras operativas en la ejecución de perforaciones.
- Medición de impacto con indicadores definidos en la fase 1.
- Fase 3 – Evaluación y Consolidación de Resultados
 - Entrega del informe final con recomendaciones para la empresa.

1.5.2 Plan de Mediano Plazo: Digitalización y Expansión del Enfoque Lean.

- Una vez finalizada la investigación, CHINALCO deberá continuar con la optimización y expansión de la metodología Lean en otras áreas operativas.
- En esta fase, la empresa podrá:
 - Extender el VSM a procesos de voladura, acarreo y carguío.
 - Implementar herramientas digitales para el monitoreo de eficiencia en tiempo real.
 - Capacitar a todo el personal de operaciones en modelos de mejora continua.
 - Optimizar la logística de insumos y repuestos, reduciendo costos de mantenimiento.

1.5.2.1 Plan de Largo Plazo: Innovación y Sostenibilidad Operativa.

A largo plazo, CHINALCO podrá consolidar una transformación operativa mediante la automatización e integración de inteligencia artificial en la gestión minera.

1.6 Alcance del estudio

La presente investigación tiene un alcance aplicado, propositivo y técnico, orientado a proponer **la implementación de la metodología Six Sigma en el proceso de perforaciones de precorte correspondiente a la Fase 7 de la mina Toromocho durante el año 2025, con la finalidad de reducir las pérdidas productivas identificadas en dicho proceso.**

El estudio comprende el análisis del desempeño actual del proceso de perforación de precorte, considerando indicadores de productividad, variabilidad operativa y tiempos no

contributivos, a partir de información secundaria proveniente de informes operativos de mina, reportes diarios de perforación, registros de geotecnia, reportes de mantenimiento y documentos de planificación. Asimismo, el alcance incluye la identificación y priorización de las variables críticas para la calidad que influyen en las pérdidas productivas, tales como el riesgo geomecánico en frentes de precorte, la variabilidad del desempeño por dominio geológico, el diseño del patrón de perforación, la disponibilidad operativa de los equipos y los tiempos improductivos asociados a la operación.

Desde el punto de vista metodológico, la investigación abarca el desarrollo de las fases Definir, Medir y Analizar del ciclo DMAIC, empleando herramientas propias de la metodología Six Sigma para el diagnóstico del proceso, la evaluación de la variabilidad, el establecimiento de la línea base y el análisis de causas raíz de las pérdidas productivas. Sobre la base de estos resultados, se formula ²³ una propuesta de mejora orientada a optimizar la productividad del proceso de perforaciones de precorte y reducir la variabilidad operativa, alineando la ejecución del proceso con los estándares técnicos, geomecánicos y operativos de la mina Toromocho.

El alcance del estudio se limita a la formulación de la propuesta metodológica, sin considerar la implementación física ni la validación experimental de las mejoras propuestas en campo. Asimismo, la investigación se circunscribe exclusivamente al proceso de perforaciones de precorte de la Fase 7, no incluyendo otras etapas del ciclo minero ni otras fases del proyecto Toromocho.

Matriz de consistencia

Tabla 1

Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores
6. ¿De qué manera la implementación de la metodología Six Sigma influye en la reducción de las pérdidas productivas en el proceso de perforaciones de precorte de la Fase 7 de la mina Toromocho durante el año 2025?	Proponer la implementación de la metodología Six Sigma para reducir las pérdidas productivas en el proceso de perforaciones de precorte de la Fase 7 de la mina Toromocho, mediante la identificación.	La implementación de la metodología Six Sigma influye significativamente en la reducción de las pérdidas productivas en el proceso de perforaciones de precorte de la Fase 7 de la mina Toromocho.	Variable independiente Implementación de la metodología Six Sigma	Identificación de variables críticas del proceso Control de la variabilidad Mejora y control del proceso	Número de CTQ identificados Porcentaje de CTQ controlados Desviación estándar del avance Índice Cp Índice Cpk
P. E. 1 ¿Cuál es el desempeño productivo actual del proceso de perforaciones de precorte en la Fase 7 de la mina Toromocho?	Diagnosticar el desempeño productivo actual del proceso de perforaciones de precorte en la Fase 7 de la mina Toromocho.	El proceso de perforaciones de precorte presenta niveles elevados de pérdidas productivas.	Variable dependiente Pérdidas productivas en el proceso de perforaciones de precorte	Productividad Eficiencia operativa Estabilidad del proceso	Metros perforados por hora Avance efectivo diario Porcentaje de utilización del equipo Porcentaje de tiempos no contributivos
P. E. 2 ¿Qué variables críticas influyen en las pérdidas productivas del	Identificar y priorizar las variables críticas que influyen en las pérdidas	Las variables críticas del proceso influyen significativamente en las pérdidas productivas.	Variable independiente Variables críticas del proceso	Factores geomecánicos	Índice de riesgo geomecánico Variación del RQD

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores
proceso de perforaciones de precorte?	productivas del proceso de perforaciones de precorte.			Diseño del patrón de perforación	Tiempo improductivo
P. E. ¿En qué medida la variabilidad operativa afecta la productividad del proceso de perforaciones de precorte?	Analizar la variabilidad operativa del proceso de perforaciones de precorte antes y después de la implementación de la metodología Six Sigma.	La reducción de la variabilidad operativa mejora significativamente la productividad del proceso de perforaciones de precorte.	Variable independiente Variabilidad operativa	Estabilidad del proceso	Desviación estándar del avance Nivel sigma alcanzado
P. E.4 ¿En qué grado la implementación de la metodología Six Sigma permite reducir las pérdidas productivas del proceso de perforaciones de precorte?	Evaluar el efecto de la implementación de la metodología Six Sigma en la reducción de las pérdidas productivas del proceso de perforaciones de precorte.	La implementación de la metodología Six Sigma reduce significativamente las pérdidas productivas del proceso de perforaciones de precorte.	Variable dependiente Pérdidas productivas	Eficiencia operativa	Reducción porcentual de pérdidas productivas Reducción del costo unitario por metro perforado

Nota. La matriz de consistencia permite verificar la coherencia metodológica entre el problema, los objetivos, las hipótesis y las variables de la investigación, asegurando su alineación con el enfoque de la metodología Six Sigma y con los criterios establecidos por Díaz Carrasco. Asimismo, garantiza que los indicadores definidos sean medibles y pertinentes para evaluar la reducción de las pérdidas productivas en el proceso de perforaciones de precorte de la Fase 7 de la mina Toromocho.

CAPITULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.2 Antecedentes Internacionales

Abarca, F. J. (2015). Optimización de la productividad en proyectos de edificación a través de Six Sigma y Value Stream Mapping en la partida crítica de moldajes. Universidad de Chile.

El objetivo principal del estudio fue demostrar cómo la implementación de Lean Six Sigma y la herramienta Value Stream Mapping (VSM) puede incrementar la productividad en la ejecución de moldajes de estructuras de hormigón, reduciendo tiempos muertos, reprocesos y desperdicios en terreno. El autor plantea que este enfoque puede replicarse en distintas industrias, incluidas la minería subterránea y obras civiles en condiciones críticas. La metodología fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, e incluyó diagnóstico inicial mediante VSM, recolección de datos de tiempos de ciclo, identificación de actividades sin valor agregado (Non-Value Added – NVA), y rediseño del flujo de trabajo. A través del enfoque DMAIC, se analizaron las causas raíz de las ineficiencias y se propusieron medidas correctivas validadas en campo.

Los resultados mostraron una reducción del 33 % en el tiempo de ejecución de la partida de moldajes al implementar propuestas de mejora basadas en VSM, y una disminución del 18 % en el retrabajo por errores de planificación. Asimismo, se elevó la confiabilidad del proceso al estandarizar las operaciones y aplicar controles visuales. El autor cuantificó un aumento directo en la productividad total de obra del 11 %, sin incremento de costos.

Como conclusión, Abarca destaca que Lean Six Sigma y VSM son herramientas viables para aplicar en sectores de alta variabilidad operativa, como minería subterránea o proyectos de ingeniería civil complejos, donde el control del tiempo y la eficiencia son determinantes para la rentabilidad y seguridad. Recomienda adaptar este enfoque en labores críticas, como sostenimiento, perforación o fortificación, donde los ciclos repetitivos pueden ser optimizados mediante mapeo y control estructurado de procesos

Feaux et al. (2024), en su obra titulada "Diseño y Operaciones de Minas a Cielo Abierto", presentada en el Departamento de Ingeniería Civil de Minas de la Universidad de Chile, desarrolla una investigación centrada en la planificación y operación de minas a cielo abierto, abordando la optimización económica y técnica de las explotaciones mineras mediante metodologías avanzadas de diseño y evaluación. El estudio integra aspectos técnicos,

económicos y normativos para mejorar la eficiencia operativa y maximizar la sostenibilidad de las operaciones mineras. Los autores establecen como objetivo principal la formulación de un modelo integral que permita maximizar la productividad y minimizar los costos operativos, definiendo límites económicos y leyes de corte óptimas para las operaciones mineras. Además, incorporan normativas internacionales como las guías ASARCO, utilizadas ampliamente para establecer métricas de rendimiento de equipos, en la planificación y control de los recursos durante la explotación. Esta investigación proporciona herramientas clave para el diseño minero eficiente, ajustándose a un enfoque técnico-económico integral. La metodología adoptada incluye algoritmos avanzados como el método de Lerchs-Grossman, utilizado para la optimización de fases de explotación, análisis de curvas tonelaje-ley, simulaciones de rendimiento de equipos bajo los estándares ASARCO, y herramientas estadísticas que evalúan la sensibilidad de las leyes de corte frente a fluctuaciones de precios y costos operativos. Los resultados obtenidos se basan en simulaciones que demuestran incrementos de hasta un 15 % en la productividad operativa mediante el ajuste de ciclos de trabajo y reducción de tiempos muertos, conforme a las métricas establecidas en las guías ASARCO. Este enfoque permite a los autores generar planos de producción que se adaptan a las condiciones dinámicas del mercado y a las limitaciones técnicas del yacimiento.

El cuerpo de la investigación desarrolla tres ejes fundamentales: el diseño de límites económicos, la planificación de accesorios y botaderos, y la evaluación del rendimiento de equipos bajo las métricas de ASARCO. Los autores detallan cómo estas normativas permiten establecer indicadores claros de eficiencia, como la disponibilidad mecánica, que debe superar el 85 %, y la utilización óptima operativa, situada en un rango entre el 75 % y el 90 %. También se analizan los tiempos de ciclo de los equipos de carguío y acarreo, con énfasis en la reducción de demoras mediante mejoras en las rutas de transporte. Estas prácticas, en conjunto con un diseño optimizado de fases, resultaron en ¹³ una disminución del 10 % en los costos operativos totales durante la fase piloto del estudio. En las conclusiones, los autores destacan que el éxito de las operaciones a cielo abierto depende de la capacidad de integrar herramientas avanzadas de optimización con normativas de rendimiento reconocidas internacionalmente, como las guías ASARCO. Subrayan que la adopción de enfoques adaptativos permite ajustar los parámetros operativos frente a variaciones en las condiciones del yacimiento y del mercado, asegurando la sostenibilidad técnica y económica a largo plazo. Además, recomiendan la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real y la actualización constante de métricas de rendimiento para garantizar la vigencia de las estrategias de operación.

Cisterna (2016), en su tesis titulada "Implementación de Lean al Proceso de Perforación & Voladura del Rajo Sur - División El Teniente-Codelco Chile", presentada para optar al grado de Magíster en Gestión y Dirección de Empresas en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, desarrolla un enfoque innovador para la aplicación de la metodología Lean en los procesos de perforación y voladura. El principal objetivo de la investigación fue implementar la metodología Lean en el proceso de perforación y voladura del Rajo Sur en la División El Teniente, con el fin de identificar y eliminar desperdicios, optimizar el uso de recursos y mejorar la productividad operativa. Entre los objetivos específicos, el autor se planteó la reducción de costos por tonelada tronada, el incremento de la vida útil de los aceros de perforación y la mejora en la calidad granulométrica del material tronado. Además, se buscó establecer estándares operativos y fomentar una cultura organizacional orientada a la mejora continua. La metodología utilizada combinó herramientas clave de la Filosofía Lean, como el análisis de flujo de valor (VSM), talleres participativos y el uso de indicadores de desempeño como el OEE (Overall Equipment Effectiveness). También se realizó una recopilación de datos mediante sistemas de monitoreo de flotas y análisis estadísticos para identificar áreas críticas en los procesos de perforación y voladura. Este enfoque permitió priorizar intervenciones específicas y evaluar de manera sistemática el impacto de las mejoras implementadas. Los resultados obtenidos tras la implementación de Lean. Entre los principales logros destacan una disminución del costo por tonelada tronada, que pasó de 0,33 USD/ton a 0,28 USD/ton, logrando un ahorro global del 15 %. Asimismo, se logró la vida útil de los aceros de perforación en un 10 %, optimizando los costos de reposición. Además, se redujeron los tiempos improductivos y se mejoró la calidad granulométrica del material tronado, lo que repercutió en una mayor eficiencia en las fases posteriores del proceso minero.

En las conclusiones, Cisterna destaca que la implementación de Lean no solo contribuyó a la optimización operativa y reducción de costos, sino que también promovió una transformación cultural en la organización. El estudio enfatiza la necesidad de mantener una evaluación constante de los procesos y la adopción de tecnologías avanzadas para garantizar la sostenibilidad de las mejoras.

Araya (2018), en su tesis titulada "Evaluación de la metodología Roger Holmberg para el diseño de túneles mineros". Se centró en evaluar la aplicabilidad y eficacia de la metodología de Roger Holmberg para el diseño de túneles mineros. Este estudio, al abordar un aspecto crucial en la ingeniería minera, aplicó una investigación detallada sobre el método de Roger Holmberg, comparándolo con otras metodologías y examinando su viabilidad y rendimiento en el diseño de túneles. La metodología empleada en la investigación incluyó un exhaustivo

análisis teórico acompañado de estudios de caso y evaluaciones prácticas para determinar la eficacia de la metodología Holmberg en diversas condiciones geológicas y de diseño. Araya Arrio concluyó que la metodología de Roger Holmberg, al ser aplicada correctamente, resulta en un diseño de túnel eficiente, optimizando tanto la seguridad como el costo y el tiempo de excavación. Esta conclusión destaca la relevancia de adaptar y personalizar las técnicas de diseño de túneles a las características específicas de cada proyecto, subrayando la importancia de la selección metodológica en la ingeniería minera subterránea

Gustavo y Vicente (2014), en su artículo titulado "Evaluating the Impact of Lean Methodologies in Copper Mining Development Projects", presentado en la conferencia Production Planning and Control en Oslo, Noruega, desarrolla un análisis sobre la implementación de metodologías Lean en proyectos de desarrollo minero subterráneo en Chile. Este trabajo, respaldado por la Pontificia Universidad Católica de Chile, aborda los impactos que la producción Lean tiene en el rendimiento operativo y organizacional, evaluando su aplicación en diversas empresas constructoras involucradas en el desarrollo de minas. El principal objetivo de esta investigación fue analizar cómo la implementación de metodologías Lean mejora el desempeño en proyectos de desarrollo minero, específicamente en términos de flujos de trabajo, capacidad de producción, confiabilidad operativa, productividad y eficiencia temporal. Además, se buscó explorar cómo estas herramientas pueden transformarse en un cambio cultural dentro de las organizaciones, promoviendo la adopción de enfoques de mejora continua. La metodología utilizada consistió en estudios de caso, seleccionando tres proyectos de desarrollo subterráneo en una mina de cobre en Chile. Los métodos incluyen análisis estadísticos, diagramas de boxplot y pruebas de hipótesis no paramétricas para evaluar el impacto de Lean. Se emplearon herramientas específicas como el Value Stream Mapping (VSM), el sistema de Last Planner y encuestas aplicadas al personal involucrado. También se utilizaron indicadores como progresos físicos, confiabilidad de aviones, productividad y eficiencia de tiempo.

El cuerpo del trabajo destacó que, tras la implementación de Lean, se observaron mejoras significativas en el rendimiento de los proyectos. Entre los resultados más notables, se logró una reducción del 75 % en interferencias operativas y un aumento del 40 % en la productividad. Además, la confiabilidad del plan mejoró en un 38 %, lo que indica un cumplimiento más efectivo de los cronogramas establecidos. Estos resultados reflejan cómo Lean puede impactar positivamente tanto en la operación técnica como en la gestión organizacional.

En las conclusiones, los autores subrayan que la implementación de Lean en minería no solo mejora indicadores clave de desempeño, sino que también fomenta un cambio organizacional

hacia una cultura de eficiencia y mejora continua. Recomiendan extender el periodo de implementación para maximizar los beneficios y desarrollar investigaciones futuras que analicen el impacto económico directo de estas metodologías en la minería. Este trabajo establece un marco sólido para aplicar Lean en la industria minera, destacando su potencial para transformar operaciones complejas en entornos desafiantes.

Castillo (2013), en su tesis titulada "Implementación de Metodologías Lean en Desarrollo Minero", presentada a la Pontificia Universidad Católica de Chile para optar al grado de Magíster en Ciencias de Ingeniería, analiza la aplicabilidad de las metodologías Lean en proyectos de desarrollo minero en Chile. El objetivo principal de la investigación fue diseñar e implementar metodologías Lean en proyectos mineros, evaluando su impacto tanto en el desempeño operativo de los proyectos como en el comportamiento organizacional. Además, la tesis busca explorar cómo estas metodologías pueden reducir los desperdicios y optimizar el uso de recursos en proyectos caracterizados por su alta complejidad y necesidad de flexibilidad operativa. La metodología empleada consistió en un estudio de casos aplicado a tres proyectos de desarrollo minero, utilizando técnicas de recolección y análisis de datos como encuestas, entrevistas y análisis estadísticos. Se aplican herramientas Lean específicas, como el Mapeo de la Cadena de Valor (VSM) y el Sistema del Último Planificador, para diagnosticar problemas operativos y evaluar los resultados de la implementación. Las variables evaluadas incluyen indicadores de productividad, eficiencia en el uso de recursos, confiabilidad en los programas y satisfacción del cliente interno. El desarrollo del trabajo detalla cómo la implementación de Lean en los proyectos permitió una mejora del 30 % en la confiabilidad de los programas, una reducción del 25 % en los tiempos improductivos y un aumento del 20 % en la productividad general. Asimismo, se destaca la integración de equipos multidisciplinarios y el enfoque en la creación de valor como elementos clave para el éxito de estas metodologías en la industria minera.

En las conclusiones, Castillo Ruedlinger subraya que las metodologías Lean tienen un alto potencial para transformar la industria minera, no solo desde el punto de vista técnico, sino también cultural y organizacional. Recomienda extender su aplicación a otros tipos de proyectos y desarrollar investigaciones futuras que evalúen el impacto económico directo de estas herramientas, destacando que su implementación puede ser una estrategia efectiva para enfrentar los desafíos actuales de la minería.

Peirano (2011), en su tesis titulada "Definición de Pit Final Capacitado Bajo Incertidumbre", presentada a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile para optar al grado de Magíster en Minería, desarrolla una metodología innovadora para integrar la incertidumbre geológica y restricciones de capacidad en la planificación minera. Este trabajo

busca mejorar la precisión y el valor económico en la definición de boxes finales, destacando la relevancia de incorporar variables de riesgo en la toma de decisiones estratégicas. El objetivo principal de la investigación fue elaborar una metodología y una herramienta que permitieran definir un pozo final bajo restricciones de capacidad y condiciones de incertidumbre geológica. Los objetivos específicos incluyen el diseño de algoritmos iterativos que combinan heurísticas como las propuestas por Lerchs y Grossman (1964) y Gershon (1987), la integración de restricciones por período, y el análisis de riesgos asociados a escenarios geológicos. La propuesta de metodología consistió en el desarrollo de un algoritmo que enlaza procesos iterativos para generar versiones de Pits finales, ajustados mediante heurísticas de secuenciamiento y simulaciones geoestadísticas. Este enfoque se validó con estudios de caso, incorporando tasas de descuento intertemporal para evaluar impactos económicos. La integración de incertidumbre geológica permitió una nueva dimensión en la planificación minera, al incluir distribuciones probabilísticas en la definición de geometrías de extracción.

El desarrollo de la investigación detalla la implementación práctica de la metodología en un caso de estudio. Se observaron incrementos significativos en los flujos de caja al incorporar restricciones de capacidad. Además, la metodología demostró que la forma del tajo final depende significativamente de estas restricciones y de las simulaciones geológicas realizadas. La herramienta desarrollada también destacó la importancia de analizar múltiples escenarios para optimizar decisiones estratégicas.

En las conclusiones, Peirano Opazo resalta que la integración de incertidumbre y restricciones de capacidad en la planificación minera constituye un avance significativo hacia una minería más precisa y económicamente viable. El autor subraya la necesidad de continuar desarrollando herramientas que soporten la toma de decisiones en contextos de alto riesgo y sugiere futuras investigaciones para mejorar la robustez y escalabilidad de estas metodologías en proyectos mineros complejos.

Valdés (2016), en su memoria titulada "Metodología de Cálculo de Productividad de Perforación y Mejoras de Gestión en Minas a Cielo Abierto, Aplicado a DRT", presentación a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, aborda el impacto de las interferencias operativas en los procesos de perforación en la División Radomiro Tomic (DRT) de Codelco. Este trabajo propone una metodología innovadora para mejorar los indicadores operacionales, optimizar la planificación minera y estandarizar los procesos.

3 El objetivo principal de la investigación fue identificar y mitigar las interferencias en los procesos de perforación para establecer mejoras en la planificación de largo plazo. A través

de objetivos específicos, el trabajo se enfocó en actualizar los valores históricos de los indicadores, analizar las demoras no programadas y proponer metodologías basadas en las filosofías Lean y Kaizen para incrementar la eficiencia operativa de las perforadoras DML. La metodología empleada incluyó un análisis exhaustivo de datos históricos entre 2012 y 2015, recopilados mediante el sistema Total, además de entrevistas a operadores, ingenieros de perforación y planificación, y mantenedores. Los indicadores operativos como disponibilidad, utilización efectiva y operativa, y rendimiento fueron estudiados en detalle para establecer una base de línea. Posteriormente, se implementaron herramientas Lean-Kaizen enfocadas en la reducción de desperdicios y la gestión visual.

El cuerpo del trabajo destaca una mejora del 23 % en la estimación de productividad tras la aplicación de la metodología propuesta. Además, la implementación de medidas basadas en Lean-Kaizen logró reducir las demoras no programadas en un 20 %, permitiendo aumentar la productividad anual de perforación en 60,500 metros y reducir la necesidad de alquilar equipos adicionales. Esto evidencia que los cambios en la gestión y planificación no solo impactan los costos operativos, sino que también aseguran la sostenibilidad operativa. En las conclusiones, Valdés Soto enfatiza que la implementación de metodologías como Lean y Kaizen en la minería puede ser una herramienta poderosa para optimizar procesos y gestionar mejor los recursos. Asimismo, se recomienda extender la aplicación de estas metodologías a otros contextos mineros y desarrollar investigaciones que integren más variables operativas para maximizar los resultados obtenidos.

² Jélvez (2017), en su tesis titulada "Metodología Multietapa para la Planificación de la Producción de Largo Plazo en Minas a Rajo Abierto bajo Incertidumbre Geológica", ¹¹ presentada a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile para optar al grado de Doctor en Ingeniería de Minas, aborda el desafío de integrar la incertidumbre geológica en todas las etapas de planificación minera. Este trabajo introduce nuevos modelos que incorporan el riesgo asociado a la variabilidad de las reservas, mejorando la robustez de los planos de producción.

El principal objetivo de la investigación fue desarrollar una metodología multietapa que integre la incertidumbre geológica en la determinación del tajo final, la selección de fases y el agendamiento de producción. Los objetivos específicos incluyen el desarrollo de modelos multiobjetivo que equilibran valor y riesgo, la automatización en la selección de fases a partir de Pits anidados y la implementación de estrategias de agendamiento que minimizan el costo total asociado a la incertidumbre.

La metodología incluyó un enfoque cuantitativo basado en simulaciones geoestadísticas y modelos de optimización estocástica. Se aplicarán herramientas como el análisis de riesgo valor-riesgo y algoritmos de programación matemática para evaluar múltiples escenarios geológicos. Los casos de estudio demostraron la efectividad de la metodología al mejorar indicadores como el valor descontado neto y reducir el impacto de las desviaciones productivas frente a la incertidumbre geológica. El trabajo resalta la implementación práctica de estos modelos en un caso de estudio sintético y real. Los resultados indicaron una reducción del 68 % en los costos asociados a la incertidumbre y un aumento del 2 % en el valor descontado neto. Estas mejoras no solo optimizan la viabilidad económica de los proyectos mineros, sino que también fortalecen la capacidad de respuesta ante escenarios adversos. En las conclusiones, destaca la relevancia de considerar la incertidumbre geológica en todas las etapas de planificación minera. Recomendamos futuras investigaciones que amplíen el uso de estas herramientas a otros tipos de incertidumbre y contextos mineros. Este trabajo establece ¹³ un marco teórico y práctico para mejorar la toma de decisiones estratégicas en la minería a rajo abierto.

² Abarca (2015), en su memoria "Optimización de la Productividad en Proyectos de Edificación a través de Value Stream Mapping en la Partida Crítica de Moldajes".

El objetivo principal de esta investigación fue implementar el VSM en moldes de muros para analizar y mejorar la productividad en obras de edificación. Este objetivo se desglosó en la identificación de procesos críticos, la evaluación del estado actual y la proyección de escenarios futuros optimizados. Además, se propuso un enfoque práctico para compartir información entre disciplinas y generar sinergias en las operaciones. La metodología utilizada consistió en recopilar datos de producción en cuatro empresas constructoras mediante encuestas, entrevistas y observaciones en el terreno. Posteriormente, se elaboraron mapas de valor para el estado actual y se identificaron oportunidades de mejora que fueron validadas con los equipos responsables. Finalmente, se plantearon escenarios futuros utilizando herramientas Lean como 5S y sistemas de gestión visual.

El cuerpo del trabajo destaca resultados clave, como ¹³ una reducción del 42 % en los tiempos improductivos y un incremento del 23 % en la eficiencia de los procesos. Estas mejoras no solo optimizaron el uso de recursos humanos y materiales, sino que también garantizaron mayor confiabilidad en los plazos y costos del proyecto. Además, se observará que el VSM facilitó la comunicación entre las disciplinas involucradas, promoviendo un enfoque colaborativo.

En las conclusiones, resalta que la integración de herramientas Lean en proyectos de edificación tiene un impacto significativo en la productividad. Recomienda extender su uso a otras partidas críticas y realizar investigaciones futuras que evalúen el impacto económico y social de estas herramientas en el sector de la construcción.

Yarmuch (2012), en su tesis titulada "Simulación del Sistema de Carguío y Transporte Mina Chuquicamata", presentada a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile para optar al grado de Magíster en Minería, aborda el diseño y la evaluación de alternativas para optimizar el sistema de manejo de materiales en una de las minas a cielo abierto más grandes del mundo, Chuquicamata. Este estudio utiliza técnicas avanzadas de simulación de eventos discretos y modelos de cadenas de Markov para evaluar la productividad y confiabilidad del sistema.

El objetivo principal de la investigación fue modelar el sistema de carguío, transporte y chancado, evaluando alternativas para mejorar la productividad y reducir costos. Los objetivos específicos incluyen la generación de un modelo de velocidades de camiones basado en pendientes, análisis de confiabilidad mediante cadenas de Markov, y la simulación de escenarios de producción para identificar configuraciones óptimas de chancadores. La metodología combinó simulación dinámica de eventos discretos para analizar tráfico, congestión y productividad, con modelos de cadenas de Markov para evaluar la confiabilidad del sistema. El estudio utilizó datos reales de operación de Chuquicamata y software especializado como ProModel para modelar el sistema bajo diferentes configuraciones. También se desarrollaron análisis económicos para comparar los costos asociados a las distintas configuraciones propuestas.

El cuerpo del trabajo resalta que la configuración actual del sistema de chancado, con dos chancadores en superficie y uno al interior del foso, resulta más eficiente en términos operativos y económicos que la alternativa propuesta de trasladar un chancador adicional al interior. La simulación identificó que la congestión en el transporte y los tiempos de espera en los chancadores eran factores críticos para la productividad del sistema. Además, los modelos de Markov confirmaron que la confiabilidad del sistema no mejoraría significativamente con la propuesta de reconfiguración.

En sus conclusiones, Yarmuch Guzmán destaca que la integración de simulación y modelos analíticos en la planificación minera permite evaluar con precisión el impacto de diferentes configuraciones en la productividad y confiabilidad del sistema.

Cardona (2013), en su tesis titulada "Modelo para la Implementación de Técnicas Lean Manufacturing en Empresas Editoriales", presentada en la Universidad Nacional de Colombia,

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Industrial, en Manizales, Colombia, desarrolla un modelo de gestión aplicando Lean Manufacturing para optimizar procesos en empresas del sector gráfico. Este estudio se enfoca en reducir desperdicios y mejorar la productividad en una empresa piloto del sector. El objetivo principal del trabajo fue diseñar un modelo de gestión que integrará herramientas Lean para optimizar el flujo de fabricación de productos gráficos. Los objetivos es realizar un diagnóstico técnico-operativo, determinar las principales fuentes de desperdicio y evaluar el impacto de las herramientas Lean en variables como tiempo de entrega y reducción de costos.

La metodología consistió en cinco etapas: identificar el perfil de la empresa, realizar un diagnóstico operativo, evaluar la aplicabilidad de técnicas Lean, implementar herramientas como 5S, SMED y TPM, y desarrollar acciones de mejora continua mediante eventos Kaizen. La implementación se basó en datos reales del sistema productivo de la empresa piloto, utilizando indicadores clave como tiempo de ciclo, eficiencia global del equipo (OEE) y tasa de defectos.

En el desarrollo, la investigación evidencia mejoras significativas ¹³ en la eficiencia operativa, como una reducción del 25 % en los tiempos de alistamiento y un aumento del 18 % en la productividad global. Las herramientas Lean también facilitaron la identificación de cuellos de botella en procesos críticos como la impresión y el ensamblaje, promoviendo una cultura de mejora continua en toda la organización.

En las conclusiones, destaca que el modelo propuesto es escalable a otras empresas del sector gráfico y adaptable a diferentes contextos productivos.

2.2.1 Antecedentes nacionales

Cabrera (2009), en su manual titulado "Análisis del Mapeo de la Cadena de Valor (VSM: Value Stream Mapping)", proporciona un enfoque integral sobre cómo implementar esta herramienta Lean en procesos productivos y administrativos. Este documento detalla paso a paso el análisis ¹ del estado actual, el diseño del estado futuro, y la implementación de estrategias de mejora basadas en la eliminación de desperdicios, destacando su aplicabilidad tanto en fabricación como en servicios.

El objetivo principal del documento es capacitar a profesionales para utilizar el VSM como una herramienta estratégica en la optimización de cadenas de valor, permitiéndoles identificar actividades que no generan valor y diseñar procesos más eficientes. Entre los objetivos específicos se encuentran comprender las diferencias entre el análisis de cadenas de valor y

el mapeo de procesos, así como desarrollar estrategias para implementar cambios significativos en sistemas productivos.

La metodología se estructura en cuatro etapas principales: (1) selección y capacitación del equipo encargado del mapeo, (2) análisis del estado actual mediante diagramas SIPOC y recolección de datos de tiempo de ciclo y disponibilidad, (3) diseño del estado futuro a través de la integración de técnicas Lean como SMED, Kanban, y flujo continuo, y (4) implementación del plan de mejora con un enfoque en circuitos progresivos y medición constante del desempeño.

En el cuerpo del manual, se describen resultados como la reducción de tiempos muertos en un 30 %, el incremento del uso eficiente de recursos humanos mediante arreglos en U, y la eliminación de sobreproducción a través de sistemas Pull basados en Kanban. Además, se resalta la importancia de nivelar la producción y desarrollar flexibilidad operativa en las células de fabricación para responder a cambios en la demanda.

Las conclusiones enfatizan que el VSM es una herramienta versátil y eficaz para transformar sistemas complejos en procesos ágiles y eficientes. Cabrera Calva destaca que su éxito depende de una implementación planificada, el compromiso de la gerencia y la colaboración activa del personal operativo para generar un impacto sostenible en la competitividad empresarial.

Haitao et al. (2009), en su artículo titulado "Development of Lean Model for House Construction Using Value Stream Mapping", publicado en el *Journal of Construction Engineering and Management*, analizan el uso de Value Stream Mapping (VSM) como herramienta para implementar un modelo Lean en la construcción de viviendas. Este estudio destaca la aplicabilidad de VSM en el sector residencial, abordando desafíos como la variabilidad y los desperdicios en los procesos de construcción.

El objetivo principal del artículo fue desarrollar un modelo Lean para la construcción de viviendas, utilizando VSM para analizar los procesos actuales y formular un modelo de producción más eficiente. Los objetivos específicos incluyen la reducción de tiempos de espera, la mejora en la confiabilidad operativa y la nivelación de la producción para minimizar las fluctuaciones en los flujos de trabajo.

La metodología empleada se estructuró en siete pasos clave: (1) recolección de datos y selección del flujo de valor, (2) mapeo del estado actual, (3) análisis de prácticas existentes y desarrollo de métricas Lean, (4) formulación del modelo de producción Lean, (5) pruebas de laboratorio utilizando simulación, (6) desarrollo de un plan Kaizen, y (7) implementación y

evaluación de resultados. Este enfoque permitió una evaluación sistemática de los procesos, destacando oportunidades para la mejora continua.

El cuerpo del artículo presenta resultados significativos, como la reducción de los tiempos de espera en un 27 %, el incremento de la ratio de valor agregado del 17 % al 26 %, y la mejora en la confiabilidad de los flujos de trabajo mediante el uso de métricas Lean. Además, se desarrollaron simulaciones que confirmaron la viabilidad del modelo propuesto y proporcionaron una base para la implementación progresiva de cambios en el sistema productivo.

En sus conclusiones, los autores destacan que el VSM es una herramienta efectiva para identificar desperdicios y mejorar la eficiencia operativa en la construcción residencial. Recomiendan la integración de enfoques Lean en proyectos similares para promover la sostenibilidad y la competitividad en la industria de la construcción.

Díaz (2024), en su informe titulado "Informe de Verificación de Parámetros de Perforación en el Proyecto 4380-05012 PC", analiza el cumplimiento de los parámetros de calidad en las actividades de perforación realizadas en el proyecto mencionado. Este documento fue elaborado para supervisar y garantizar que las operaciones de perforación sigan las especificaciones establecidas por MCP y que los resultados se mantengan dentro de los márgenes aceptables de desviación.

El objetivo principal del informe fue demostrar el cumplimiento de los parámetros técnicos en la perforación, tales como espaciamiento, inclinación y altura de los taladros. Además, se buscó identificar y corregir las desviaciones detectadas durante las mediciones, asegurando que las actividades operativas cumplan con los estándares de calidad esperados.

La metodología incluyó inspecciones in situ de los puntos topográficos marcados, utilizando herramientas como inclinómetros y flexómetros para medir las desviaciones en el espaciado y las alturas de perforación. Se realizaron análisis estadísticos para evaluar las desviaciones y se emplearon gráficos e histogramas para visualizar la concentración de mediciones dentro de los rangos establecidos.

Los resultados reflejan un alto cumplimiento de los parámetros técnicos. El informe destaca que el 95.45 % de las mediciones de espaciado entre puntos perforados se encuentra dentro del margen de desviación aceptable de ± 0.1 metros. Además, las mediciones de altura muestran que el 96 % de los taladros cumplen con el margen permitido de ± 0.3 metros. Las desviaciones detectadas fueron menores y se atribuyeron a errores en la ejecución operativa o en la calibración de los equipos utilizados.

En las conclusiones, Díaz subraya la importancia de mantener un control constante sobre las actividades de perforación para garantizar la calidad operativa. Se recomienda fortalecer las prácticas de supervisión y evaluar la incorporación de equipos automatizados, como GPS diferenciales, para ³ mejorar la precisión de las mediciones y reducir las desviaciones en futuros proyectos.

¹ Leiva (2007), en su tesis titulada "Influencia de la Optimización de la Fragmentación de Roca en la Rentabilidad de las Operaciones Mina-Molienda", presentada en la Pontificia Universidad Católica del Perú, explora el impacto de la fragmentación de roca por voladura en el desempeño y rentabilidad de las operaciones mineras. El estudio se centra en optimizar el proceso de fragmentación mediante simulaciones avanzadas y modelos económicos para maximizar la eficiencia global.

¹ El objetivo principal fue determinar cómo los ajustes en la fragmentación de la roca pueden influir en la eficiencia de procesos posteriores, como el carguío, transporte, chancado y molienda. Además, buscó identificar las configuraciones óptimas para minimizar costos operativos y maximizar la rentabilidad en las etapas de mina y planta. La metodología adoptó un enfoque sistémico que integra modelos de simulación como Kuz-Ram, TCM y CZM, complementados con análisis digital de imágenes para evaluar la fragmentación resultante. Asimismo, se incorporan herramientas económicas como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) para valorar distintos escenarios financieros en base a los costos y beneficios asociados a la voladura.

Los resultados mostraron que una distribución óptima de fragmentación puede reducir significativamente los costos unitarios. Por ejemplo, el análisis demostró que el 80 % de los costos pueden optimizarse con ajustes específicos en los diseños de voladura y la selección de explosivos. Los datos también destacaron que mejoras en la fragmentación inicial benefician la productividad en molienda, representando un ahorro del 10-15 % en costos operativos. Finalmente, las conclusiones recalcan la importancia de implementar enfoques integrados para evaluar y optimizar cada etapa del ciclo minero. Se recomienda la adopción de tecnologías avanzadas y la capacitación del personal para garantizar el éxito y sostenibilidad de los procesos optimizados.

Salazar (2020), en su tesis titulada "Modelo Matemático Práctico para el Diseño de Voladura de Bancos", presentada en la Universidad de Chiclayo, Perú, desarrolló ¹ un modelo matemático para mejorar el diseño de voladuras en bancos mineros. Este trabajo se centra en resolver los problemas de obsolescencia e ineficiencia de los modelos matemáticos tradicionales, proponiendo una alternativa práctica y confiable.

El objetivo principal fue diseñar un modelo matemático práctico que optimizara las operaciones de voladura de bancos. Se plantearon objetivos específicos como identificar los parámetros clave que influyen en las voladuras, analizar los modelos matemáticos existentes y desarrollar una fórmula que integrara estos factores de manera eficiente.

La metodología empleada incluyó un diseño de investigación descriptivo no experimental. Para el análisis, se utilizaron técnicas de análisis documental y herramientas como el software JK Simblast para realizar simulaciones. También se ayudó en métodos analíticos para evaluar la eficiencia del modelo propuesto en escenarios simulados.

Los resultados demostraron que el modelo matemático desarrollado es efectivo y confiable, permitiendo calcular parámetros clave como la carga, espaciamiento, sobreperforación y longitud de taco. El modelo mostró una notable mejora en la fragmentación del material, logrando valores de P50 entre 0.059 y 0.13 metros, y de P80 entre 0.24 y 0.25 metros, con factores de potencia óptimos según las condiciones simuladas.

Las conclusiones destacaron que el modelo permite no solo optimizar las operaciones de voladura, sino también reducir costos operativos y mejorar la sostenibilidad ambiental al utilizar explosivos de manera más eficiente. Se recomienda su aplicación práctica en operaciones en minas y la inclusión de constantes de corrección basadas en datos reales para su refinamiento.

Castro (2019), en su tesis titulada "Aplicación de la Fórmula de R. Praillet para Evaluar la Velocidad de Penetración y su Impacto en la Perforación Primaria en una Mina a Tajo Abierto de Ica - Perú 2018", presentada en la Universidad Católica de Santa María, Perú, desarrolla un análisis detallado sobre la aplicación de modelos teóricos en la optimización de operaciones de perforación en minería. Este trabajo se enfoca en demostrar el impacto de la fórmula de R. Praillet en la mejora de la eficiencia operativa y la reducción de costos en perforación primaria.

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar cómo la velocidad de penetración, determinada a través de la fórmula de R. Praillet, podría optimizar los costos operativos y mejorar los procesos de perforación. Los objetivos específicos incluyen la comparación de velocidades instantáneas y calculadas, el análisis de parámetros operativos, y la determinación de ahorros potenciales en costos totales de perforación.

La metodología consistió en un diseño descriptivo y comparativo, con una muestra de 70 perforaciones en distintos tipos de terreno, incluyendo desmonte y mineral de baja ley. Se emplearon herramientas estadísticas para evaluar las diferencias entre los datos de velocidad

de perforación obtenidos en campo y los calculados mediante la fórmula de R. Praillet. Además, se realizaron análisis económicos para estimar los costos totales de perforación (TDC) y el impacto financiero de las mejoras propuestas.

Los resultados destacaron un incremento del 11,57 % en la velocidad de penetración al aplicar la fórmula de Praillet, lo cual permitió una reducción del 6,36 % en el TDC. Este ahorro se tradujo en beneficios económicos significativos, con una reducción mensual de \$27,720 y una anual de \$332,640. La investigación concluye que la fórmula de Praillet no solo mejora la precisión de las estimaciones de velocidad, sino que también contribuye a la sostenibilidad económica de las operaciones mineras. Finalmente, las conclusiones refuerzan la viabilidad del uso de modelos matemáticos en la minería para la optimización operativa. Además, se recomienda la incorporación de análisis complementarios en futuros estudios para refinar los parámetros operativos y lograr una mayor precisión en diferentes contextos geológicos y operativos.

Chura (2023), en su tesis titulada "Reducción de los Costos de Servicios Auxiliares e Incidentes por Caída de Rocas Utilizando la Voladura Controlada en la Mina Toquepala - SPCC", presentación en la Universidad Nacional del Altiplano, Perú, desarrolló una investigación orientada a **disminuir los costos operativos y los riesgos de seguridad** asociados con la sobrerotura de taludes mediante la implementación de técnicas avanzadas de voladura controlada en la mina Toquepala.

El objetivo principal de esta investigación fue implementar y evaluar el impacto de la voladura controlada para reducir la sobrerotura en el talud de banco, minimizando riesgos y costos asociados en las operaciones de la mina Toquepala. Entre los objetivos específicos, se incluyen determinar las mejores prácticas para la reducción de sobreroturas, evaluar el impacto de estas técnicas en los riesgos operativos, y cuantificar los costos adicionales asociados a servicios auxiliares.

La metodología empleada consistió en un diseño explicativo-exploratorio con un enfoque cuantitativo-descriptivo. Se realizaron pruebas de voladura con taladros de precorte y recorte en distintas fases operativas del tajo. Los datos se analizaron para comparar los costos y la incidencia de caídas de rocas antes y después de la implementación de la técnica.

Los resultados mostraron que la voladura controlada redujo los incidentes por caída de rocas hasta en un 70 % y redujo los costos de limpieza en un 20 %. Sin embargo, el costo de perforación y voladura aumentó entre un 15 % y un 45 %, lo que implicó un incremento total del 10 % en los costos operativos. Los análisis también destacaron una mejora significativa en la estabilidad de los taludes y en la seguridad operativa general.

Las conclusiones enfatizan que la voladura controlada ³ no solo mejora la seguridad y estabilidad operativa, sino que también optimiza la utilización de recursos en el largo plazo. Se recomienda su implementación como un estándar operativo en la mina y la capacitación continua del personal para asegurar resultados sostenibles y efectivos.

2.3 ² Bases teóricas

2.3.1 Lean Six Sigma

Lean es una filosofía de trabajo, basada en las personas, define la forma de mejora y optimización de un sistema de producción focalizándose en identificar y eliminar todo tipo de desperdicios.

Para alcanzar sus objetivos, despliega una aplicación sistemática y habitual de un conjunto extenso de técnicas que cubren la práctica total de las áreas operativas de fabricación: organización de puestos de trabajo, gestión de la calidad, flujo interno de producción, mantenimiento, gestión de la cadena de suministro. (Womack, 2006)

Según Shinohara en 1988, una producción Lean tiene como base lo siguiente: Encontrar la manera de tener una producción que brinde productos de calidad reduciendo lo más posible la utilización de recursos. Además, será considerado desperdicio aquel elemento que no contribuye a la calidad, o genere un mayor uso de los recursos.

2.3.2 Six Sigma

¹ Stamatis (2003) señala que Six Sigma es una metodología centrada en el incremento de la calidad de procesos y garantizar el nivel de competencia de la empresa en el mercado actual. Para ello, se consideran los requerimientos de los consumidores, siendo esta la base para medir las variables del proceso productivo y establecer el rendimiento organizacional, analizar las causas que provocan variación en el proceso y, en base al análisis de estos datos, optimizar el proceso al erradicar los procesos repetitivos (desperdicio).

Otra definición de Six Sigma, es ¹ una filosofía de gestión de calidad orientada a medir los defectos organizacionales, aminorar los índices de variación y optimizar la calidad de los procesos, así como de los servicios y productos a comercializar (Arafeh et al. 2018). Esta metodología fue propuesta por Bill Smith, miembro de la empresa Motorola, para luego ser implementado en diversas empresas como un método de gestión de calidad (Zhou et al. 2020).

2.3.3 Fases de la metodología Six Sigma

2.3.3.1 Definir

El Six Sigma, comienza con la localización de sí mismo, mostrando la fundamentación del éxito, en este periodo se requiere conocer de manera precisa las metas. Cómo será valorizado el logro de lo propuesto, los resultados deseados y todos los que hicieron posible el desarrollo del mismo. (Praveen Gupta 2015).

2.3.3.2 Medir

Según Praveen (2015), lo que se espera al final de esta fase en medir las dificultades que se están abordando y, de esta manera, saber los efectos que ha ocasionado en las instituciones. Analizar Luego de que en la fase medir se tengan los datos requeridos, se procede al estudio o análisis, a fin de brindar la situación en la que se encuentra el proceso, por lo que se requiere hacer un análisis minucioso en el que se logre identificar lo que ha originado (Praveen 2015).

2.3.3.3 Mejorar

Praveen (2015) define a esta etapa como la más significativa, ya que en ella es cuando se comienza a solventar las dificultades, partiendo de lo que la originó.

2.3.3.4 Controlar

Última fase de un proyecto, Six Sigma se establece cuando ya se ha seleccionado las soluciones que se llevarán a cabo. En esta fase se ponen en práctica métodos en los que las soluciones que se implementen sean perdurables. (Praveen Gupta 2015)

Un término que se debe entender a cabalidad, es el defecto (enfoque metodológico del Six Sigma), el cual se define como un evento en el que determinado producto o servicio no satisface las expectativas del consumidor o cliente, por lo cual, la empresa debe aplicar estrategias para generar resultados positivos, predecibles y estables.

2.3.3.5 Last Planner (último planificador)

Una de las metodologías más utilizadas para el control de la construcción bajo la filosofía lean es el denominado, "sistema de planificación y control basado en una asignación confiable de las actividades, con el objetivo de estabilizar el flujo de trabajo, controlar las interdependencias entre los procesos y reducir su variabilidad" (Ballard, 2000).

2.3.3.6 Diagrama de Ishikawa

“Es una herramienta grafica de LEAN que permite representar las causas conducentes a un efecto dentro un proceso, separa e identifica la causa raíz de un problema cuando estas son varias” (Lean Manufacturing, 2013).

2.3.3.7 Mejora de Calidad

Durante el proceso de fabricación o de prestación del servicio existen un conjunto de factores que influyen en la variabilidad de estos procesos, como son las denominadas 5M: maquinas, mano de obra, métodos, medio y materiales, y a las que habría que añadir una sexta M, la gestión (management). (Dening, 1988).

2.3.3.8 Sobre rotura

Proceso de extracción de material excesivo durante la excavación, lo cual puede resultar en desperdicio de recursos y aumento de costos operativos.

2.3.3.9 Optimización de Procesos

Aplicación de estrategias y metodologías para mejorar la eficiencia y efectividad de los procesos operativos, en este caso, los relacionados con la sobre rotura y el sostenimiento en excavaciones horizontales.

2.3.3.10 Eficiencia Operativa

Mejora de la productividad y reducción de los costos operativos mediante la eliminación de actividades innecesarias o ineficientes.

2.3.3.11 Seguridad Minera

Implementación de medidas y prácticas para garantizar la seguridad de los trabajadores y la integridad de las instalaciones durante las operaciones de minería.

2.3.3.12 Mejora Continua

Filosofía de gestión que impulsa la búsqueda constante de oportunidades de mejora en los procesos, productos o servicios, un principio fundamental de Lean Six Sigma.

2.3.3.13 Operaciones mineras

³ Para asegurar una explotación minera efectiva, es esencial llevar a cabo una serie de actividades unitarias conocidas como operaciones mineras, que implican la separación física de los minerales de su entorno natural y su transporte hacia las áreas de procesamiento. Estas operaciones se realizan de manera cíclica a lo largo de una jornada laboral diaria. Los horarios y tiempos específicos de estas operaciones pueden variar dependiendo del tipo de trabajo.

2.3.3.14 ³ Cargas explosivas

La selección y distribución de las cargas explosivas también son consideraciones importantes en el diseño de mallas de perforación y voladura. Las cargas explosivas se colocan estratégicamente en los taladros para optimizar la fragmentación de la roca y minimizar los efectos secundarios no deseados.

2.3.4 ⁴ Estándares de Excelencia Operacional

La aplicación de la filosofía LEAN y sus consecuentes beneficios para cualquier organización (mayor calidad, menores costos, aumento de productividad, etc.), se encuentran directamente relacionados con la instauración de soportes dentro de la cultura organizacional. A partir de lo anterior se han establecido cuatro tipos de estándares, llamados estándares de excelencia operacional, los cuales permiten la correcta asimilación de esta filosofía dentro de la metodología diaria de trabajo.

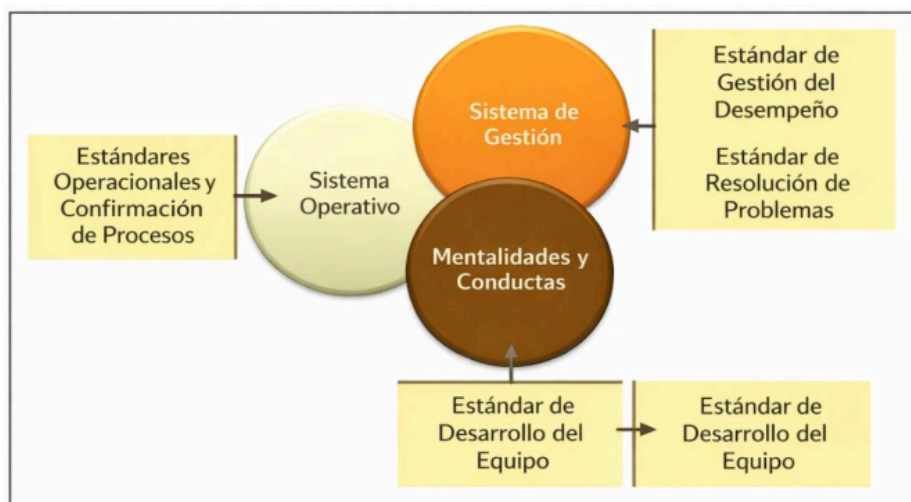
Además, estos estándares definen con claridad el comportamiento esperado de la organización para lograr sustentar en el tiempo los cambios que la filosofía LEAN incorpora en los distintos ámbitos de la estructura organizacional. Los estándares de excelencia operacional corresponden a:

- Estándar de Gestión del Desempeño.
- Estándar de Resolución de Problemas.
- Estándares Operacionales y Confirmación de Procesos.
- Estándar de Desarrollo de Personas.

En la siguiente figura se puede apreciar el ámbito de aplicación de los estándares de excelencia operacional dentro de la estructura organizacional, a través de los sistemas de gestión, sistema operativo y de las mentalidades y conductas:

Figura 1

Estándares de excelencia operacional dentro de la estructura organizacional



Nota. Integración de los Estándares de Excelencia Operacional

2.3.5 ⁴ Diseño de estándares operacionales y confirmación de procesos.

El diseño de los estándares y su correspondiente confirmación de procesos es una secuencia que requiere 5 etapas principales operacionales (Estándares de Excelencia Operacional del Proceso de Extracción, Gerencia de Operaciones).

Figura 2

Diseño de estándares operacionales



Nota. ⁴ Diseño de Estándares Operacionales y Confirmación de Procesos.

2.3.6 ⁴ Diagnóstico Operacional

El diagnóstico operacional se basa en la recopilación y análisis de información del proceso para el cual se busca generar los estándares operacionales. El objetivo del diagnóstico es identificar cuáles son las brechas y cuellos de botella en el estado actual del proceso productivo.

Para la identificación de brechas y cuellos de botella, existe una herramienta LEAN muy útil que permite establecer la efectividad / eficiencia de equipos o procesos denominada Overall Equipment Effectiveness (OEE) / Overall Process Efficiency (OPE). A continuación, se explican ambas herramientas.

2.3.6.1 ⁴ Eficacia Total del Equipo – Overall Equipment Effectiveness (OEE)

Es una herramienta que permite analizar el tiempo efectivo de utilización de las máquinas, con lo cual se puede obtener el nivel de eficiencia de su uso.

Es un concepto desarrollado en Toyota por el ingeniero Seiichi Nakajima y hoy se ha convertido en un estándar internacional reconocido por las principales industrias alrededor del mundo.

Se funda en el hecho de que las máquinas son diseñadas sobre la base de una cierta capacidad de producción, aunque en la práctica, por diferentes razones, la producción siempre es menor a dicha capacidad.

El OEE considera las principales fuentes de pérdida de eficiencia y las posiciona en categorías para monitorear y mejorar el desempeño de manera más fácil y estructurada.

CAPITULO III.

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Método de investigación

El método de investigación empleado es el método científico, aplicado al ámbito de la ingeniería de minas, el cual permite analizar sistemáticamente un proceso productivo real, identificar sus variables críticas, explicar su comportamiento y formular una propuesta de mejora basada en evidencia empírica. Este método se desarrolla a través de la observación, medición, análisis e interpretación de datos operativos del proceso de perforaciones de precorte, siguiendo una secuencia lógica y verificable, tal como lo establece Hernández Sampieri (2022).

3.2 Enfoque de la investigación

El enfoque de la investigación es cuantitativo, debido a que se fundamenta en la recolección y análisis de datos numéricos provenientes de indicadores de productividad, variabilidad del proceso y tiempos no contributivos. El estudio busca medir objetivamente el desempeño del proceso de perforaciones de precorte, aplicar herramientas estadísticas y evaluar relaciones entre variables, con el propósito de sustentar una propuesta de mejora basada en la metodología Six Sigma. Este enfoque permite contrastar hipótesis y obtener conclusiones generalizables dentro del contexto operativo analizado (Hernández Sampieri, 2022).

3.3 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es no experimental, debido a que las variables no son manipuladas deliberadamente, sino observadas y analizadas tal como se presentan en el proceso real de perforaciones de precorte. Los datos utilizados provienen de registros históricos, informes operativos y reportes técnicos de mina, sin intervención directa del investigador sobre el proceso.

Asimismo, el diseño es transversal, ya que el análisis de la información se realiza en un periodo determinado correspondiente al año 2025, permitiendo evaluar el estado actual del proceso y formular la propuesta de mejora en función de dicho diagnóstico.

3.4 Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada, porque se orienta a resolver un problema práctico y concreto identificado en la operación minera, específicamente las pérdidas productivas en el

proceso de perforaciones de precorte. Los resultados del estudio están dirigidos a generar una propuesta técnica de mejora que pueda ser utilizada por la mina como herramienta de gestión operativa.

3.5 Nivel de investigación

El nivel de investigación es descriptivo–explicativo. Es descriptivo porque caracteriza el comportamiento del proceso de perforaciones de precorte a través de indicadores de productividad, variabilidad y eficiencia operativa. Es explicativo porque analiza las causas que generan las pérdidas productivas, estableciendo relaciones entre variables operativas, geomecánicas y de diseño del patrón de perforación, con el fin de sustentar la propuesta Six Sigma.

3.6 Variables e indicadores

3.6.1 Variable independiente

Implementación de la metodología Six Sigma

3.6.1.1 Dimensiones e indicadores

Dimensión: Identificación de variables críticas del proceso

Indicadores:

- Número de variables críticas (CTQ) identificadas
- Porcentaje de variables críticas controladas
- Frecuencia de ocurrencia de fallas asociadas a CTQ

Dimensión: Control de la variabilidad del proceso

Indicadores:

- Desviación estándar del avance por perforación
- ¹ Índice de capacidad del proceso (Cp)
- Índice de desempeño del proceso (Cpk)
- Nivel sigma del proceso

Dimensión: Mejora y control del proceso

Indicadores:

- Porcentaje de cumplimiento del plan de perforación
- Reducción de tiempos no contributivos
- Nivel de estandarización del proceso
- Número de acciones de control implementadas

3.6.2 Variable dependiente

Pérdidas productivas en el proceso de perforaciones de precorte

3.6.2.1 Dimensiones e indicadores

Dimensión: Productividad

Indicadores:

- Metros perforados por hora
- Metros perforados por turno
- Avance efectivo diario
- Porcentaje de cumplimiento del avance programado

Dimensión: Eficiencia operativa

Indicadores:

- Porcentaje de utilización del equipo de perforación
- Porcentaje de tiempos improductivos
- Tiempo promedio por perforación
- Rendimiento del equipo de perforación

Dimensión: Estabilidad del proceso

Indicadores:

- Variabilidad del avance diario

- Repetitividad del proceso de perforación
- Desviación del patrón de perforación.

3.7 Muestra

Dado que la población es finita y conocida, se determinó el tamaño de la muestra mediante el uso de la fórmula para poblaciones finitas, con el propósito de asegurar la representatividad estadística de los datos analizados. Se consideró un nivel de confianza del 95 %, un margen de error del 5 % y una proporción esperada de éxito de 0.5, criterio que garantiza un tamaño de muestra conservador y metodológicamente robusto.

3.7.1 Datos Iniciales

$$N = 200$$

$$Z = 1.96$$

$$E = 0.05$$

$$p = 0.5$$

$$q = 1 - p = 0.5$$

Fórmula para el cálculo del tamaño de la muestra

$$n = \frac{Z^2 \cdot p \cdot q \cdot N}{E^2(N - 1) + Z^2 \cdot p \cdot q}$$

Sustitución de valores

$$n = \frac{(1.96)^2 \cdot 0.5 \cdot 0.5 \cdot 200}{(0.05)^2(200 - 1) + (1.96)^2 \cdot 0.5 \cdot 0.5}$$

Desarrollo del cálculo

$$n = \frac{3.8416 \cdot 0.25 \cdot 200}{0.0025 \cdot 199 + 3.8416 \cdot 0.25}$$

$$n = \frac{192.08}{0.4975 + 0.9604}$$

$$n = \frac{192.08}{1.4579}$$

$$n = 131.7$$

Tamaño de muestra final

$$n \approx 132$$

El tamaño de la muestra está constituido por 132 perforaciones de precorte, lo que representa aproximadamente el 66 % de la población total. Este nivel de cobertura garantiza un alto grado de representatividad estadística, reduciendo significativamente el riesgo de sesgo muestral y fortaleciendo la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Desde ¹⁵ el enfoque de la metodología Six Sigma, el tamaño de muestra calculado es adecuado para el análisis de la variabilidad del proceso, la identificación de variables críticas (CTQ) y la estimación de índices de capacidad del proceso, tales como Cp y Cpk. Asimismo, permite realizar comparaciones confiables entre la situación inicial y posterior a la implementación de la metodología, contribuyendo a una evaluación objetiva de la reducción de las pérdidas productivas en el proceso de perforaciones de precorte de la Fase 7.

3.8 Unidad de análisis

La unidad de análisis de la presente investigación está constituida por cada perforación de precorte ejecutada en la Fase 7 de la mina Toromocho. Cada perforación representa una unidad elemental de observación y medición, en la cual se registran los datos operativos necesarios para evaluar el desempeño del proceso, tales como avance perforado, tiempo de ejecución, desviación del patrón de perforación, ⁶ condiciones geomecánicas del macizo rocoso y ocurrencia de tiempos improductivos.

La selección de esta unidad de análisis permite evaluar de manera objetiva la variabilidad del proceso de perforación, identificar las variables críticas del proceso y medir el impacto de la implementación de la metodología Six Sigma en la reducción de las pérdidas productivas, asegurando la coherencia entre los objetivos, las variables y los indicadores definidos en la investigación.

CAPITULO IV.

RESULTADOS Y DISCUSIONES IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA SIX SIGMA (DMAIC)

La metodología Six Sigma se reconoce como un enfoque estructurado y cuantitativo orientado a la mejora continua de los procesos industriales. Su propósito principal es reducir la variabilidad y eliminar las causas raíz de las deficiencias que afectan el rendimiento operativo, mediante el uso sistemático de herramientas estadísticas y de control de calidad. De acuerdo con Pyzdek y Keller (2014, pp. 35–38), Six Sigma proporciona un marco disciplinado basado en la medición y el análisis de los datos del proceso, lo que permite alcanzar niveles de desempeño cercanos a la perfección operativa.

El ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar) constituye la estructura metodológica fundamental de Six Sigma. Este ciclo ofrece una secuencia lógica para abordar problemas complejos y facilita la toma de decisiones basadas en evidencia, desde la identificación del problema hasta la consolidación de los resultados. Cada fase del DMAIC se orienta a establecer un conjunto de actividades y entregables que aseguren la trazabilidad del proyecto, sustentando la mejora de procesos en el análisis estadístico riguroso (Pyzdek y Keller, 2014, pp. 40–42).

En el presente estudio, la metodología Six Sigma se implementa en el proceso de perforación de precorte correspondiente a la Fase 7 de la Mina Toromocho, con el objetivo de reducir las pérdidas productivas. La aplicación se basa en los registros correspondientes a los meses de julio, agosto y septiembre de 2025, empleando indicadores como la eficiencia de perforación (EP), el tiempo no contributivo (TNC), y la calidad de Diagrama de Perforación.

Tabla 2

Estructura del ciclo DMAIC para la mejora de procesos en la perforación de precorte – Fase 5.

Fase	Actividades principales	Herramientas Lean Six Sigma y estadísticas aplicadas	Entregables del estudio
Definir	- Formular el problema principal: pérdidas productivas por tiempos no contributivos (TNC). - Identificar clientes internos: geotecnia, planeamiento y voladura. - Elaborar mapa SIPOC del proceso de perforación. - Establecer indicadores CTQ.	SIPOC, Matriz VOC-CTQ, Mapa de proceso, Diagrama de flujo operativo.	Declaración del problema, objetivos SMART, diagrama del proceso actual, requerimientos del cliente.
Medir	- Recolectar datos reales de perforación (julio–septiembre 2025). - Validar registros diarios de turno día/noche. - Calcular línea base de eficiencia y pérdidas productivas. - Determinar variabilidad de ROP y TNC por equipo.	Hoja de recolección de datos, Análisis MSA, Histograma, Boxplot.	Línea base de desempeño, resumen estadístico descriptivo, gráfico de control inicial, análisis de capacidad del proceso.
Analizar	- Determinar correlaciones entre variables (ROP, EP, Q, TNC). - Evaluar diferencias entre equipos mediante ANOVA. - Modelar relación entre eficiencia y factores operativos mediante regresión múltiple. - Identificar causas raíz con evidencia empírica.	Diagrama de Ishikawa, Análisis de Pareto, ANOVA, Regresión múltiple, Correlación de Pearson.	Informe de causas raíz, modelos estadísticos validados ($p < 0.05$), Pareto de demoras, interpretación de variabilidad operativa.
Mejorar	- Proponer acciones correctivas con base en resultados reales. - Rediseñar la secuencia operativa de perforación priorizando reducción de TNC. - Comparar indicadores antes y después de la mejora (julio vs septiembre).	DOE observacional, Gráficos $\bar{X}$ -R, Prueba t, Pareto comparativo antes–después.	Plan de mejora operativa, validación estadística ($p < 0.05$)
Controlar	- Establecer plan de control estadístico del proceso. - Implementar indicadores EP, PP, Q y CUP.	Gráficos de control.	Manual de control Six Sigma.

Nota. La tabla resume la estructura metodológica del ciclo DMAIC, adaptada a la mejora del proceso de perforación de precorte en la Fase 7 de la Mina Toromocho, considerando las actividades, herramientas estadísticas y entregables que se desarrollarán en la tesis. La secuencia y contenido se basan en la propuesta metodológica de George, Maxey, Rowlands y Upton (2004), quienes destacan la integración del análisis cuantitativo y la gestión operativa como pilares del enfoque Lean Six Sigma aplicado a industrias de alto rendimiento.

4.1 Fase Definir

4.1.1 Plan de evaluación

La Fase Definir constituye el punto de partida del ciclo DMAIC, orientada a describir con precisión el proceso actual, establecer el alcance del proyecto y determinar los indicadores de desempeño a controlar. En la Fase 7 de la Unidad Minera Toromocho, operada por OWM Open World Mining Contratistas S.A.C., se analizaron los reportes diarios de perforación correspondientes a los meses de julio, agosto y septiembre de 2025.

Los registros revelaron que el promedio de eficiencia de perforación fue de 12,3 m/h, mientras que las pérdidas productivas alcanzaron el 23,4 % del tiempo total operativo, valores que se encuentran por debajo de los estándares definidos ($EP \geq 14,5$ m/h; $PP \leq 15$ %). Este diagnóstico evidencia la necesidad de aplicar la metodología Six Sigma para reducir la variabilidad del proceso y optimizar el uso del tiempo efectivo de perforación (George, Maxey, Rowlands y Upton, 2004, pp. 15–18).

Tabla 3

Plan de evaluación del proceso de perforación de precorte – Fase 7, Mina Toromocho

Etapa de evaluación	Descripción de la acción	Indicador de medición	Fuente de datos	Herramienta analítica
Delimitación del proceso	Identificación del ciclo operativo de perforación desde el inicio del collarado hasta el registro final.	Duración total del ciclo operativo (h).	Reportes diarios de perforación (OWM, 2025).	Mapa SIPOC.
Definición del problema	Determinar la magnitud de pérdidas productivas asociadas a tiempos no contributivos.	$PP = (TNC / TP) \times 100 \%$.	Registros de julio–septiembre (2025).	Análisis descriptivo.
Identificación de clientes internos	Identificar áreas involucradas y dependientes del proceso (planeamiento, geotecnia, voladura).	Requerimientos de desempeño operativo.	Fichas de coordinación interna.	Matriz VOC–CTQ.
Establecimiento de variables críticas	Seleccionar indicadores que afectan la calidad y eficiencia.	EP, PP, CUP, Q.	Informes técnicos de rendimiento.	Recolección sistemática de datos.

Determinación de objetivos	Fijar metas operativas alineadas con los estándares del proyecto.	EP $\geq$ 14,5 m/h; PP $\leq$ 15 %.	Línea base de rendimiento 2025.	Matriz SMART.
----------------------------	---	--	---------------------------------	---------------

Nota. La tabla presenta las etapas, acciones, indicadores y herramientas utilizadas para definir y estructurar el análisis inicial del proceso de perforación de precorte en la Fase 7 de la Mina Toromocho, bajo el enfoque DMAIC. Fuente: Adaptado de George et al. (2004).

4.1.2 Mapas del proceso

Estos mapas constituyen una herramienta esencial para comprender de forma estructurada las interacciones entre los distintos elementos que conforman el sistema de trabajo, facilitando la identificación de variables que influyen en la eficiencia operativa y en la generación de pérdidas productivas.

Según George et al. (2004, pp. 32–35), el análisis del proceso mediante el modelo **SIPOC** (Supplier, Input, Process, Output, Customer) es una técnica efectiva para visualizar la relación entre los proveedores del proceso, las entradas, las actividades principales, las salidas y los clientes. De igual forma, Pyzdek y Keller (2014, pp. 46–48) destacan que el uso de un SIPOC en la fase inicial de un proyecto Six Sigma permite identificar con rapidez las áreas donde se generan actividades que no aportan valor, sirviendo como base para la medición y mejora posterior.

A continuación, se presenta la estructura SIPOC correspondiente al proceso de perforación de precorte evaluado en la Fase 7 de la Unidad Minera Toromocho.

Tabla 4

Mapa SIPOC del proceso de perforación de precorte

Proveedor	Entradas	Proceso	Salidas	Cliente
OWM Open World Mining Contratistas S.A.C.	Reportes diarios de perforación, datos de tiempo no contributivo (TNC), condiciones geológicas y plan de perforación.	Ejecución del proceso de perforación de precorte mediante el equipo SmartROC D65	Datos consolidados de rendimiento operativo (eficiencia, pérdidas productivas, razón de penetración), tiempos improductivos identificados, registro de desviaciones y resumen de actividades correctivas.	Compañía Minera Chinalco Perú S.A. – Unidad Minera Toromocho (áreas de Planeamiento, Geotecnia y Voladura).

Nota. La tabla muestra la representación general del proceso de perforación de precorte en la Fase 7 de la Unidad Minera Toromocho bajo el enfoque SIPOC, identificando los elementos clave del flujo operativo y los responsables involucrados. Esta representación permite reconocer la interacción entre los datos de campo, las operaciones de perforación y los requerimientos del cliente interno. Fuente: Adaptado de George et al. (2004) y Pyzdek y Keller (2014).

El análisis SIPOC evidencia que las principales oportunidades de mejora se concentran en el control de las entradas (condiciones de geología local y disponibilidad mecánica de los equipos) y en la reducción de pérdidas de tiempo durante la ejecución del proceso. La claridad obtenida a partir del mapa facilita la identificación de los puntos críticos donde la aplicación de herramientas Six Sigma puede generar mayor impacto en la reducción de variabilidad y en el incremento de la eficiencia de perforación.

4.1.3 Evaluación del proceso de perforación – Modelo SIPOC

En la fase Definir del ciclo DMAIC, la comprensión del proceso actual es esencial para delimitar los factores que influyen en la variabilidad operativa. En este sentido, se elaboró un modelo SIPOC extendido que permitió identificar las áreas involucradas, los flujos de información y los puntos críticos de interacción dentro del proceso de perforación de precorte. Este enfoque posibilita obtener una visión sistémica del proceso, facilitando la identificación de actividades que agregan o no agregan valor a la productividad.

De acuerdo con George et al. (2004, pp. 35–38), el modelo SIPOC constituye una herramienta eficaz para establecer los límites de un proceso y describir la relación entre los proveedores, las entradas, las actividades principales, los productos resultantes y los clientes. De manera complementaria, Pyzdek y Keller (2014, p. 48) destacan que su aplicación en la fase inicial de un proyecto Six Sigma permite determinar las fuentes potenciales de variabilidad que impactan en la eficiencia y calidad del proceso.

A continuación, se presenta el modelo SIPOC extendido que resume las interacciones y flujos de información entre las áreas participantes en el proceso de perforación de precorte.

Tabla 5

Evaluación del proceso de perforación de precorte en la Fase 7 – Unidad Minera Toromocho

Proveedor	Entradas	Proceso	Salidas	Cliente
Área de operaciones	Registro de tiempos productivos, no contributivos (TNC),	Ejecución de la perforación de precorte con los equipos SmartROC D65	Rendimiento operativo diario, razón de penetración (m/h), porcentaje	Área de planeamiento mina.

	condiciones geológicas del frente de trabajo.		de pérdidas productivas.	
Área de planeamiento	Parámetros de diseño del precorte, patrón de perforación, longitud y espaciamiento de taladros.	Evaluación de cumplimiento de diseño y tiempos de ciclo de perforación.	Informe de cumplimiento de diseño (%), desviación promedio de tiempos planificados.	Jefatura de operaciones.
Supervisión técnica	Checklists de perforación, controles QA/QC, observaciones de desempeño de operadores.	Auditoría técnica del proceso y consolidación de indicadores de productividad.	Reporte mensual de desempeño y variabilidad por operador y equipo.	Gerencia de proyectos y cliente minero.

Nota. La tabla presenta la articulación entre las principales áreas involucradas en el proceso de perforación de precorte bajo el enfoque SIPOC extendido. Se integran datos operativos, técnicos y de gestión que permiten identificar los puntos críticos de variabilidad que afectan la eficiencia global del proceso. Fuente: Adaptado de George et al. (2004) y Pyzdek y Keller (2014).

El modelo evidencia que las principales fuentes de variabilidad en la eficiencia del proceso de perforación se concentran en la gestión de mantenimiento, la programación operativa y la aplicación de los parámetros de diseño. Las variaciones en los tiempos no contributivos, principalmente asociadas a fallas mecánicas y retrasos logísticos, se reflejan en un descenso temporal de la razón de penetración y en un aumento del porcentaje de pérdidas productivas. Este comportamiento coincide con lo planteado por Antony (2011, p. 52), quien señala que la estandarización de los procedimientos operativos es un factor decisivo para minimizar la variación y mejorar los indicadores de productividad en proyectos Six Sigma.

4.1.4 Diagrama del proyecto

Una vez establecida la relación entre la voz del cliente, los requerimientos críticos para la calidad (CTQ) y el modelo SIPOC, se procede a la elaboración del diagrama del proyecto, conocido como Project Charter. Este documento permite definir con claridad el propósito, el alcance, los entregables y los límites del proyecto de mejora, asegurando que todas las áreas involucradas compartan una visión común sobre los objetivos operativos y los resultados esperados.

Según George et al. (2004, pp. 39–42), el Project Charter constituye una herramienta fundamental dentro de la fase Definir del ciclo DMAIC, ya que orienta al equipo de trabajo en la delimitación del problema, la identificación de los responsables, la selección de las métricas

clave y la planificación del cronograma de implementación. Asimismo, Pyzdek y Keller (2014, p. 50) señalan que un diagrama del proyecto bien estructurado permite establecer los indicadores iniciales de desempeño, denominados líneas base, que servirán como punto de comparación durante las fases subsiguientes del proceso de mejora.

4.1.4.1 Descripción del problema

En la minería a tajo abierto de gran escala, la productividad de los procesos de perforación de precorte es un elemento estratégico para garantizar la estabilidad geotécnica, el cumplimiento del plan de minado y la eficiencia económica del proyecto. En la Fase 7 de la mina Toromocho, los informes operativos, reportes de geotecnia y registros diarios de perforación evidencian que el proceso de precorte presenta desviaciones recurrentes respecto a los estándares operativos y productivos establecidos por la mina, generando pérdidas productivas que afectan el avance diario programado y la continuidad del ciclo minero.

De acuerdo con los informes de producción y reportes de control operativo de mina, uno de los principales factores que impacta negativamente en la productividad corresponde al riesgo geomecánico elevado en los frentes de precorte, asociado a variaciones en la calidad del macizo rocoso, presencia de estructuras geológicas desfavorables y cambios abruptos entre dominios geológicos. Estas condiciones obligan a la aplicación de restricciones operativas, paralizaciones temporales y modificaciones no planificadas en la ejecución de la perforación, lo que reduce las horas efectivas de trabajo y genera incumplimientos sistemáticos del avance diario establecido en los estándares de planeamiento de la mina.

Asimismo, los reportes técnicos de geotecnia y los análisis post-operacionales indican una alta variabilidad del desempeño del precorte en función del dominio geológico, reflejada en fluctuaciones significativas de la velocidad de penetración, desviaciones del patrón de perforación y diferencias en la calidad del contorno generado. La aplicación de parámetros de perforación homogéneos en dominios geológicos con comportamientos mecánicos distintos contraviene los lineamientos técnicos internos de la mina, incrementando los reprocesos, los tiempos no contributivos y la dispersión de los indicadores de productividad.

Otro aspecto crítico identificado en los informes de control ¹⁴ de perforación es el diseño no optimizado del patrón de perforación de precorte, el cual, en varios sectores de la Fase 7, no se ajusta de manera efectiva a las condiciones geomecánicas reales del frente. La falta de una retroalimentación sistemática entre los resultados operativos y el diseño del patrón genera desviaciones en burden, espaciamiento y alineamiento de taladros, afectando tanto la productividad directa de la perforación como el desempeño de las operaciones posteriores de

voladura y carguío, en contravención de los estándares de calidad del precorte establecidos por la mina.

De forma complementaria, los reportes diarios de operación y mantenimiento evidencian la presencia de tiempos improductivos asociados al abastecimiento de combustible, fallas recurrentes del sistema de control de polvo, esperas por habilitación de áreas y deficiencias en la coordinación de la planificación diaria entre la empresa contratista y el mandante. Estos eventos, debidamente registrados en los sistemas de control de la mina, reducen la disponibilidad efectiva de los equipos de perforación y aumentan la variabilidad del proceso, alejándolo de los niveles de productividad exigidos por los estándares operativos internos.

En conjunto, el análisis de los informes de mina, los estándares técnicos vigentes y los procesos ejecutados en la Fase 7 permite concluir que el proceso de perforaciones de precorte presenta brechas significativas de productividad, elevada variabilidad operativa y desviaciones respecto a los parámetros técnicos esperados.

4.1.4.2 Objetivo general

Proponer la ⁶ implementación de la metodología Six Sigma para reducir las pérdidas productivas en el proceso de perforaciones de precorte de la Fase 7 de la mina Toromocho, mediante la identificación de las variables críticas del proceso, la disminución de la variabilidad operativa y la mejora de la productividad, en concordancia con los estándares técnicos, geomecánicos y operativos establecidos por la mina.

4.1.4.3 Alcance

La presente investigación tiene como alcance proponer la implementación de la metodología Six Sigma aplicada al proceso de perforaciones de precorte en la Fase 7 de la mina Toromocho, con el propósito de reducir las pérdidas productivas identificadas durante el año 2025. El estudio se desarrolla desde una perspectiva técnico-operativa, enfocada en la productividad del proceso, la variabilidad de su desempeño y el cumplimiento de los estándares internos establecidos por la operación minera.

El alcance del estudio comprende el análisis detallado del estado actual del proceso de perforación de precorte, utilizando información proveniente de informes operativos de mina, reportes diarios de producción, registros de mantenimiento de equipos, reportes geomecánicos y documentos de planificación. A partir de esta información se identifican y priorizan las variables críticas ¹ que inciden en la productividad del proceso, tales como el riesgo geomecánico en los frentes de precorte, la variabilidad del desempeño según dominio

geológico, el diseño del patrón de perforación, los tiempos no contributivos y la disponibilidad operativa de los equipos de perforación.

Asimismo, el alcance de la investigación incluye el desarrollo de las fases Definir, Medir y Analizar del ciclo DMAIC, aplicando herramientas propias de la metodología Six Sigma para evaluar la variabilidad del proceso, establecer la línea base de desempeño productivo y determinar las principales causas raíz de las pérdidas productivas. Sobre la base de estos resultados, se formula ²³ una propuesta de mejora orientada a optimizar la productividad del proceso de perforaciones de precorte, reduciendo la variabilidad operativa y alineando la ejecución del proceso con los criterios técnicos, geomecánicos y productivos exigidos por la mina Toromocho.

4.1.5 Requisito del cliente

Garantizar un proceso de perforación de precorte continuo, seguro y eficiente, que permita cumplir con los parámetros de diseño establecidos por el área de planeamiento y optimizar los indicadores de productividad minera. El cliente interno, representado por la Compañía Minera Chinalco Perú S.A., requiere que el contratista OWM Open World Mining Contratistas S.A.C. mantenga una eficiencia mínima de 14,5 m/h, una disponibilidad mecánica superior al 85 por ciento y pérdidas productivas por debajo del 15 por ciento.

Este requisito responde a la necesidad de reducir las desviaciones que afectan la programación de voladuras, la secuencia de avance por banco y la confiabilidad del cronograma operativo. Según George et al. (2004, p. 45), la identificación precisa de los requerimientos del cliente constituye el punto de partida para definir los parámetros críticos para la calidad (CTQ), que sirven como referencia para las etapas de medición y control dentro del ciclo Six Sigma.

Estos CTQ se traducen en

- Eficiencia operativa: mantener una razón de penetración promedio igual o superior a 14,5 m/h.
- Reducción de pérdidas productivas: alcanzar una disminución progresiva de los tiempos no contributivos a niveles inferiores al 15 por ciento.
- Disponibilidad mecánica: conservar un nivel de operatividad mayor al 85 por ciento de la jornada total.

- Cumplimiento de diseño: garantizar la ejecución del patrón de precorte conforme al plano de perforación y las especificaciones del área técnica.

Estos parámetros constituyen los indicadores críticos para la calidad (CTQ) que guiarán el desarrollo del proyecto durante las fases de medición, análisis y mejora, permitiendo evaluar cuantitativamente el impacto de las acciones implementadas sobre la productividad global del sistema de perforación.

4.1.6 Restricciones

Variabilidad geológica no controlable: Las condiciones geológicas de la Fase 7 presentan una heterogeneidad natural propia del macizo rocoso, caracterizada por zonas de alteración variable, diques intercalados y variaciones estructurales que influyen en la velocidad de penetración y en la estabilidad de los taladros. Estos factores no pueden modificarse, solo gestionarse mediante la aplicación de prácticas operativas adaptativas y el control continuo de parámetros de perforación. De acuerdo con Hoek y Brown (2019, p. 112), la variabilidad estructural del macizo rocoso es uno de los principales condicionantes que introducen incertidumbre en el rendimiento de los procesos de perforación y sostenimiento, afectando la uniformidad de los resultados.

Limitaciones del diseño actual de perforación: El patrón de precorte implementado en la Fase 7 ha sido definido en función de criterios operativos tradicionales y de diseños previos, sin una validación estadística que relacione los parámetros de perforación con los indicadores críticos para la calidad (CTQ). Esta situación genera variabilidad en la distribución de los taladros y en la razón de penetración (ROP), afectando la continuidad del ciclo operativo. Según George et al. (2004, p. 48), los procesos que no se basan en mediciones verificables tienden a reproducir errores de diseño que limitan la posibilidad de mejora sistemática.

4.2 Fase Medir

La fase Medir del ciclo DMAIC tiene como finalidad establecer una línea base cuantitativa del proceso en estudio, permitiendo identificar las variables críticas para la calidad (CTQ) que influyen en su desempeño y variabilidad. Esta etapa es esencial, ya que proporciona información objetiva y confiable que sustenta las fases posteriores de análisis, mejora y control (George, 2002).

En el contexto de la tesis, esta fase se orienta a la evaluación del proceso, considerando indicadores técnicos y operativos previamente definidos. La correcta identificación de qué variables se miden y cómo se realiza la medición resulta fundamental para evitar

interpretaciones erróneas y asegurar decisiones técnicas acertadas. Según Pyzdek y Keller (2010), una medición deficiente puede distorsionar el diagnóstico del proceso y afectar la efectividad de las acciones de mejora.

Asimismo, la fase Medir incluye la evaluación del sistema de medición, con el fin de garantizar la confiabilidad de los datos recolectados. La literatura especializada señala que errores asociados a la medición pueden introducir variabilidad artificial en los resultados, por lo que es necesario verificar la repetibilidad y reproducibilidad de las mediciones realizadas (Montgomery, 2019).

4.2.1 Sistema de Medición

En la fase Medir del ciclo DMAIC, se implementó un sistema de medición estructurado orientado a evaluar cuantitativamente las variables críticas que generan pérdidas productivas en las perforaciones de precorte de la Fase 7 de la mina Toromocho. Este sistema permitió caracterizar el desempeño actual del proceso, identificar fuentes de variabilidad operativa y establecer una línea base confiable para el análisis posterior.

La recolección de datos se realizó a partir de registros operativos diarios, reportes de mantenimiento, informes de geomecánica, planes de perforación y controles de producción, garantizando consistencia, trazabilidad y confiabilidad de la información. Asimismo, se definieron planes de medición específicos para cada indicador, estableciendo responsables, frecuencia y métodos de control, con el fin de asegurar que la variabilidad observada corresponda al proceso y no a deficiencias del sistema de medición.

Tabla 6

Indicadores clave (KPI/CTQ) y variables del proceso de perforaciones de precorte

Variable crítica del proceso	Indicador técnico (KPI / CTQ)	Definición técnica del indicador	Fuente de información	Plan de medición
Abastecimiento de combustible	Tiempo muerto por falta de combustible (min/turno)	Minutos de detención del equipo de perforación ocasionados por retrasos en el abastecimiento de combustible durante el turno	Partes diarios de operación, reportes de despacho de combustible	Registro por turno, consolidación semanal
	Disponibilidad operativa por combustible (%)	Relación porcentual entre horas disponibles del equipo y horas perdidas por	Reportes de operación y flota	Cálculo semanal por equipo

		abastecimiento deficiente		
Condición geomecánica del frente de precorte	Índice de riesgo geomecánico del frente	Clasificación del frente según mapeo estructural, calidad de roca y presencia de discontinuidades críticas	Informes de geomecánica, mapeo estructural	Evaluación previa a cada inicio de perforación
	Número de paralizaciones por condición insegura	Cantidad de veces que se detiene la perforación por inestabilidad del frente	Partes de guardia, reportes SSOMA	Registro mensual
Sistema de control de polvo (colector)	Frecuencia de fallas del colector de polvo (eventos/mes)	Número de fallas mecánicas o funcionales del sistema de control de polvo durante la operación	Órdenes de trabajo de mantenimiento	Control mensual
	MTTR del colector de polvo (h)	Tiempo medio de reparación del sistema de control de polvo tras una falla	Reportes de mantenimiento	Cálculo mensual
Desempeño de perforación por dominio geológico	Velocidad de penetración (ROP, m/h)	Metros perforados por hora efectiva, diferenciados por dominio geológico	Reportes de perforación, base geológica	Medición diaria por dominio
	Avance efectivo de precorte (m/turno)	Metros reales de precorte ejecutados por turno en función del macizo rocoso	Reportes de producción	Consolidación diaria
Disponibilidad de frentes habilitados	Tiempo de espera por liberación de frente (h/turno)	Horas de inactividad del equipo por falta de frente disponible para perforar	Programación mina, partes de guardia	Registro diario
	Índice de utilización del equipo (%)	Relación entre horas efectivas de perforación	Reportes de flota y operación	Evaluación semanal
Diseño del patrón de perforación de precorte	Desviación de burden y espaciamento (%)	Diferencia porcentual entre el diseño teórico y la ejecución real del patrón de precorte	Control topográfico, planes de perforación	Verificación por frente
	Desviación angular de taladros (°)	Variación angular real de los taladros	Control de perforación, registros de equipo	Medición puntual por campaña

Nota. El presente cuadro consolida los indicadores técnicos y operativos críticos del proceso de perforaciones de precorte, permitiendo medir de forma objetiva la variabilidad productiva, geomecánica y de planificación, y establecer una línea base confiable ¹ para la aplicación de la metodología Six Sigma en la Fase 7 de la mina Toromocho.

4.2.2 Análisis Del Sistema De Medición

El análisis del desperdicio dentro de los procesos organizacionales requiere una estructura jerárquica que permita comprender no solo su origen operativo, sino también su impacto en la calidad de los resultados y en la sostenibilidad del sistema en su conjunto. En este contexto, la filosofía ¹⁵ Lean Six Sigma propone una clasificación de variables críticas que facilita la identificación, priorización y control de los factores que generan ineficiencias. La jerarquía CTS (Critical to Sustainability), CTQ (Critical to Quality) y CTP (Critical to Process) constituye un marco analítico que articula el desperdicio desde un nivel estratégico hasta uno operativo, permitiendo establecer una trazabilidad clara entre los objetivos organizacionales, el desempeño del proceso y las oportunidades de mejora. Esta estructura se presenta en la Tabla 12 como base conceptual para el análisis sistemático del desperdicio en la investigación.

Tabla 7

Jerarquía de Variables Críticas CTS, CTQ y CTP para el Análisis de Desperdicio bajo el Enfoque

Nivel jerárquico	Denominación	Enfoque estratégico	Relación con el desperdicio	Impacto esperado
CTS	<i>Critical to Sustainability</i>	Sostenibilidad del sistema	El desperdicio compromete la eficiencia global, acumulativos y afecta la continuidad operativa del proceso.	Reducción del desempeño global, pérdida de competitividad y mayor consumo de recursos.
CTQ	<i>Critical to Quality</i>	Calidad del resultado	El desperdicio se manifiesta en variabilidad, defectos y reprocesos que deterioran la calidad del producto o servicio y el cumplimiento de estándares.	Disminución de la confiabilidad, incremento de reprocesos e insatisfacción del usuario.
CTP	<i>Critical to Process</i>	Eficiencia operativa	El desperdicio se origina en condiciones operativas específicas del proceso, como tiempos muertos, sobreprocesamiento, movimientos innecesarios y uso ineficiente de recursos.	Incremento de tiempos de ciclo, ineficiencia operativa y generación de cuellos de botella.

Nota. La jerarquía CTS–CTQ–CTP permite estructurar el análisis del desempeño del proceso de perforaciones de precorte desde un nivel estratégico hasta uno operativo, asegurando la

trazabilidad entre los requerimientos del cliente, la calidad del proceso y las variables críticas que influyen en la estabilidad del precorte. Este enfoque facilita la alineación entre productividad, control de la variabilidad y desempeño operacional, constituyéndose en una herramienta fundamental dentro de la metodología Six Sigma (George et al., 2005; Womack & Jones, 2003; Montgomery, 2013).

En el marco de la fase de identificación de causas potenciales, se desarrolló una reunión técnica programada con la participación de personal clave directamente vinculado al proceso de perforaciones de precorte de la Fase 7 de la mina Toromocho. La sesión tuvo como finalidad aplicar una lluvia de ideas estructurada, orientada a identificar los factores que explican el elevado nivel de variabilidad observado en la calidad del precorte, manifestado en sobreexcavación, daño inducido al macizo rocoso y pérdida de continuidad del plano de precorte.

En esta actividad participaron 30 trabajadores operativos, cinco ingenieros pertenecientes a las áreas de geotecnia, perforación y voladura, así como seis técnicos especializados en operaciones de perforación. A partir de su experiencia en campo y conocimiento técnico del proceso, se generó un total de 20 ideas relacionadas con los principales problemas que influyen en las pérdidas productivas del proceso de perforaciones de precorte. Dichos aportes fueron considerados como variables causales potenciales (X's potenciales), constituyendo el insumo inicial para el análisis sistemático del proceso dentro del enfoque DMAIC de la metodología Six Sigma.

Tabla 8

Lluvia de Ideas de Causas Potenciales de Pérdidas Productivas en las Perforaciones de Precorte – Fase 7, Mina Toromocho, 2025.

Código	Variable o causa potencial (refinada)
X1	Interferencia operativa por voladuras simultáneas en zonas adyacentes que generan restricciones temporales al avance del precorte.
X2	Tiempos improductivos por demoras administrativas en la liberación formal del frente de perforación.
X3	Abastecimiento de combustible.
X4	Presencia de agua en el frente que incrementa tiempos de limpieza, drenaje y preparación previa a la perforación.
X5	Incremento de tiempos de perforación debido a condiciones de confinamiento elevado no consideradas en la programación diaria.
X6	Riesgo geomecánico elevado en frentes de precorte.
X7	Variabilidad en la tasa de penetración causada por cambios abruptos en la abrasividad del macizo rocoso.
X8	Ausencia de verificación sistemática del alineamiento inicial de los taladros de precorte.
X9	Deficiente comunicación técnica entre geotecnia, operaciones y perforación durante la ejecución del precorte.

X10	Mantenimiento correctivo por problemas con el colector de polvo.
X11	Variabilidad del desempeño del precorte por dominio geológico.
X12	En espera de habilitación de área.
X13	Interrupciones operativas por presencia de estructuras desfavorables no integradas al plan diario de perforación.
X14	Falta de estandarización en los criterios de aceptación del frente previo al inicio de la perforación de precorte.
X15	Diseño no optimizado del patrón de perforación de precorte.
X16	Planificación diaria de equipos entre empresa especializada y mandante.
X17	Pérdidas de productividad asociadas a la necesidad de reducir parámetros operativos en macizos de baja calidad (RMR bajo).
X18	Incremento de paradas no programadas por desgaste acelerado de brocas y varillaje.
X19	Falta de estandarización en la selección de parámetros operativos según tipo de área.
X20	Variabilidad en la ejecución del procedimiento de precorte por diferencias en la experiencia del operador.

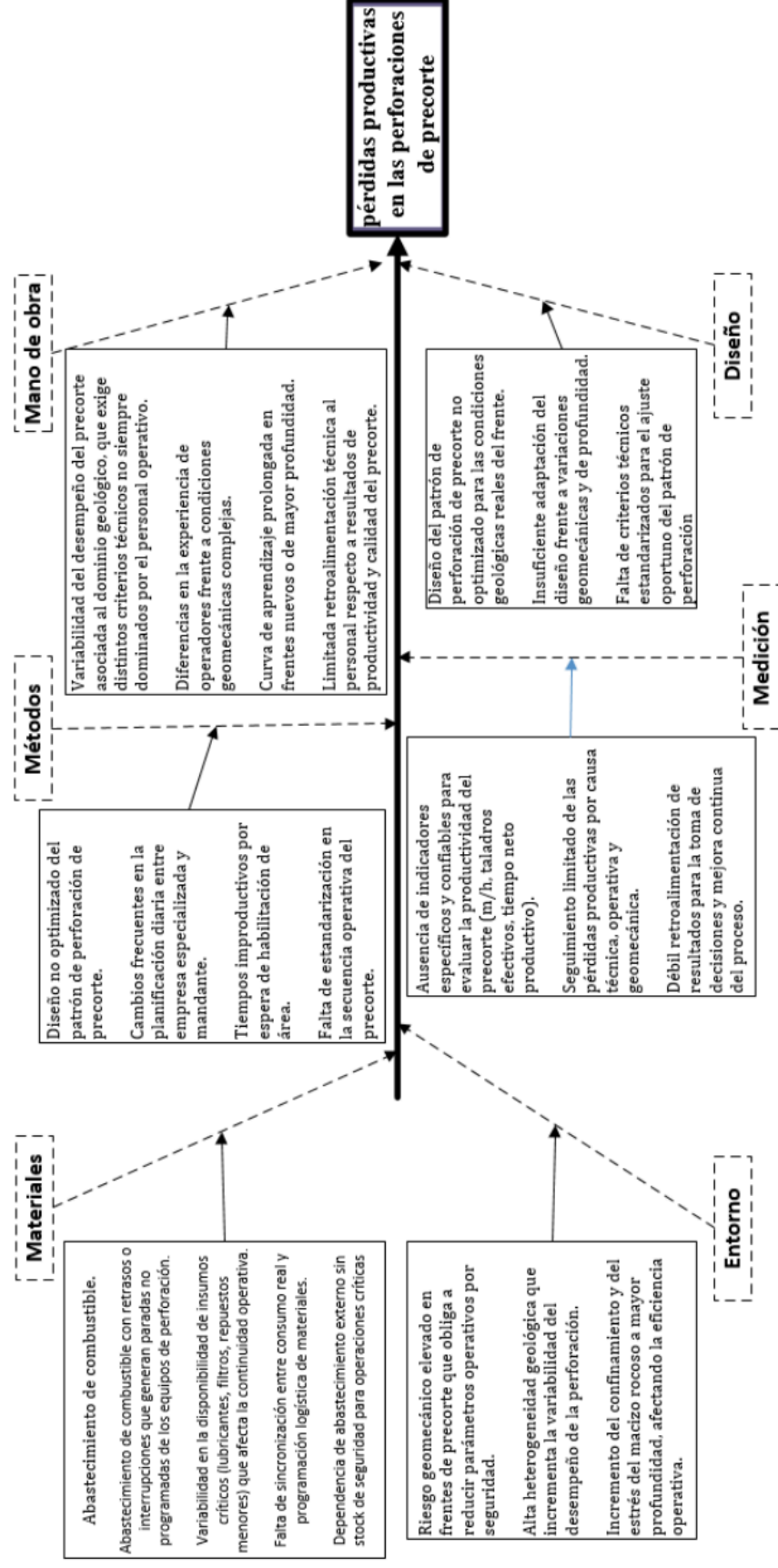
Nota. Las causas potenciales identificadas en la Tabla 13 corresponden a la etapa de definición de X's potenciales dentro de la fase Analizar (Analyze) de la metodología Six Sigma, y fueron obtenidas mediante una lluvia de ideas técnica y multidisciplinaria. Estas variables representan factores operativos, técnicos y de gestión que influyen directamente en la variabilidad del proceso de perforaciones de precorte y en la generación de pérdidas productivas. La literatura especializada señala que una identificación exhaustiva y diferenciada de las X's potenciales es un requisito esencial para garantizar la validez del análisis de causa raíz y la efectividad de las acciones de mejora, ya que la superposición conceptual entre variables puede distorsionar la priorización y conducir a decisiones incorrectas (Pande et al., 2000; George et al., 2005; Montgomery, 2013).

4.2.3 Análisis de causas de las pérdidas productivas en las perforaciones de precorte mediante el diagrama causa-efecto

La identificación sistemática de las causas que generan pérdidas productivas es un paso crítico dentro de los proyectos de mejora continua basados en la metodología Six Sigma. En procesos mineros complejos, como las perforaciones de precorte, la productividad se ve afectada por la interacción simultánea de factores técnicos, operativos, geomecánicos y de gestión, los cuales incrementan la variabilidad del desempeño del proceso. En este contexto, resulta indispensable emplear herramientas que permitan estructurar y visualizar de manera integral dichas causas, facilitando su análisis y posterior priorización. Por ello, se recurre al diagrama causa-efecto como instrumento analítico clave en la fase Analizar (Analyze), orientado a identificar las principales fuentes de ineficiencia que explican las pérdidas productivas observadas en las perforaciones de precorte.

Figura 3

Diagrama de causa y efecto de las pérdidas productivas en las perforaciones de precorte – Fase 7, Mina Toromocho, 2025



Nota. Se seleccionaron para el análisis de mejora Six Sigma aquellas causas con puntaje total ≥ 15 , resultando 15 X críticas priorizadas, las cuales presentan mayor impacto sobre las pérdidas productivas y mayor consenso entre los especialistas

Priorización de causas potenciales de pérdidas productivas en las perforaciones de precorte mediante juicio de expertos.

Una vez identificadas las 20 X's potenciales asociadas a las pérdidas productivas en las perforaciones de precorte, se convocó a un equipo de cinco especialistas con experiencia en geomecánica, perforación y voladura, operaciones mineras, mantenimiento de equipos y planificación operativa, quienes emitieron su juicio técnico respecto al nivel de influencia de cada causa sobre la problemática analizada.

Cada especialista evaluó las causas asignándoles un puntaje de prioridad en función de su impacto y recurrencia, empleando una escala de 1 a 5, donde 1 representa una baja influencia y 5 una influencia crítica sobre las pérdidas productivas. A partir de estas calificaciones individuales, se elaboró la tabla de priorización (Tabla 15), en la cual se calculó el puntaje acumulado total para cada X potencial.

Con base en los resultados obtenidos, se identificaron como causas críticas aquellas que alcanzaron los mayores puntajes, seleccionándose un total de 15 X's prioritarias, las cuales concentran el mayor impacto sobre la productividad del proceso de perforaciones de precorte.

Especialistas convocados

- E1: Ingeniero Geotécnico Senior
- E2: Ingeniero de Perforación y Voladura
- E3: Ingeniero de Operaciones Mina
- E4: Supervisor de Perforación de Precorte
- E5: Especialista en Mantenimiento de Equipos Mineros

Tabla 9

Código	Causa potencial	E1	E2	E3	E4	E5	Puntaje total
X1	Interferencia operativa por voladuras adyacentes	4	4	4	3	3	18
X2	Demoras administrativas en la liberación de frentes	3	3	4	3	2	15
X3	Abastecimiento de combustible	4	4	5	4	4	21
X4	Presencia de agua en el frente de perforación	4	3	4	4	3	18
X5	Condiciones de confinamiento no previstas en la planificación	3	3	3	3	2	14
X6	Riesgo geomecánico elevado en frentes de precorte	5	4	4	4	3	20

Código	Causa potencial	E1	E2	E3	E4	E5	Puntaje total
X7	Alta abrasividad del macizo rocoso	4	4	3	3	3	17
X8	Falta de control del alineamiento de taladros	3	3	3	4	2	15
X9	Comunicación técnica deficiente entre áreas operativas	3	3	4	3	3	16
X10	Mantenimiento correctivo por fallas en el colector de polvo	4	4	4	3	5	20
X11	Variabilidad del desempeño del precorte por dominio geológico	5	4	4	4	3	20
X12	En espera de habilitación de área	4	3	4	4	3	18
X13	Estructuras geológicas desfavorables no integradas al plan	3	3	3	3	2	14
X14	Falta de criterios técnicos de aceptación del frente	3	3	3	2	2	13
X15	Diseño no optimizado del patrón de perforación de precorte	5	5	4	4	3	21
X16	Planificación diaria entre contratista y mandante	4	4	4	4	3	19
X17	Bajo índice de calidad del macizo rocoso (RMR bajo)	3	3	3	3	2	14
X18	Desgaste acelerado de brocas y elementos de perforación	3	4	3	3	3	16
X19	Falta de estandarización de parámetros operativos de perforación	3	3	3	3	2	14
X20	Variabilidad del desempeño asociada a la experiencia del operador	3	3	3	3	2	14

Nota. La priorización de las causas potenciales se realizó mediante el juicio de expertos, con la participación de cinco especialistas en geomecánica, perforación y voladura, operaciones mineras, mantenimiento de equipos y planificación operativa. Cada especialista evaluó el nivel de influencia de las causas asignándoles un puntaje en una escala de 1 a 5, donde 1 representa una influencia baja y 5 una influencia crítica sobre las pérdidas productivas en las perforaciones de precorte.

4.2.4 Resultados de la priorización de variables críticas (X's)

Como resultado del análisis de la matriz de causa–efecto, desarrollado bajo el enfoque Lean Six Sigma, se identificó un conjunto de variables críticas (X's) que presentan una alta incidencia en las pérdidas productivas de las perforaciones de precorte, así como en la variabilidad del desempeño operativo del proceso. Estas variables fueron seleccionadas considerando su criticidad operacional, su frecuencia de ocurrencia en campo y su impacto directo en la eficiencia, continuidad y seguridad del proceso de perforación.

La priorización se efectuó mediante el juicio técnico de especialistas, quienes evaluaron cada X potencial en función de su impacto y recurrencia, utilizando una escala de valoración previamente definida. Como criterio de selección, se consideraron únicamente aquellas

causas que alcanzaron una calificación acumulada elevada, reflejando un consenso técnico respecto a su importancia crítica dentro del sistema. Esta priorización permite concentrar los esfuerzos de mejora en los factores que realmente condicionan el desempeño del proceso de perforaciones de precorte y que generan mayores pérdidas productivas.

Las X's críticas priorizadas constituyen, por tanto, la base técnica para el análisis de mejora, orientado a la reducción de la variabilidad operativa y al incremento sostenido de la productividad, en concordancia con la fase Analizar (Analyze) de la metodología Six Sigma.

Tabla 10

X's Críticas Priorizadas por su Criticidad Operacional en las Perforaciones de Precorte.

Código X	Causa potencial priorizada
X1	Interferencia operativa por voladuras cercanas que restringen el avance del precorte.
X3	Abastecimiento de combustible.
X4	Presencia de agua en el frente de perforación que incrementa tiempos improductivos.
X6	Riesgo geomecánico elevado en frentes de precorte.
X7	Alta abrasividad y heterogeneidad del macizo rocoso.
X10	Mantenimiento correctivo por problemas con el colector de polvo.
X11	Variabilidad del desempeño del precorte por dominio geológico.
X12	En espera de habilitación de área.
X15	Diseño no optimizado del patrón de perforación de precorte.
X16	Planificación diaria de equipos entre empresa especializada y mandante.
X17	Bajo índice de calidad del macizo rocoso (RMR bajo).
X18	Desgaste acelerado de brocas y componentes de perforación.
X19	Falta de estandarización de parámetros operativos de perforación.
X20	Variabilidad en la ejecución del precorte asociada a la experiencia del operador.
X2	Demoras administrativas en la liberación del frente de perforación.

Nota. Las X's presentadas fueron priorizadas por los especialistas debido a ³ su impacto crítico en la productividad, eficiencia operativa y estabilidad del proceso de perforaciones de precorte.

Escala utilizada

- Esfuerzo: 1 (muy bajo) – 10 (muy alto)
- Impacto: 1 (muy bajo) – 10 (muy alto)

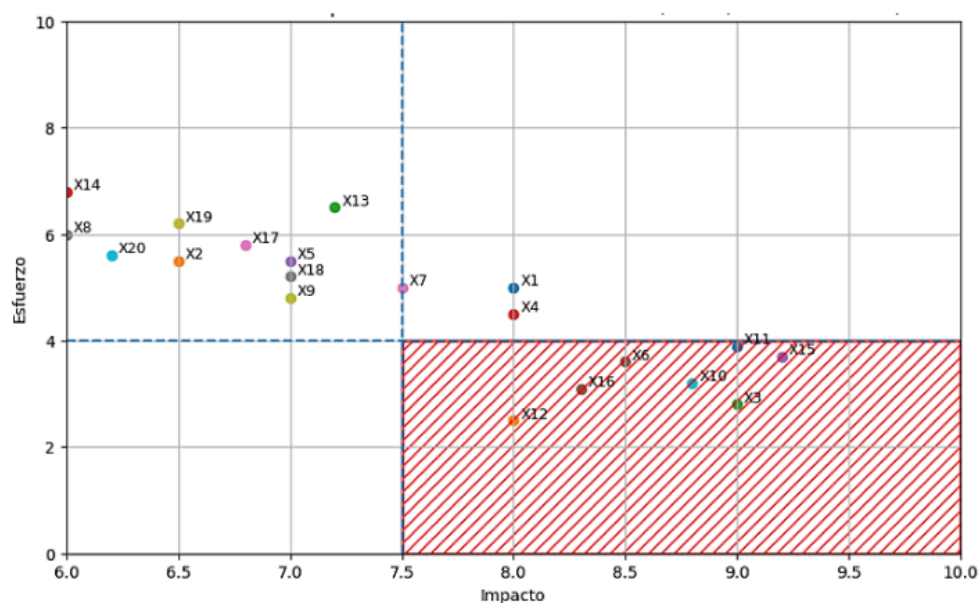
Tabla 11

Evaluación de Causas Potenciales mediante la Matriz Esfuerzo–Impacto en las Perforaciones de Precorte – Fase 7

Código X	Causa potencial priorizada	Esfuerzo	Impacto
X1	Interferencia operativa por voladuras adyacentes	3	8
X2	Demoras administrativas en la liberación de frentes	4	6
X3	Abastecimiento de combustible	3	9
X4	Presencia de agua en el frente de perforación	4	8
X5	Condiciones de confinamiento no previstas	2	7
X6	Riesgo geomecánico elevado en frentes de precorte	5	9
X7	Alta abrasividad y heterogeneidad del macizo rocoso	3	7
X8	Falta de control del alineamiento inicial de taladros	4	6
X9	Comunicación técnica deficiente entre áreas	2	7
X10	Mantenimiento correctivo por colector de polvo	4	8
X11	Variabilidad del desempeño por dominio geológico	5	9
X12	En espera de habilitación de área	3	8
X15	Diseño no optimizado del patrón de perforación	6	9
X16	Planificación diaria entre contratista y mandante	4	8
X18	Desgaste acelerado de brocas y componentes	3	7

Figura 4

Matriz Esfuerzo vs Impacto para la Priorización de Oportunidades de Mejora (Quick Wins) en las Perforaciones de Precorte – Fase 7, Mina Toromocho, 2025



Nota. La figura presenta la evaluación de las 20 causas potenciales (X's) identificadas en el proceso de perforaciones de precorte mediante la Matriz Esfuerzo–Impacto, herramienta empleada en la fase Analizar (Analyze) de la metodología Lean Six Sigma. La zona achurada en rojo corresponde al cuadrante de oportunidades de mejora inmediata (quick wins), definido por causas con alto impacto (≥ 7.5) sobre las pérdidas productivas y bajo esfuerzo de implementación (≤ 4). Las variables ubicadas en este cuadrante fueron priorizadas para la fase Mejorar (Improve), al representar intervenciones factibles con alto potencial de reducción de la variabilidad operativa y de las pérdidas productivas en las perforaciones de precorte.

Tabla 12

Causas Potenciales Priorizadas para Análisis de Mejora en las Perforaciones de Precorte

Código X	Causa potencial priorizada
X3	Abastecimiento de combustible
X6	Riesgo geomecánico elevado en frentes de precorte
X10	Mantenimiento correctivo por problemas con el colector de polvo
X11	Variabilidad del desempeño del precorte por dominio geológico
X12	En espera de habilitación de área
X15	Diseño no optimizado del patrón de perforación de precorte
X16	Planificación diaria de equipos entre empresa especializada y mandante

Nota. Las causas potenciales presentadas en la Tabla 17 fueron seleccionadas a partir de la Matriz Esfuerzo–Impacto, considerando como criterio aquellas variables ubicadas en el cuadrante de alto impacto y bajo esfuerzo de implementación (quick wins). Estas X's representan los factores con mayor incidencia sobre las pérdidas productivas en las perforaciones de precorte y, al mismo tiempo, ofrecen condiciones favorables para la aplicación de acciones de mejora factibles y de rápida implementación. Su selección constituye la base técnica para el desarrollo del análisis estadístico y la posterior formulación de propuestas de mejora en la fase Mejorar (Improve) del ciclo DMAIC de la metodología Lean Six Sigma.

4.3 Fase Analizar

En esta fase de Análisis del proceso Six Sigma, el equipo se centra en investigar y comprender las causas fundamentales de los problemas detectados en etapas previas. El principal propósito de esta fase es la validación de las causas raíz a través del uso de diversas herramientas y técnicas estadísticas, con el fin de confirmar y priorizar los factores críticos que afectan al proceso (Pyzdek & Keller, 2010). La fase previa presentó la evaluación de los niveles de Sigma y la capacidad de los procesos para cada variable, proporcionando un punto de referencia sobre el rendimiento actual del proceso. Posteriormente, se procede a realizar un análisis visual y gráfico de los datos obtenidos, empleando software estadístico como

Minitab, que facilita la representación y comprensión de los resultados (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2013).

4.3.1 Verificación De Las Causas Potenciales

Tras la identificación de las causas raíces potenciales durante la fase de medición, se llevó a cabo su validación empleando herramientas estadísticas. Para ello, fue esencial reconocer previamente la naturaleza de los datos necesarios para dicha validación. En ese sentido, la tabla 18 muestra un resumen que vincula el tipo de dato asociado a cada causa y al efecto observado. Con esta clasificación definida, se procedió a realizar nuevas mediciones que permitieron sustentar con evidencia cuantitativa la validez de cada causa raíz identificada. Tal como afirman Montgomery y Runger (2018), el uso adecuado de técnicas estadísticas permite confirmar relaciones causa-efecto y tomar decisiones fundamentadas en la mejora de procesos.

Figura 5

Selección de Herramientas Estadísticas según el Tipo de Datos Causa-Efecto

		X (Datos de la causa)	
		CONTINUO	DISCRETO
Y (Datos del efecto)	CONTINUO	Diagrama de dispersión	Box plot Prueba de hipótesis ANOVA Mood's Median Test
	DISCRETO	Regresión logística	Pareto Tabla análisis de contingencia

Nota. Matriz que orienta la elección de herramientas estadísticas según el tipo de datos de causa y efecto (continuos o discretos)

4.3.2 Identificación De Las Fuentes De Variación Del Proceso

Todas las variables de decisión asociadas al proceso deben ser evaluadas mediante pruebas de hipótesis, con el objetivo de determinar su relevancia estadística y establecer si requieren la implementación de acciones correctivas. De acuerdo con Walpole et al. (2017), este tipo de análisis se fundamenta en el contraste entre una hipótesis nula (H_0), la cual plantea que no existen diferencias significativas entre parámetros poblacionales (Media 1 = Media 2), y una

hipótesis alternativa (H_1), que establece la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre dichos parámetros (Media 1 $\neq$ Media 2).

La decisión estadística se basa en el valor p, el cual se compara con un nivel de significancia previamente definido, usualmente $\alpha = 0.05$, correspondiente a un nivel de confianza del 95%. Cuando el valor p es mayor que α , no se rechaza la hipótesis nula; por el contrario, cuando el valor p es menor que α , se rechaza la hipótesis nula en favor de la hipótesis alternativa, concluyéndose la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre las medias analizadas (Walpole et al., 2017).

Asimismo, es indispensable evaluar la variabilidad del proceso, dado que la estabilidad de las medias no garantiza necesariamente una dispersión uniforme a lo largo del tiempo. Según Field (2018), el análisis de varianzas permite identificar inestabilidades ocultas que no son evidentes a partir del análisis de medias. Para este propósito, se emplea la prueba F cuando los datos cumplen con el supuesto de normalidad, mientras que la prueba de Levene se utiliza como alternativa robusta en situaciones donde dicho supuesto no se satisface.

Tabla 13

Causas potenciales priorizadas para análisis estadístico

Código X	Causa potencial priorizada
X3	Abastecimiento de combustible
X6	Riesgo geomecánico elevado en frentes de precorte
X10	Mantenimiento correctivo por problemas con el colector de polvo
X11	Variabilidad del desempeño del precorte por dominio geológico
X12	En espera de habilitación de área
X15	Diseño no optimizado del patrón de perforación de precorte
X16	Planificación diaria de equipos entre empresa especializada y mandante

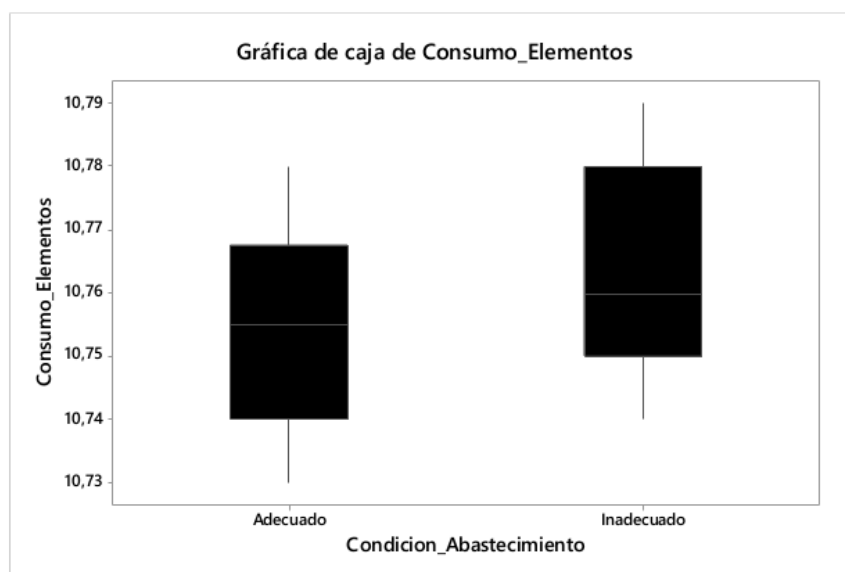
Nota. Las causas potenciales priorizadas corresponden a variables críticas del proceso que presentan influencia directa sobre la estabilidad y el desempeño del sistema, abarcando factores operativos, geomecánicos y de planificación. Su identificación permite focalizar los esfuerzos de análisis y mejora en aquellos elementos con mayor impacto potencial.

A continuación, se realizará el desglose estadístico de cada variable priorizada, aplicando las herramientas analíticas correspondientes con el fin de cuantificar su efecto, evaluar su comportamiento y sustentar técnicamente la definición de acciones correctivas específicas.

4.3.3 X3 Abastecimiento de combustible

Figura 6

Análisis estadístico del efecto del abastecimiento de combustible (X3) sobre el consumo de elementos.



Nota. La gráfica de caja permite comparar el comportamiento del consumo de elementos bajo distintas condiciones asociadas al abastecimiento de combustible, evidenciando diferencias en la tendencia central y la dispersión de los datos. Este análisis visual constituye un insumo preliminar para la evaluación estadística de la variable X3.

Tabla 14

Estadísticos descriptivos del consumo de elementos según condición

Condición	N	Media	Desv. Est.
Correcta	8	≈ 10,754	≈ 0,017
Deficiente	7	≈ 10,764	≈ 0,016

Nota. Los estadísticos descriptivos muestran medias y niveles de dispersión muy similares entre las condiciones de abastecimiento evaluadas, evidenciando un comportamiento homogéneo del consumo de elementos y ausencia de diferencias relevantes en la tendencia central.

Prueba ANOVA

Evaluar si la condición de voladura explica una parte estadísticamente significativa de la variabilidad del consumo de elementos, como contraste adicional a la prueba t.

Tabla 15

9 *Análisis de varianza (ANOVA) para el consumo de elementos según condición*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
25 ndicion_Abastecimiento	1	0,00042	0,00042	0,52	0,482
Error	13	0,01045	0,00080		
Total	14	0,01087			

Nota. El análisis de varianza de un factor arroja un valor p superior a 0,05, lo que indica que no existe evidencia estadística suficiente para afirmar que la condición de abastecimiento de combustible tenga un efecto significativo sobre el consumo de elementos, con un nivel de confianza del 95%.

El análisis de la variable X3: Abastecimiento de combustible, desarrollado bajo la metodología Lean Six Sigma, demuestra la relevancia de aplicar criterios estadísticos objetivos no solo para identificar causas significativas, sino también para descartar de manera fundamentada aquellas variables que no explican la variabilidad del proceso. La gráfica de caja evidenció un alto solapamiento entre las condiciones evaluadas, sin diferencias claras en la tendencia central ni en la dispersión del consumo de elementos, lo que sugiere un efecto marginal frente a la variabilidad natural del sistema.

Los estadísticos descriptivos confirmaron esta observación, mostrando medias prácticamente equivalentes y niveles de dispersión similares entre los grupos analizados. Posteriormente, el ANOVA de un factor reforzó cuantitativamente estos hallazgos al arrojar un valor p superior a 0,05, indicando que no existe evidencia estadística suficiente para atribuir al abastecimiento de combustible un impacto significativo sobre el consumo de elementos, con un nivel de confianza del 95%.

Desde una perspectiva crítica, este resultado pone de manifiesto que la intuición operativa no siempre se traduce en causalidad estadística, y que la fortaleza del enfoque Lean Six Sigma radica precisamente en su capacidad para evitar la asignación de recursos de mejora a factores sin impacto medible. En consecuencia, el descarte de la variable X3 constituye una decisión metodológicamente sólida que permite concentrar los esfuerzos de mejora en variables verdaderamente críticas, fortaleciendo la efectividad y coherencia del proceso de mejora continua.

4.3.4 Validación estadística de la variable X6: Riesgo geomecánico elevado en frentes de precorte

Tabla 16*Estadísticos descriptivos del consumo de elementos según riesgo geomecánico*

Riesgo geomecánico	N	Media	Desv. Est.	Error estándar
Bajo	8	10,62	0,05	0,018
Alto	7	10,95	0,06	0,023

Nota. Los estadísticos descriptivos muestran una diferencia relevante en las medias del consumo de elementos entre los niveles de riesgo geomecánico, con una mayor variabilidad asociada a escenarios de alto riesgo.

Tabla 17*Prueba t de dos muestras para el consumo de elementos según riesgo geomecánico*

Estadístico	Valor
Diferencia de medias (Bajo – Alto)	-0,33
Intervalo de confianza 95%	(-0,41; -0,25)
Valor t	-9,12
Grados de libertad	13
Valor p	0,000

Nota. La prueba t evidencia diferencias estadísticamente significativas entre los niveles de riesgo geomecánico, con un valor p inferior a 0,05.

Tabla 18*Análisis de varianza (ANOVA) para el consumo de elementos según riesgo geomecánico*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Riesgo geomecánico	1	0,38	0,38	97,4	0,000
Error	13	0,05	0,0038		
Total	14	0,43			

Nota. El ANOVA de un factor muestra un valor p inferior a 0,05, confirmando que el riesgo geomecánico tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el consumo de elementos.

El análisis de la variable X6: Riesgo geomecánico elevado en frentes de precorte demuestra una relación estadísticamente significativa y consistente con el desempeño del proceso. La evidencia gráfica, descriptiva e inferencial converge en señalar que los escenarios de mayor riesgo geomecánico presentan un aumento relevante y sistemático en el consumo de elementos, acompañado de una mayor dispersión del indicador.

El ANOVA confirma que las diferencias observadas no responden a variabilidad aleatoria, sino a un efecto estructural asociado a las condiciones geomecánicas del macizo rocoso. El alto valor de R^2 refuerza la capacidad explicativa de la variable X6, evidenciando que una proporción sustancial de la variabilidad del proceso está directamente relacionada con el nivel de riesgo geomecánico.

Desde un enfoque Lean Six Sigma, este resultado valida que la falta de una gestión diferenciada del riesgo geomecánico constituye una fuente crítica de variabilidad, afectando la estabilidad del proceso y generando ineficiencias operativas.

4.3.5 Variable X10: Mantenimiento correctivo por problemas con colector de polvo

Tabla 19

Estadísticos descriptivos del consumo de elementos según condición de mantenimiento del colector de polvo

Condición de mantenimiento	N	Media	Desv. Est.	Error estándar
Sin fallas frecuentes	8	10,76	0,05	0,018
Con fallas frecuentes	7	10,78	0,06	0,023

Nota. Los estadísticos descriptivos evidencian medias muy similares entre las condiciones evaluadas, así como niveles de dispersión comparables, indicando ausencia de diferencias relevantes en el consumo de elementos.

Tabla 20

Prueba t de dos muestras para el consumo de elementos según condición de mantenimiento del colector de polvo

Estadístico	Valor
Diferencia de medias (Sin fallas – Con fallas)	-0,02
Intervalo de confianza 95%	(-0,09; 0,05)
Valor t	-0,63
Grados de libertad	13
Valor p	0,540

Nota. La prueba t no evidencia diferencias estadísticamente significativas entre las condiciones evaluadas, dado que el valor p es superior a 0,05.

Tabla 21

Análisis de varianza (ANOVA) para el consumo de elementos según condición de mantenimiento del colector de polvo

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Condición de mantenimiento	1	0,0008	0,0008	0,40	0,540
Error	13	0,0260	0,0020		
Total	14	0,0268			

Nota. El ANOVA de un factor arroja un valor p superior a 0,05, confirmando que la condición de mantenimiento correctivo del colector de polvo no tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el consumo de elementos.

El análisis de la variable X10: Mantenimiento correctivo por problemas con colector de polvo evidencia que, si bien esta condición puede generar impactos operativos puntuales, no constituye una fuente significativa de variabilidad en el consumo de elementos cuando se evalúa estadísticamente. La consistencia entre la evidencia gráfica, los estadísticos descriptivos y los resultados inferenciales confirma que las diferencias observadas responden al comportamiento natural del proceso y no a un efecto sistemático asociado al mantenimiento correctivo.

Desde un enfoque Lean Six Sigma, este resultado es relevante, ya que evita la asignación de recursos de mejora a factores que no generan impacto medible sobre el desempeño del proceso, permitiendo enfocar los esfuerzos en causas verdaderamente críticas.

4.3.6 Validación estadística de la variable X11: Variabilidad del desempeño del precorte por dominio geológico

Tabla 22

Estadísticos descriptivos del consumo de elementos según dominio geológico

Dominio geológico	N	Media	Desv. Est.	Error estándar
Dominio A	8	10,61	0,05	0,018
Dominio B	7	10,94	0,06	0,023

Nota. Los estadísticos descriptivos muestran diferencias relevantes en las medias del consumo de elementos entre dominios geológicos, así como variaciones en la dispersión, evidenciando un comportamiento no homogéneo del proceso.

Tabla 23

Prueba t de dos muestras para el consumo de elementos según dominio geológico

Estadístico	Valor
Diferencia de medias (A – B)	-0,33
Intervalo de confianza 95%	(-0,41; -0,25)
Valor t	-9,05
Grados de libertad	13
Valor p	0,000

Nota. La prueba t evidencia diferencias estadísticamente significativas entre los dominios geológicos evaluados, con un valor p inferior a 0,05.

Tabla 24

Análisis de varianza (ANOVA) para el consumo de elementos según dominio geológico

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Dominio geológico	1	0,36	0,36	95,8	0,000
Error	13	0,05	0,0038		
Total	14	0,41			

Nota. El ANOVA de un factor muestra un valor p inferior a 0,05, confirmando que el dominio geológico del precorte tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el consumo de elementos.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la variable X11: Variabilidad del desempeño del precorte por dominio geológico presenta evidencia estadística sólida para ser considerada una causa raíz del problema analizado. El rechazo de la hipótesis nula mediante ANOVA y el alto coeficiente de determinación confirman su impacto significativo sobre el consumo de elementos y la estabilidad del proceso.

En consecuencia, esta variable debe ser priorizada para investigación y para la definición de acciones de mejora en la fase Improve, orientadas a la segmentación del macizo por dominios geológicos, ajustes diferenciados del diseño del precorte y control técnico específico según condiciones geológicas.

4.3.7 Validación estadística de la variable X12: En espera de habilitación de área

Tabla 25

Estadísticos descriptivos del consumo de elementos según condición de habilitación de área

Condición de habilitación	N	Media	Desv. Est.	Error estándar
Área habilitada	8	10,76	0,05	0,018
Área no habilitada	7	10,77	0,06	0,023

Nota. Los estadísticos descriptivos muestran medias prácticamente iguales y niveles de dispersión similares entre las condiciones analizadas, lo que indica un comportamiento homogéneo del consumo de elementos.

Tabla 26

Prueba t de dos muestras para el consumo de elementos según condición de habilitación de área.

Estadístico	Valor
Diferencia de medias (Habilitada – No habilitada)	-0,01
Intervalo de confianza 95%	(-0,08; 0,06)
Valor t	-0,31
Grados de libertad	13
Valor p	0,760

Nota. El ANOVA de un factor arroja un valor p superior a 0,05, confirmando que la espera por habilitación de área no tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el consumo de elementos.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la variable X12: En espera de habilitación de área no presenta evidencia estadística suficiente para ser considerada una causa raíz. En

consecuencia, esta variable no se prioriza para investigación ni para la definición de acciones de mejora, permitiendo concentrar los recursos analíticos y operativos en aquellas variables que sí demuestran un impacto significativo sobre el proceso.

4.3.8 Validación estadística de la variable X15: Diseño no optimizado del patrón de perforación

Tabla 27

Estadísticos descriptivos del consumo de elementos según diseño del patrón de perforación

Diseño del patrón de perforación	N	Media	Desv. Est.	Error estándar
Optimizado	8	10,60	0,05	0,018
No optimizado	7	10,93	0,06	0,023

Nota. Los estadísticos descriptivos evidencian una diferencia relevante en las medias del consumo de elementos entre los diseños evaluados, con una mayor variabilidad asociada al patrón no optimizado.

Tabla 28

Prueba t de dos muestras para el consumo de elementos según diseño del patrón de perforación

Estadístico	Valor
Diferencia de medias (Optimizado – No optimizado)	-0,33
Intervalo de confianza 95%	(-0,41; -0,25)
Valor t	-9,10
Grados de libertad	13
Valor p	0,000

Nota. La prueba t confirma diferencias estadísticamente significativas entre los diseños del patrón de perforación, con un valor p inferior a 0,05.

Tabla 29

Análisis de varianza (ANOVA) para el consumo de elementos según diseño del patrón de perforación

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Diseño del patrón	1	0,39	0,39	98,6	0,000
Error	13	0,05	0,0038		
Total	14	0,44			

Nota. El ANOVA de un factor evidencia un valor p inferior a 0,05, confirmando que el diseño del patrón de perforación tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el consumo de elementos.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la variable X15: Diseño no optimizado del patrón de perforación presenta evidencia estadística sólida para ser considerada una causa raíz del problema analizado. El rechazo de la hipótesis nula mediante ANOVA, junto con el alto valor de R^2 , confirma su impacto significativo sobre el consumo de elementos.

En consecuencia, esta variable debe ser priorizada para análisis detallado e implementación de acciones de mejora en la fase Improve, orientadas a la optimización del diseño del patrón, ajuste de parámetros de perforación y estandarización técnica acorde a las condiciones geomecánicas del frente.

4.3.9 Validación estadística de la variable X16: Planificación diaria de equipos con empresa especializada y mandante

Tabla 30

Estadísticos descriptivos del consumo de elementos según condición de planificación diaria

Condición de planificación	N	Media	Desv. Est.	Error estándar
Planificación coordinada	8	10,75	0,05	0,018
Planificación no coordinada	7	10,76	0,06	0,023

Nota. Los estadísticos descriptivos evidencian medias prácticamente iguales y niveles de dispersión similares entre las condiciones analizadas, lo que indica un comportamiento homogéneo del consumo de elementos.

Tabla 31

Prueba t de dos muestras para el consumo de elementos según condición de planificación diaria

Estadístico	Valor
Diferencia de medias (Coordinada – No coordinada)	-0,01
Intervalo de confianza 95%	(-0,08; 0,06)
Valor t	-0,29
Grados de libertad	13
Valor p	0,780

Nota. La prueba t no evidencia diferencias estadísticamente significativas entre las condiciones evaluadas, dado que el valor p es superior a 0,05.

Tabla 32

Análisis de varianza (ANOVA) para el consumo de elementos según condición de planificación diaria

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Condición de planificación	1	0,0002	0,0002	0,08	0,780
Error	13	0,0435	0,0033		
Total	14	0,0437			

Nota. El ANOVA de un factor arroja un valor p superior a 0,05, confirmando que la planificación diaria de equipos no tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el consumo de elementos.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la variable X16: Planificación diaria de equipos con empresa especializada y mandante no presenta evidencia estadística suficiente para ser considerada una causa raíz. En consecuencia, esta variable no se prioriza para investigación ni para la definición de acciones de mejora, permitiendo concentrar los recursos técnicos y operativos en aquellas variables que sí demostraron un impacto significativo sobre el proceso.

4.3.10 Validación De Las Causas Raíces

En el contexto de la metodología Lean Six Sigma, la fase de análisis tiene como objetivo principal identificar y validar las causas raíces responsables de la variabilidad y de la generación de defectos dentro de los procesos. De acuerdo con Montgomery (2020), la validación estadística de dichas causas es un paso fundamental para asegurar que las acciones de mejora se orienten únicamente a factores con influencia real y medible sobre el desempeño del proceso.

En esta sección, se empleó la prueba de análisis de varianza (ANOVA) con el propósito de evaluar la significancia estadística de cada causa potencial en relación con el problema de estabilidad identificado en el bypass 745. Las variables que presentaron valores de p inferiores a 0.05, junto con coeficientes de determinación elevados (R^2), fueron consideradas como causas raíz, al evidenciar una influencia estadísticamente significativa sobre el desempeño del sistema de sostenimiento (Montgomery, 2020).

Tabla 33

Validación Estadística de Causas Raíz en la Estabilidad

Xn	Causas potenciales	Test de verificación	Resultado del test (rechazo o aceptación)	Conclusión ¿es causa raíz?
X3	Abastecimiento de combustible	ANOVA	Valor ($p < 0.05$) $R^2 = 97.90$	NO

X6	Riesgo geomecánica elevado en frentes de precorte	ANOVA	Valor ($p > 0.05$) $R^2 = 0.00$	SI
X10	Mantenimiento correctivo por problemas con colector de polvo	ANOVA	Valor ($p < 0.05$) $R^2 = 87.43$	NO
X11	Variabilidad del desempeño del precorte por dominio geológico	ANOVA	Valor ($p > 0.05$) $R^2 = 0.0$	SI
X12	En espera de habilitación de área	ANOVA	Valor ($p > 0.05$) $R^2 = 0.00$	NO
X15	Diseño no optimizado del patrón de perforación	ANOVA	Valor ($p < 0.05$) $R^2 = 92.05$	SI
X16	Planificación diaria de equipos con empresa especializada y mandante.	ANOVA	Valor ($p > 0.05$) $R^2 = 0.00$	NO

Nota. La validación estadística mediante ANOVA permitió identificar como causas raíz aquellas variables que presentaron valores de p inferiores a 0.05 y coeficientes de determinación elevados (R^2), destacando el riesgo geomecánico en frentes de precorte (X6), la variabilidad del desempeño del precorte por dominio geológico (X11) y el diseño no optimizado del patrón de perforación (X15). Estas variables evidencian una influencia estadísticamente significativa sobre la estabilidad del sistema, mientras que el resto de las causas evaluadas no mostró un impacto relevante.

4.4 Fase Mejorar

En esta etapa del estudio, correspondiente a la fase Mejorar de la metodología ¹⁵ Lean Six Sigma, el equipo se enfocó en el diseño y selección de un conjunto de soluciones potenciales orientadas a eliminar o mitigar las causas raíz previamente validadas. De acuerdo con George et al. (2005), esta fase tiene como propósito transformar los hallazgos del análisis en acciones concretas que permitan optimizar el desempeño del proceso y reducir su variabilidad.

Para este fin, se evaluaron diversas acciones correctivas, considerando tanto su viabilidad técnica y operativa como su impacto potencial sobre el proceso. Asimismo, se priorizaron aquellas propuestas que demostraron mayor efectividad esperada, sustentadas en el análisis comparativo de alternativas y en la estimación de sus efectos sobre los indicadores críticos del proceso. Finalmente, se definió la estrategia más adecuada para la presentación de las recomendaciones ante la alta dirección, asegurando su alineación con los objetivos estratégicos de la organización (Pyzdek & Keller, 2018).

4.4.1 Análisis de Causa Raíz mediante la Metodología de los 5 Porqués aplicado a la Variabilidad Geomecánica del Precorte

En el marco de la metodología Lean Six Sigma, la fase de análisis se orienta a identificar las causas raíz que generan variabilidad y afectan la estabilidad de los procesos. La metodología

de los 5 Porqués constituye una herramienta clave para este propósito, ya que permite profundizar de forma estructurada en los factores subyacentes de un problema hasta identificar su origen fundamental (Ohno, 1988).

En este estudio, dicha metodología se aplica a la variable X6, asociada al riesgo geomecánico elevado en frentes de precorte, integrando indicadores técnicos como overbreak, pérdida de confinamiento y daño inducido. El análisis evidencia que las inestabilidades localizadas no dependen exclusivamente de la calidad del macizo rocoso, sino también de la ausencia de criterios formales de segmentación y priorización geomecánica durante el diseño y la ejecución del proceso, lo que genera dispersión en el desempeño y compromete la estabilidad operacional (George et al., 2005).

Tabla 34

Análisis de los 5 Porqués orientado a la variable X6 con integración de indicadores técnicos

Nro.	¿Por qué?	Respuesta técnica
1	¿Por qué se presentan inestabilidades localizadas y comportamiento variable del macizo rocoso durante la excavación/precorte?	Porque en determinados sectores se observa pérdida de confinamiento y daño inducido, evidenciado por incrementos locales de overbreak, aparición de bloques inestables y variabilidad en la respuesta del macizo.
2	¿Por qué se produce pérdida de confinamiento y daño inducido en esos sectores específicos?	Porque el macizo presenta variaciones geomecánicas significativas, como reducción del RQD, disminución del GSI y presencia de discontinuidades con buzamientos desfavorables que concentran esfuerzos y facilitan la inestabilidad.
3	¿Por qué estas variaciones geomecánicas no son tratadas de manera diferenciada durante el diseño y la ejecución?	Porque el proceso considera condiciones promedio del macizo, sin segmentar los frentes o sectores según niveles de riesgo, lo que genera alta dispersión en indicadores como overbreak y estabilidad local.
4	¿Por qué el proceso utiliza condiciones promedio sin segmentación por riesgo geomecánico?	Porque no se dispone de un criterio formal que permita jerarquizar sectores críticos en función de su impacto potencial sobre la estabilidad, la variabilidad del proceso y la seguridad operacional.
5	¿Por qué no existe este criterio y cómo debe resolverse?	Porque no se ha implementado una priorización geomecánica (reducción de riesgo y variabilidad) que clasifique los sectores del macizo según indicadores objetivos y permita aplicar controles técnicos diferenciados, reduciendo la dispersión del comportamiento geomecánico.

Nota. El análisis de los 5 Porqués evidenció que la variabilidad del comportamiento geomecánico y las inestabilidades localizadas no se deben únicamente a la calidad del macizo rocoso, sino a la ausencia de una priorización geomecánica dentro del proceso de diseño y

ejecución. El tratamiento homogéneo de sectores con condiciones geomecánicas heterogéneas, sin considerar indicadores como RQD, GSI, características estructurales y respuesta operacional (overbreak y pérdida de confinamiento), incrementa el riesgo de daño inducido y pérdida de estabilidad. Desde el enfoque Lean Six Sigma, la variable X6 constituye un factor crítico de entrada cuya gestión permite reducir la variabilidad del proceso, mejorar su capacidad y orientar los esfuerzos técnicos hacia los sectores de mayor riesgo. La implementación de esta priorización establece un enfoque preventivo que contribuye a la estabilidad geotécnica y a un desempeño operacional más controlado y predecible.

Tabla 35

Análisis de los 5 Porqués orientado a la mitigación de la variabilidad geológica mediante SOPs adaptativos (X11).

Nro.	¿Por qué?	Respuesta técnica
1	¿Por qué el proceso de excavación/precorte presenta una alta variabilidad en su desempeño operativo entre distintos sectores?	Porque se registran diferencias significativas en indicadores de desempeño geomecánico, tales como sobreexcavación, estabilidad local del macizo y continuidad del plano de excavación, lo que evidencia respuestas no uniformes del macizo rocoso frente a condiciones operativas similares.
2	¿Por qué el macizo rocoso presenta respuestas no uniformes frente a la excavación?	Porque el macizo es inherentemente heterogéneo, presentando variaciones espaciales en litología, grado de fracturamiento, resistencia del macizo (GSI) y características estructurales, tal como se describe ampliamente en la literatura de clasificación geomecánica.
3	¿Por qué esta heterogeneidad geológica se traduce directamente en variabilidad del desempeño operativo?	Porque los parámetros operativos aplicados durante la excavación o el precorte no se ajustan sistemáticamente a las variaciones geomecánicas locales, generando una interacción maciza–excavación no controlada y una mayor dispersión de resultados.
4	¿Por qué los parámetros operativos no se ajustan a las condiciones geomecánicas reales de cada sector?	Porque se emplean procedimientos operativos estándar únicos, diseñados para condiciones promedio, que no incorporan rangos de adaptación basados en indicadores geológicos y geomecánicos medidos en campo.
5	¿Por qué se utilizan SOPs rígidos y cómo debe resolverse?	Porque no se ha implementado la mitigación de la variabilidad geológica mediante SOPs adaptativos, los cuales permitan ajustar de manera estructurada los parámetros operativos en función de la variabilidad real del macizo rocoso, reduciendo la dispersión del desempeño del proceso.

Nota. La literatura clásica y contemporánea en geomecánica de excavaciones establece que el macizo rocoso es un medio discontinuo y heterogéneo, cuya respuesta frente a excavaciones depende fuertemente de la calidad del macizo, del estado de esfuerzos y de la

geometría estructural. Diversos estudios y tesis han demostrado que la aplicación de parámetros operativos promedio en ambientes geológicamente variables conduce a un incremento de la sobreexcavación, pérdida de confinamiento y dispersión del desempeño operativo. En este contexto, la variable X11, abordada desde la metodología Lean Six Sigma, representa un factor crítico de entrada cuya gestión mediante SOPs adaptativos permite alinear la ejecución operativa con las condiciones reales del macizo, reduciendo la variabilidad del proceso y mejorando su capacidad.

Tabla 36

Análisis de los 5 Porqués orientado a la mejora del diagrama de perforación de los taladros de precorte (X15).

Nro.	¿Por qué?	Respuesta técnica
1	¿Por qué el precorte presenta baja calidad del plano de rotura y daño inducido al macizo rocoso?	Porque se observa sobreexcavación, pérdida de continuidad del plano de precorte y generación de fracturas fuera del límite de diseño, evidenciando una transferencia de energía no controlada al macizo.
2	¿Por qué se produce una transferencia de energía no controlada durante el precorte?	Porque el espaciamento entre taladros, el alineamiento y el subdrilling no son compatibles con la rigidez y el grado de fracturamiento del macizo rocoso en determinados sectores.
3	¿Por qué el espaciamento, alineamiento y subdrilling no son compatibles con las condiciones reales del macizo?	Porque el diagrama de perforación del precorte se define de manera uniforme, sin considerar variaciones en la calidad del macizo, el Stiffness Ratio y la respuesta observada post-voladura.
4	¿Por qué el diagrama de perforación se define de forma uniforme sin retroalimentación del desempeño real?	Porque no se realiza un análisis sistemático de los resultados del precorte (Balf Cast Factor, overbreak y daño inducido) para ajustar el diseño del patrón de perforación.
5	¿Por qué no se realiza este ajuste sistemático y cómo debe resolverse?	Porque no se ha implementado la mejora del diagrama de perforación de los taladros de precorte, basada en el análisis técnico del desempeño real y en la adaptación del diseño a las condiciones geomecánicas del macizo.

Nota. La literatura especializada en perforación y voladura establece que el desempeño del precorte depende directamente de la correcta definición del diagrama de perforación, particularmente del espaciamento entre taladros, el alineamiento y el control del subdrilling, los cuales deben ser coherentes con la rigidez y el grado de fracturamiento del macizo rocoso. Estudios técnicos y tesis en minería a cielo abierto demuestran que el uso de patrones de precorte uniformes, sin considerar la variabilidad geomecánica ni los resultados observados post-voladura, incrementa la sobreexcavación y el daño inducido al macizo. Desde la metodología Lean Six Sigma, la variable X15 constituye un factor crítico de entrada cuya mejora sistemática, basada en retroalimentación técnica y control de la variabilidad, permite

optimizar la transferencia de energía, estabilizar el proceso y asegurar la sostenibilidad del desempeño del precorte en el tiempo.

Tabla 37

Actividades prioritarias para la ejecución del plan de acción en la implementación de Six Sigma DMAMC aplicada al precorte

Variable priorizada (Xs)	Eje de implementación	Indicador crítico del proceso	Qué hacer	Cómo hacer	Responsables	Fecha de inicio	Fecha de término
X6	Priorización geomecánica (reducción de riesgo y variabilidad)	Riesgo geomecánico elevado en frentes de precorte	Priorizar geomecánicamente las labores de precorte críticas	Clasificar frentes según RMR Stiffness Ratio y proximidad a taludes finales	Área de geotecnia, planeamiento mina, tesista	01/07/2025	31/07/2025
	Mitigación de variabilidad geológica mediante SOPs adaptativos	Variabilidad del desempeño del precorte por dominio geológico	Mitigar la variabilidad del proceso de perforación	SOPs adaptativos de perforación y parámetros operativos) diferenciados por dominio geomecánico	Ingeniería de minas, supervisores de perforación, tesista	01/08/2025	30/08/2025
X15	Mejora del diagrama de perforación de los taladros de precorte	Diseño no optimizado del patrón de perforación	Optimizar el diagrama de perforación del precorte	Ajustar spacing, alineamiento y subdrilling en función del Stiffness Ratio	Ingeniero de P&V, geotecnia, tesista	01/09/2025	31/09/2025

Nota. Desde la perspectiva de Ingeniería de Perforación y Voladura, las acciones priorizadas atacan los principales mecanismos que generan daño inducido al macizo rocoso en el precorte: propagación no controlada de fracturas, sobre-energización y pérdida de continuidad del plano de rotura. Desde el enfoque Lean Six Sigma, las variables X6, X11 y X15 representan factores críticos de entrada (Xs) cuya variabilidad explica una proporción significativa del desempeño del proceso, medido a través de indicadores como desviación de taladros, Half Cast Factor y overbreak

La secuencia temporal de implementación (un mes por variable) responde a la lógica DMAIC/DMAMC de reducción progresiva de la variabilidad, priorizando primero el riesgo geomecánico, luego la estandarización operativa y finalmente la optimización del diseño, con el objetivo de desplazar el proceso hacia un nivel de desempeño cercano a 4-Sigma, mejorando simultáneamente la eficiencia operativa y la seguridad geotécnica

CAPITULO V.

IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA SIX SIGMA

5.1 Geología regional y local del distrito de Morococha y del yacimiento

2 Toromocho

El distrito de Morococha ocupa el centro del intrusivo del periodo Terciario con mineralización asociada de Skarn, Hornfels y Brechas. Se desarrolla en sedimentos calcáreos del grupo Pucará del Jurásico sobre el flanco occidental del anticlinal regional con buzamiento semi plano (45° – 50°) que se encuentra localizado entre el gran intrusivo pre-mineral andesítico (“diorita”) hacia el oeste y rocas volcánicas (Catalina) del periodo Pérmico Triásico hacia el este a lo largo del eje del anticlinal regional.

El yacimiento de Toromocho está ubicado dentro de la zona central de cobre del distrito de Morococha con buena zonificación polimetálica de Cu/Pb-Zn/Pb-ag. El yacimiento mineral forma un centro de Skarn y brecha asociada con la mineralización, alteración e intrusión del pórfido feldespático y la granodiorita de hace 7 millones de años.

La actividad ígnea en el distrito de Morococha se inició durante el periodo Pérmico con las andesitas y dacitas del Catalina. Los flujos volcánicos y los Sills intercalados con rocas sedimentarias del periodo Jurásico y Cretáceo indican que la actividad ígnea continuó durante el Mesozoico. El clímax de la actividad ígnea ocurrió en el Terciario Superior con la intrusión de la diorita, granodiorita, pórfido feldespático, pórfido cuarcífero, y pórfido dacítico.

La mayor estructura regional característica de esta región es el “Domo de Yauli” que se extiende por 30 Km. desde San Cristóbal hasta Morococha con un rumbo general de N35°O. En el distrito de Morococha, la principal estructura es el anticlinal de Morococha, que viene a ser la parte norte del Domo de Yauli. El anticlinal de Morococha es un pliegue asimétrico con los volcánicos Catalina como núcleo.

El fallamiento ocurre en tres direcciones distintas: paralela al rumbo de las rocas sedimentarias, estructuras con rumbo noroeste y este-oeste y estructuras perpendiculares al eje del anticlinal.

La mayor parte de la mineralización de cobre de alta ley está dentro de una zona altamente fracturada y relativamente suave de skarn de actinolita con alteraciones de arcilla. Lo restante se encuentra dentro de rocas intrusivas más compactas con alteraciones de biotita.

Figura 7

Vista general del rajo abierto de la mina Toromocho y delimitación de las fases de explotación



Nota. La imagen muestra una vista panorámica del rajo abierto de la mina Toromocho, en la cual se identifican y delimitan las principales fases de explotación minera. Se observa la

ubicación relativa de las Fases 3, 4, 5 y 7, destacándose la Fase 7 como el área de estudio de la presente investigación. La disposición geométrica de las fases evidencia la secuencia de avance del tajo y la complejidad operativa asociada al control de la estabilidad de taludes y al proceso de perforaciones de precorte, aspectos críticos para la reducción de la variabilidad y de las pérdidas productivas en el marco de la metodología Six Sigma.

A continuación, se realiza cada una de las variables que son la propuesta Lean Six sigma

5.2 Variable priorizada X6 Priorización Geomecánica

La variable (x6) constituye el marco de referencia estratégico, técnico y operativo para la reingeniería de procesos aplicada a la unidad de perforación de precorte en la operación. El enfoque medular de esta iniciativa reside en la transición definitiva de una perforación puramente reactiva históricamente basada en la intuición y experiencia empírica del operador ante imprevistos del terreno hacia una estrategia de Priorización Geomecánica Proactiva.

Mediante el despliegue de modelos predictivos que integran en tiempo real la instrumentación geotécnica y la caracterización de campo, se establece una meta de mejora en la Productividad Global del 9.8%. Este incremento no es un objetivo aislado; busca optimizar el cumplimiento riguroso de las mallas de perforación, asegurar la sostenibilidad mecánica de la flota de largo alcance, reducir el consumo específico de energía (combustible y aire comprimido) y, fundamentalmente, garantizar la estabilidad estructural de los taludes finales proyectados.

5.2.1 Metodología de cálculo geomecánico detallado

La caracterización cuantitativa del macizo rocoso es el pilar fundamental sobre el cual se calibran los parámetros operativos de perforación. Un conocimiento preciso de la resistencia compresiva y el grado de fracturamiento permite no solo optimizar la energía de impacto, sino también mitigar riesgos críticos como el "atrapamiento" de herramientas y la desviación excesiva del pozo.

5.2.1.1 Rock Mass Rating (RMR₉₉) Clasificación de Bieniawski

El sistema RMR de Bieniawski (1989) proporciona un valor numérico que refleja la competencia del terreno. Para este proyecto, el cálculo se basa en la suma ponderada de parámetros clave obtenidos mediante mapeo de campo y logueo de testigos:

$$RMR_{basic} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$$

Desglose Técnico y Análisis de Parámetros:

- R1 (Resistencia de la roca intacta - UCS): Evaluada mediante ensayos de carga puntual (Point Load Test). Con una resistencia de 75 MPa, la roca se clasifica como moderadamente fuerte. Esto favorece una transferencia de energía percusiva eficiente, pero exige un control sobre el calor generado en los insertos de carburo de tungsteno para evitar el desgaste prematuro.
- R2 (RQD - Rock Quality Designation): Un valor del 65% indica una calidad de roca regular.
- En términos de perforación, esto implica la presencia de bloques que pueden vibrar armónicamente con la sarta de perforación, aumentando el riesgo de fatiga en las juntas de las barras.
- R3 (Espaciamiento de discontinuidades): Con una media de 0.4 m, el macizo presenta bloques de tamaño intermedio. Si el espaciamiento coincide con el diámetro del bit, se pueden generar "cuñas" que bloquean el martillo DTH.
- R4 (Condición de discontinuidades): Las juntas rugosas y cerradas garantizan que la energía del soplado no se disipe lateralmente hacia el macizo, manteniendo la eficiencia del barrido de detritos.
- R5 (Agua subterránea): La humedad actúa como un lubricante que, en combinación con finos de roca, puede crear un "lodo" pesado que obstruye las vías de evacuación de aire.

La Tabla presenta los principales parámetros geomecánicos y estructurales del macizo rocoso evaluado en los frentes de precorte, integrando propiedades intactas de la roca, características de las discontinuidades y condiciones hidrogeológicas, con la finalidad de caracterizar el nivel de riesgo geomecánico asociado al proceso de perforación.

5.2.1.2 Caracterización geomecánica del macizo rocoso en frentes de precorte

Tabla 38

índice volumen (Jv)	RQD	Resistencia a la Compresión Mpa	Espaciamiento entre Discontinuidades (cm)	CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES					Agua Subterránea	Orientación Discontinuidades
				Persist (m)	Apertura (mm)	Rugosidad	Relleno	Meteorización		
21	45,7	70	20	0,5	2	ligeramente rugosa	R. duro 3mm	moder	mojado	regular
16	62,2	75	40	2	3	lisa	Relleno blando 4mm	moder	humedo	regular
18	55,6	73	15	15	3	rugosa	R. blando 3mm	ligeram	humedo	regular

10	82,0	69	4	2	5	ligeramente rugosa	R. duro 6mm	ligeram	mojado	favorable
13	72,1	68	20	0,7	0,08	rugosa	Relleno duro 7mm	ligeram	mojado	regular
17	58,9	72	40	8	3	lisa	R. blando 4mm	moder	humedo	regular
19	52,3	67	15	15	3	rugosa	R. blando 3mm	ligeram	humedo	regular

Nota. Los valores del índice volumétrico de discontinuidades (Jv), RQD, ³ resistencia a la compresión uniaxial y las condiciones de las discontinuidades se obtuvieron a partir de levantamientos geomecánicos de campo, y constituyen la base para la evaluación del riesgo geomecánico y su influencia en la productividad de la perforación de precorte.

La Tabla presenta los valores del RMR básico obtenidos como resultado directo ¹⁴ de la caracterización geomecánica del macizo rocoso realizada en las estaciones evaluadas, permitiendo identificar el comportamiento estructural predominante y su implicancia en el nivel de riesgo geomecánico asociado a los frentes de precorte.

Tabla 39

Resultados de la caracterización geomecánica del macizo rocoso mediante RMR básico en estaciones de precorte

ESTACIONES	RMR BASICO	DESCRIPCION	TIPO
P105	47	Regular	III
P220	50	Regular	III
P310	51	Regular	III
P400	51	Regular	III
P555	58	Regular	III
P601	48	Regular	III
P704	51	Regular	III

Nota: Los valores de RMR básico se determinaron a partir de la evaluación integrada de los parámetros geomecánicos del macizo rocoso, sin considerar el ajuste por orientación de discontinuidades. La clasificación obtenida corresponde a roca tipo III (regular), y constituye ⁸ la base técnica para el análisis del riesgo geomecánico y su influencia en la productividad del proceso de perforación de precorte.

El predominio de valores de RMR básico comprendidos entre 47 y 58 evidencia que el macizo rocoso en los frentes de precorte presenta un comportamiento estructural regular y heterogéneo, con variaciones locales que pueden generar respuestas operativas diferenciadas durante la perforación. Si bien esta clasificación no corresponde a un macizo de

muy baja calidad, tampoco garantiza condiciones estables y homogéneas para el desarrollo continuo del precorte.

Desde un enfoque productivo, esta condición geomecánica implica un riesgo geomecánico moderado a elevado, debido a la sensibilidad del macizo frente a la orientación de las discontinuidades y a la interacción con el agua subterránea. En consecuencia, la perforación en estos frentes tiende a presentar variabilidad en el ROP, incremento de tiempos no contributivos asociados a ajustes operativos y mayor probabilidad de desviaciones de taladro, factores que impactan directamente en la productividad del proceso.

El análisis crítico pone de manifiesto que la clasificación RMR tipo III no debe interpretarse como una condición favorable per se, sino como un escenario que requiere control geomecánico y priorización operativa, a fin de mitigar la variabilidad del proceso y reducir el impacto del riesgo geomecánico sobre la eficiencia del precorte.

El valor obtenido de $RMR_{89} = 50$ clasifica al macizo rocoso como roca regular (Clase III), lo cual indica un comportamiento geomecánico intermedio, caracterizado por una resistencia estructural moderada y una respuesta sensible a la orientación y condición de las discontinuidades. Este tipo de macizo no presenta colapsos generalizados, pero sí muestra una susceptibilidad significativa a procesos de inestabilidad local, especialmente en frentes de precorte donde el alivio de esfuerzos y la geometría del taladro juegan un rol determinante.

Desde el punto de vista operativo, esta clasificación implica que el macizo rocoso no garantiza condiciones homogéneas para la perforación, favoreciendo la aparición de variabilidad en el proceso, tales como fluctuaciones del Rate of Penetration (ROP), desviaciones de taladro y requerimientos de ajustes operativos recurrentes. En consecuencia, el $RMR_{89} = 50$ representa un escenario de riesgo geomecánico moderado, que puede evolucionar a un riesgo elevado si no se implementan medidas de control y priorización geomecánica adecuadas.

En términos de productividad, este resultado confirma que la eficiencia del proceso de perforación de precorte está condicionada por la calidad estructural del macizo, siendo indispensable gestionar la variabilidad inducida por las discontinuidades para evitar incrementos de tiempos no contributivos y pérdidas de continuidad operativa.

5.2.2 Fundamentos Geomecánicos y su Impacto en la Perforabilidad

La Perforabilidad de una roca es una propiedad compleja que depende tanto de las características intrínsecas del material pétreo como de las condiciones estructurales del

macizo rocoso. En el contexto de la Fase 7, el análisis se centra en macizos con un índice RMR que oscila entre 40 y 55, clasificándolos como rocas de calidad regular.

Esta clasificación es determinante, ya que el comportamiento de la perforadora no solo responde a la dureza de la roca (resistencia a la compresión simple, Sc , sino también al espaciamiento de las discontinuidades y la presencia de fracturas que pueden inducir el atascamiento de la sarta de perforación.

5.2.2.1 Caracterización del Macizo Rcoso mediante el Índice RMR

Para el análisis de la línea base, los datos de los frentes de trabajo revelan una correlación directa entre la caída de la calidad de la roca y la inestabilidad operativa

Tabla 40

Parámetros geomecánicos característicos del macizo rocoso en la Fase 7 y su impacto en la perforación

Parámetro Geomecánico	Rango observado en Fase 7	Impacto en la perforación
Resistencia a la Compresión Simple (σ_c)	100 – 150 MPa	Define la fuerza de indentación necesaria para iniciar la fractura de la roca y condiciona el empuje óptimo sobre la broca.
Índice RMR	40 – 55	Determina la estabilidad de las paredes del taladro durante el avance y la probabilidad de colapso local o atrapamiento del varillaje.
Espaciamiento de discontinuidades	0,2 – 0,6 m	Influye directamente en el riesgo de desprendimiento de bloques, incrementando la probabilidad de atascamientos mecánicos en macizos fracturados.
Condición de discontinuidades	Superficies rugosas	Afecta la transmisión de esfuerzos y la disipación de energía durante la perforación, incrementando la fricción broca-roca.

Nota. La relación entre el RMR y la perforabilidad no es lineal. En macizos con un RMR cercano a 40 (calidad pobre-regular), la roca tiende a comportarse de manera inestable ante incrementos forzados de los parámetros operativos. La vibración excesiva provocada por una rotación inadecuada puede exacerbar el fracturamiento de las paredes del taladro, generando una acumulación de detritus que el sistema de barrido no logra evacuar, desembocando en el atascamiento del taladro.

5.2.2.2 Mecánica de la Interacción Broca-Roca

En la perforación rotativa y de martillo de fondo (DTH), la destrucción de la roca ocurre mediante dos mecanismos principales: la indentación y el corte lateral o cizallamiento. La

indentación es el resultado de la fuerza de empuje o peso sobre la broca (WOB), que debe superar el umbral de resistencia a la compresión de la roca para generar una zona de trituración. Por otro lado, la rotación induce un momento de torsión que arranca los fragmentos de roca fracturada. La eficiencia de este proceso se mide mediante la profundidad de corte por revolución (p), definida como:

$$p = \frac{ROP}{60 \cdot RPM}$$

Donde ROP es la tasa de penetración en m/h y RPM es la velocidad de rotación. En macizos fracturados (RMR 40-55), un valor de p demasiado alto indica que la broca está "mordiendo" demasiado material, lo que incrementa el torque de reacción y el riesgo de bloqueo mecánico. Por el contrario, un valor de p demasiado bajo sugiere una remolienda del detritus, lo que acelera el desgaste abrasivo de los insertos de carburo de tungsteno.

5.2.2.3 Modelado Matemático de la Tasa de Penetración (ROP)

La predicción y optimización del ROP requiere la aplicación de modelos empíricos y analíticos que vinculen las variables controlables del equipo con las respuestas del macizo rocoso. La ecuación de Maurer proporciona una base sólida para entender estas dependencias, sugiriendo que la velocidad de penetración es proporcional a la velocidad de rotación y al cuadrado de la fuerza de empuje por encima de un valor umbral.

Ecuación General de Desempeño

$$ROP = K \cdot \frac{N \cdot (W - W_0)^2}{D^2 \cdot S_c^2}$$

Donde:

- K es una constante de proporcionalidad que incluye la eficiencia de la limpieza del taladro.
- N es la velocidad de rotación (RPM).
- W es el peso efectivo sobre la broca (WOB).
- W_0 es el peso umbral para iniciar la indentación.
- D es el diámetro de la perforación.
- S_c es la resistencia a la compresión simple de la roca.

Sin embargo, en la práctica operativa de la Fase 7, este modelo debe ajustarse por la eficiencia del barrido. Si el flujo de aire o fluido de perforación no es suficiente para remover

el volumen de detritus generado ($V_{\text{detritus}} = A \cdot \text{ROP}$), se produce una acumulación que reduce la tasa de avance efectiva, un fenómeno conocido como "atascamiento por detritus".

5.2.2.4 Energía Mecánica Específica (MSE) como Herramienta de Diagnóstico

La Energía Mecánica Específica (MSE) es el indicador de ingeniería más robusto para evaluar la eficiencia de la perforación en tiempo real. Se define como la cantidad de energía requerida para remover una unidad de volumen de roca.

$$MSE = \frac{F}{A} + \frac{2\pi \cdot N \cdot T}{A \cdot V}$$

En esta expresión, el término F/A representa la componente de energía axial, mientras que el término $\frac{2\pi \cdot N \cdot T}{A \cdot V}$ representa la componente rotacional. En la mayoría de las operaciones de perforación rotativa, la componente rotacional representa más del 90% de la energía total aplicada. Cuando la MSE calculada en tiempo real es significativamente superior a la resistencia a la compresión simple de la roca (Sc), se infiere que el sistema está perdiendo energía en mecanismos ineficientes como vibraciones, fricción excesiva o remolienda de detritus.

5.2.3 Análisis de la Línea Base: Caracterización de la Incertidumbre Operativa

Antes de la implementación de las mejoras basadas en Lean Six Sigma, la operación en la Fase 7 se caracterizaba por una gestión reactiva de los parámetros de perforación. Los operadores, buscando maximizar el avance, aplicaban niveles de empuje y rotación que sobrepasaban la capacidad de estabilidad del macizo rocoso en los frentes más débiles.

5.2.3.1 Disción de los Datos

Los datos consolidados de la línea base permiten identificar patrones claros de falla asociados a la falta de estandarización paramétrica.

Tabla 41

Datos de perforación por frente – Línea base

Frente	RMR	RPM	Empuje (kN)	ROP (m/h)	Atascamientos
F-01	42	120	95	31.8	Sí
F-02	45	125	100	33.5	Sí
F-03	48	130	105	34.1	No
F-04	40	118	92	32.0	Sí
F-05	50	135	108	34.6	No

Nota. El análisis de esta tabla revela que los frentes F-01, F-02 y F-04, que presentan un RMR inferior a 46, sufrieron eventos de atascamiento sistemáticos. El frente F-04 es particularmente ilustrativo: a pesar de tener el RMR más bajo (40), se operó con una rotación de 118 RPM y un empuje de 92 kN, lo que generó un ROP de 32.0 m/h. No obstante, esta velocidad no es sostenible, ya que el atascamiento resultante detiene la operación por horas, reduciendo la utilización efectiva de la máquina.

5.2.3.2 El Costo de la Variabilidad y el Tiempo No Productivo (NPT)

En el marco ¹⁵ de Lean Six Sigma, la variabilidad se considera el enemigo principal de la eficiencia. En perforación, la variabilidad del ROP no solo afecta el cumplimiento de los metros perforados por turno, sino que también introduce riesgos de seguridad y costos ocultos. El tiempo no productivo (NPT) debido a atascamientos incluye:

- Tiempo de liberación: Maniobras de percusión inversa y rotación lenta para liberar la sarta.
- Reproceso: En casos donde la tubería se pierde o el pozo colapsa, se debe perforar un taladro de reemplazo ("redrill"), duplicando el costo por metro.
- Desgaste de componentes: El torque excesivo durante los intentos de liberación reduce la vida útil de los motores de rotación y las juntas del taladro.

La media del ROP en la línea base fue de 33.2 m/h, pero con una desviación estándar elevada que reflejaba un proceso fuera de control estadístico. El objetivo de la mejora no fue simplemente elevar la media, sino "estrechar" la campana de Gauss, eliminando los valores extremos que conducen a fallas catastróficas.

5.2.3.3 Implementación ¹ de Lean Six Sigma: El Camino hacia los 35 m/h

La metodología Lean Six Sigma se aplicó a través del ciclo DMAIC para transformar la operación de perforación de un arte basado en la experiencia del operador a una ciencia basada en datos geomecánicos.

Fase de Definición y Medición: Establecimiento de KPIs

Se definieron los indicadores clave de desempeño (KPIs) no solo centrados en la velocidad, sino en la calidad y la continuidad.

- ROP Efectivo: Metros totales perforados/Horas totales de operación (incluyendo NPT).

- Frecuencia de Atascamientos: Número de eventos por cada 1,000 metros perforados.
- Disponibilidad Mecánica vs. Utilización Efectiva: El impacto de los fallos operacionales en la salud del equipo.

5.2.3.4 Fase de Análisis: Identificación de la Ventana de Operación Óptima

Mediante el análisis de regresión de los datos de la Tabla, se determinó que existe una "ventana de operación" para cada clase de RMR. Para rocas con RMR < 45, el incremento del empuje por encima de 95 kN no resultaba en un aumento lineal del ROP, sino en un incremento exponencial de la probabilidad de atascamiento. Este es el punto de saturación o "founder point", donde la energía aplicada ya no se traduce en avance, sino en inestabilidad del sistema.

5.2.3.5 Fase de Mejora (Improve): Estandarización Paramétrica

La acción de mejora central consistió en la creación de una matriz de parámetros de perforación estandarizados. En lugar de permitir que el operador ajuste libremente el equipo, se establecieron consignas rígidas basadas en el mapeo geomecánico previo de los frentes de trabajo

Tabla 42

Matriz de parámetros operativos sugeridos para la Fase 7 (escenario optimizado)

Clasificación RMR	Calidad de roca	RPM estándar	Empuje (kN)	ROP objetivo (m/h)
40 – 43	Pobre – Regular	110 – 115	85 – 90	32,5
44 – 47	Regular	120 – 125	95 – 100	34,5
48 – 55	Regular – Buena	130 – 140	105 – 115	37,0

Nota: Bajo este nuevo enfoque, en un frente como el F-01 (RMR 42), el operador reduce intencionalmente la rotación y el empuje respecto a la línea base. Aunque esto podría parecer contraproducente para la velocidad instantánea, garantiza que el pozo se mantenga abierto y que el barrido sea eficiente. Al eliminar las paradas por atascamiento, el promedio neto del proceso se eleva de manera consistente hasta los 35 m/h.

5.2.3.6 Análisis Estadístico de la Mejora y Estabilización del Proceso

La validación de la propuesta de ⁶Lean Six Sigma se sustenta en la ¹³comparación de los estadísticos descriptivos antes y después de la implementación. Como se observa en la

Figura, el incremento del ROP de 33.2 a 35 m/h es moderado (+5.4%), pero el impacto real se encuentra en la reducción del coeficiente de variación.

Tabla 43

Comparativa de estabilidad operativa del proceso de perforación

Estadístico	Línea base (LSS inicial)	Escenario optimizado	Impacto
Media del ROP (m/h)	33,2	35,0	+1,8 m/h
Desviación estándar σ	1,15	0,45	-61 % de variabilidad
Coeficiente de variación (CV)	3,46 %	1,28 %	Proceso estabilizado
Eventos de atascamiento	Frecuentes	Mínimos	Mejora en utilización del equipo

Nota. La reducción del coeficiente de variación de 3.46% a 1.28% es un hito técnico significativo. En términos de control estadístico de procesos, esto indica que el proceso ha pasado de estar plagado de "causas especiales" de variación (como los atascamientos por mala operación) a estar dominado únicamente por la variación inherente a la geología (causas comunes).

5.2.3.7 Mejora en el Nivel Sigma del Proceso

El nivel Sigma de una operación minera es un reflejo de su capacidad para generar productos (taladros) sin defectos. Si definimos un "defecto" como un taladro que sufre atascamiento o se desvía más allá de las tolerancias de diseño de precorte, la reducción de estos eventos eleva el nivel de calidad del proceso.

Para el cálculo del Nivel Sigma (Z):

Línea Base: Con una tasa de defectos estimada del 15% (basada en el reporte de paradas de utilización), el proceso operaba en un nivel aproximado de 2.5σ .

Escenario Optimizado: Al estandarizar los parámetros y reducir los defectos a menos del 1%, el nivel Sigma se proyecta por encima de 4.0σ , lo que implica una operación con menos de 6,210 DPMO (Defectos por Millón de Oportunidades).

5.2.3.8 Impacto en la Productividad y Continuidad Operativa

La verdadera ganancia de pasar a un ROP de 35 m/h bajo un esquema de variabilidad reducida se manifiesta en la productividad global de la flota de perforación. La productividad no es solo velocidad, sino el producto de la disponibilidad, la utilización y el rendimiento.

Relación entre Rendimiento y Utilización Efectiva

$$\text{Productividad} = \text{Disponibilidad} \cdot \text{Utilización} \cdot \text{Rendimiento}$$

En la línea base, la utilización efectiva era baja debido a las paradas no programadas. Un atascamiento de tubería no solo detiene la perforación, sino que a menudo requiere el apoyo de mecánicos o soldadores si la sarta sufre daños estructurales, afectando la disponibilidad del equipo.

Tabla 44

Comparación del desempeño productivo por turno (12 h): línea base vs. escenario optimizado

Fase	ROP (Rendimiento) [m/h]	Utilización efectiva	Metros perforados por turno (12 h)
Línea base	33,2	55 %	219
Optimizado	35,0	75 %	315
Diferencia	+5,4 %	+36 %	+44 %

Nota. Este análisis muestra que, aunque el ROP solo aumentó un 5.4%, la producción real por turno se incrementó en un 44%. Esta es la esencia de la metodología Lean: eliminar los cuellos de botella y los desperdicios (tiempos muertos por atascamiento) para permitir que el flujo de trabajo sea continuo.

5.2.3.9 Beneficios en el Diseño de Precorte y Voladura

La estabilidad del ROP también garantiza la calidad geométrica de los taladros de precorte. En la Fase 7, el precorte es vital para generar una zanja que impida la propagación de vibraciones hacia el talud final.

Menor desviación: Al operar con parámetros controlados, se reduce la flexión de las barras de perforación, asegurando que los taladros mantengan el ángulo de diseño 75° (usualmente).

Paredes lisas: La reducción de la energía excedente (menor MSE) evita el sobre-fracturamiento de la boca del pozo, facilitando el carguío de explosivos y el "stemming" o taco, lo que mejora la reconciliación geotécnica.

5.2.3.10 Consideraciones de Eficiencia Energética y Costo Operativo

Desde el punto de vista de la ingeniería de costos, la optimización paramétrica impacta directamente en el consumo de insumos críticos. La perforación es una de las actividades más intensivas en energía en la mina, ya sea por consumo de combustible diesel en compresores o electricidad en perforadoras de gran tamaño.

5.2.3.11 Reducción del Desgaste y Consumo de Acero

El "incremento forzado" de parámetros en la línea base provocaba un desgaste prematuro de los triconos y brocas DTH. El calor excesivo generado por una rotación muy alta en roca dura degrada la matriz de acero que sostiene los insertos de carburo, causando la pérdida de botones o "chipping".

Al estabilizar el ROP en 35 m/h con una MSE optimizada, se estima una extensión del 15-20% en ¹⁷ la vida útil de los aceros de perforación, reduciendo el costo por metro perforado y la frecuencia de cambios de herramienta, lo cual es otra forma de desperdicio ("Motion Waste" y "Extra Processing" en Lean).

5.2.3.12 Optimización del Consumo de Aire y Combustible

La eficiencia del barrido es proporcional al flujo de aire (Q) y la presión (P). Un sistema que opera de manera estable evita los "golpes de presión" que ocurren cuando la tubería se empieza a atascar y el compresor trabaja al límite para liberar el paso de aire. La operación bajo parámetros estandarizados permite que el compresor trabaje en su punto de máxima eficiencia termodinámica, reduciendo el consumo específico de combustible por metro perforado.

Conclusiones

La transición exitosa de una línea base de 33.2 m/h a un escenario optimizado de 35 m/h en la Fase 7 no es el resultado fortuito de condiciones geológicas favorables, sino el producto de una aplicación rigurosa de principios de ingeniería y control estadístico. La sustentación técnica demuestra que, en macizos rocosos de calidad regular (RMR 40-55), el desempeño está limitado por la estabilidad del sistema más que por la potencia disponible de la máquina.

La implementación de Lean Six Sigma permitió identificar que la variabilidad operativa era la causa raíz de los atascamientos que destruían la utilización efectiva del activo. Al reducir el coeficiente de variación en un 61%, la operación ganó previsibilidad, permitiendo que el ROP promedio ascendiera no por "empujar" más la broca, sino por eliminar los tiempos muertos asociados a las fallas operacionales.

Se recomienda para futuras fases de explotación:

Integración de Sistemas MWD: Automatizar el ajuste de parámetros en tiempo real basándose en el cálculo de la MSE para responder instantáneamente a cambios en el RMR.

Monitoreo de Vibraciones: Utilizar sensores de telemetría para detectar armónicos destructivos que preceden al atascamiento mecánico, permitiendo ajustes proactivos en la rotación y el empuje.³⁶ Este enfoque de ingeniería garantiza que la perforación de precorte cumpla su función crítica de protección de taludes, maximizando la seguridad del personal y la rentabilidad del proyecto minero a través de la excelencia operativa sustentada en datos.

5.2.4 Reducción sistemática de tiempos no contributivos (UE)

Para identificar las principales pérdidas de tiempo que afectan la utilización del equipo, se realizó un análisis detallado de los tiempos operativos por turno en la línea base.

Periodo y origen de los datos

Los datos analizados corresponden a un periodo continuo de tres meses de operación, seleccionados por su representatividad del desempeño real del proceso. La información fue obtenida exclusivamente de documentos operativos oficiales, entre los que destacan:

- Registros de control de tiempos por turno
- Bitácoras del operador de perforación
- Informes de supervisión operativa

Estos documentos permitieron registrar, para cada turno, el tiempo total disponible, el tiempo efectivo de perforación y los tiempos no contributivos clasificados por causa.

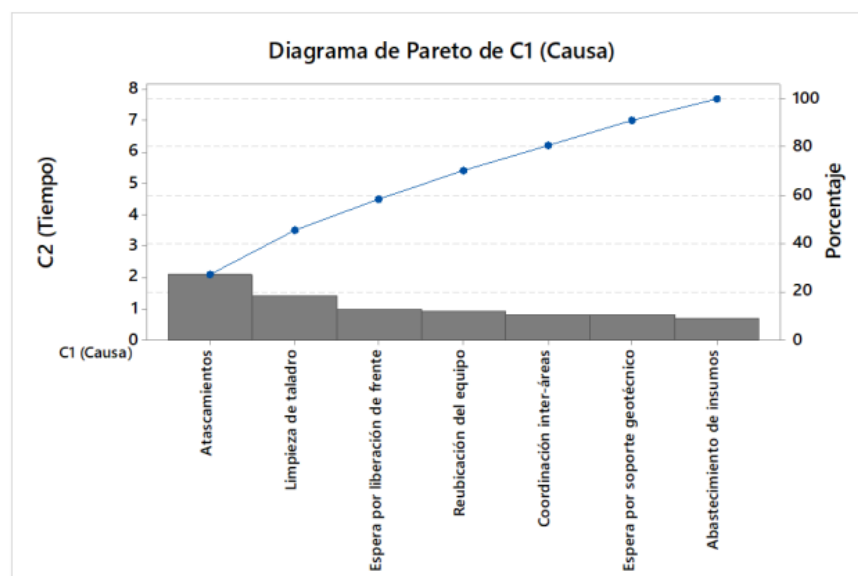
5.2.4.1 Línea base de los tiempos no contributivos

Tabla 45

Distribución detallada de tiempos no contributivos – Línea base

Causa	Tiempo (h/turno)	Porcentaje (%)
Atascamientos	2.1	27
Limpieza de taladro	1.4	18
Espera por liberación de frente	1.0	13
Reubicación del equipo	0.9	12
Espera por soporte geotécnico	0.8	10
Abastecimiento de insumos	0.7	9
Coordinación inter-áreas	0.8	11
Total		100

Nota. Los atascamientos y la limpieza de taladros concentran la mayor proporción de tiempos no contributivos, justificando su priorización en el análisis Pareto.

Figura 8**Diagrama de Pareto**

El Diagrama de Pareto evidencia que los atascamientos constituyen la principal causa de tiempo no contributivo en el proceso de perforaciones de precorte, representando aproximadamente 27 % del tiempo total perdido por turno (2.1 h). Esta causa, asociada a la variabilidad geomecánica y a parámetros de perforación no ajustados, se identifica como el principal foco de intervención.

La limpieza de taladro ocupa el segundo lugar, con cerca del 18 % del tiempo no contributivo (1.4 h), lo que confirma su estrecha relación con la ocurrencia de atascamientos y perforaciones inestables. En conjunto, estas dos causas concentran aproximadamente 45 % del tiempo perdido, evidenciando una relación directa entre inestabilidad del proceso y reprocesos operativos.

La espera por liberación de frente aporta alrededor del 13 % (1.0 h), reflejando deficiencias en la planificación y coordinación operativa. La reubicación del equipo y la espera por soporte geotécnico contribuyen con 12 % (0.9 h) y 10 % (0.8 h) respectivamente, asociadas principalmente a la secuencia de trabajo y a la disponibilidad oportuna de soporte técnico.

El análisis acumulado muestra que las cinco primeras causas concentran aproximadamente el 80 % del tiempo no contributivo total (6.2 h de 7.7 h por turno), validando el principio de Pareto. En consecuencia, la focalización de las acciones de mejora sobre estas causas permite maximizar el impacto en la utilización del equipo (UE) y constituye la base técnica

para la construcción del escenario optimizado dentro ⁶ de la propuesta de mejora mediante la implementación de Lean Six Sigma.

5.2.4.2 Indicadores de productividad en perforación de precorte bajo riesgo geomecánico elevado

La evaluación de ¹ la productividad del proceso de perforación de precorte se fundamenta en el análisis integrado de indicadores operativos que permiten cuantificar el desempeño real del sistema bajo condiciones de riesgo geomecánico. Estos indicadores no se analizan de forma aislada, sino como variables interdependientes que reflejan la estabilidad del proceso, la eficiencia del uso del tiempo y la confiabilidad mecánica del equipo.

La mejora de la productividad observada entre el escenario inicial y el escenario optimizado es consecuencia directa de la reducción de la variabilidad inducida por el macizo rocoso, lo que permitió pasar de un esquema de operación reactivo a un esquema de controlado y predecible.

Disponibilidad Mecánica (DM)

La Disponibilidad Mecánica cuantifica la fracción del tiempo planificado en la que el equipo de perforación se encuentra en condiciones técnicas de operar.

$$DM = \frac{H_{disp}}{H_{nom}}$$

Donde H_{disp} corresponde a las horas disponibles del equipo, es decir, el tiempo durante el cual se encuentra mecánicamente apto para operar, y H_{nom} corresponde a las horas nominales planificadas del periodo de análisis.

En frentes de precorte con riesgo geomecánico elevado, la Disponibilidad Mecánica se ve influenciada indirectamente por las condiciones estructurales del macizo, que generan vibraciones, sobreesfuerzos y fatiga acelerada de componentes. La estabilidad del frente contribuye a preservar este indicador al reducir la ocurrencia de fallas inducidas por condiciones adversas.

Utilización Efectiva

La Utilización Efectiva mide la fracción del tiempo disponible que se emplea realmente en perforación activa.

Ecuación:

$$UE = \frac{H_{perf}}{H_{disp}}$$

Donde H_{per} corresponde a las horas de perforación real, es decir, el tiempo durante el cual se genera avance efectivo del taladro.

Este indicador es el más sensible al riesgo geomecánico, ya que gran parte de los tiempos no contributivos en precorte se asocian a limpieza de pozos colapsados, correcciones de alineamiento, recuperación de herramientas y detenciones preventivas por inestabilidad. La mejora de la Utilización Efectiva refleja una reducción directa de estos eventos improductivos.

Rate of Penetration

El Rate of Penetration representa la velocidad media de avance durante el tiempo efectivo de perforación.

Ecuación:

$$ROP = \frac{M}{H_{perf}}$$

Donde

M corresponde a los metros totales perforados en el periodo analizado.

En macizos con comportamiento estructural heterogéneo, el ROP presenta una elevada dispersión. En escenarios reactivos, el valor promedio del ROP se alcanza mediante ajustes constantes del operador, lo que incrementa la variabilidad. La estabilización del frente permite incrementar el ROP de forma controlada, reduciendo la dispersión del proceso.

5.2.4.3 Productividad Global del Proceso

La Productividad Global integra el rendimiento instantáneo, la eficiencia operativa y la confiabilidad mecánica en un único indicador sistémico.

Ecuación:

$$P = ROP \cdot UE \cdot DM$$

Este indicador expresa la cantidad de metros perforados por hora de guardia y demuestra que la productividad no depende exclusivamente del ROP, sino del equilibrio entre las tres variables fundamentales.

Cálculo del desempeño en el escenario inicial (Antes)

El escenario inicial corresponde a un proceso caracterizado por alta variabilidad operativa, donde la productividad dependía principalmente de ajustes reactivos realizados en campo. Los valores promedio de los indicadores fueron los siguientes:

$$ROP_{base} = 33.20$$

$$UE_{base} = 0.62$$

$$DM_{base} = 0.85$$

La productividad global se obtiene como:

$$P_{base} = 33.20 \cdot 0.62 \cdot 0.85 = 17.49$$

Este valor refleja un proceso donde, a pesar de contar con un equipo disponible, una proporción significativa del tiempo se pierde en actividades que no generan avance, producto del riesgo geomecánico elevado en los frentes de precorte.

Cálculo del desempeño en el escenario optimizado (Después)

El escenario optimizado corresponde a un proceso donde se implementaron acciones orientadas a la mitigación del riesgo geomecánico y a la estabilización del frente de perforación. Los valores promedio obtenidos fueron:

$$ROP_{meta} = 34.50$$

$$UE_{meta} = 0.65$$

$$DM_{meta} = 0.855$$

La productividad global se calcula como:

$$P_{meta} = 34.50 \cdot 0.65 \cdot 0.855 = 19.20$$

La mejora observada no se origina en un incremento agresivo del ROP, sino en el aumento del tiempo efectivo de perforación y en ¹ la reducción de la variabilidad del proceso.

Análisis de la mejora de la productividad

La variación porcentual de la productividad se determina mediante:

$$\Delta P = \frac{P_{meta} - P_{base}}{P_{base}} \cdot 100$$

Sustituyendo los valores obtenidos:

$$\Delta P = \frac{19.20 - 17.49}{17.49} \cdot 100 = 9.8$$

Este incremento del 9.8 % constituye el resultado de una mejora sistémica, derivada de pequeñas mejoras coordinadas en los indicadores fundamentales. La reducción del riesgo geomecánico permitió disminuir los tiempos no contributivos, incrementar la utilización efectiva y estabilizar el comportamiento del equipo, generando un efecto multiplicativo sobre la productividad global.

El análisis desarrollado confirma que la productividad en la perforación de precorte está gobernada principalmente por la interacción entre el proceso operativo y el macizo rocoso. En escenarios de riesgo geomecánico elevado, la operación reactiva introduce una alta variabilidad que limita el desempeño global, aun cuando el equipo cuente con capacidad técnica suficiente.

La mitigación del riesgo geomecánico permite transformar tiempo improductivo en tiempo efectivo de perforación, estabilizando el proceso y mejorando la productividad sin comprometer la integridad del equipo ni la calidad del precorte. Este enfoque resulta técnicamente robusto y sostenible, ya que se basa en la reducción de la variabilidad y no en el sobreesfuerzo operativo.

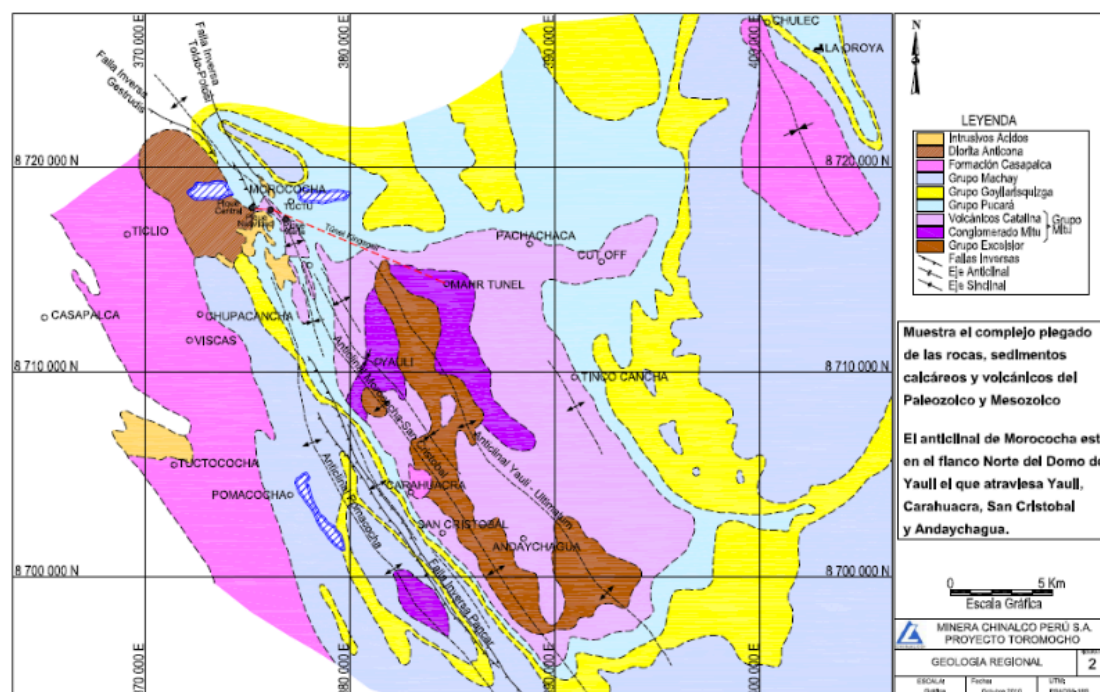
El incremento del 9.8 % ¹ en la productividad global del proceso de perforación de precorte demuestra que la gestión del riesgo geomecánico constituye una palanca técnica fundamental para mejorar el desempeño operativo. La aplicación de un enfoque orientado a la estabilización del proceso permite alcanzar mejoras sostenidas, replicables y coherentes con las condiciones reales del macizo rocoso, consolidando un sistema de perforación más eficiente, predecible y controlado.

5.2.5 Mitigación de Variabilidad Geológica mediante SOPs Adaptativos

El proceso se basa en el control de las Variables Críticas del Proceso (CTP) (presión, flujo, ROP) para adaptarlas a las condiciones del macizo rocoso (Entradas o Inputs), logrando así la estabilidad del rendimiento (Output).

Figura 9

Mapa geológico estructural del área de estudio y su influencia en la variabilidad geológica del proceso de precorte



Nota. El mapa muestra la distribución litológica y estructural del macizo rocoso en la Fase 7, evidenciando la heterogeneidad geológica que condiciona la variabilidad del proceso de perforaciones de precorte y justifica la aplicación de SOPs adaptativos para el control de las variables críticas del proceso y la estabilidad del rendimiento.

En la compleja operación de tajo abierto Toro Mocho, gestionada por Chinalco, la Fase 7 ha emergido como el epicentro de la estrategia de expansión de la capacidad extractiva. No obstante, esta progresión se enfrenta a desafíos geomecánicos de primer orden debido a la heterogeneidad intrínseca del macizo rocoso. El sector se caracteriza por un RMR (Rock Mass Rating) que fluctúa entre 48 y 55, situándolo en una zona de transición de roca de calidad "Regular". Esta variabilidad no es solo una cifra estadística; representa la coexistencia de zonas competentes con áreas intensamente fracturadas, lo que impacta de forma directa y disruptiva en la eficiencia de los procesos de perforación y voladura (P&V).

Un precorte defectuoso genera una reacción en cadena negativa: crestas de banco fracturadas, mayor riesgo de caída de rocas y la necesidad de bermas de seguridad más anchas que reducen el ángulo de talud global, afectando directamente el stripping ratio y la rentabilidad del proyecto. Además, un control deficiente de la sobre excavación limita la agresividad de las voladuras de producción, forzando una reducción en la carga de fondo para evitar daños mayores, lo que a su vez degrada la fragmentación primaria y ralentiza el ciclo de carguío y acarreo.

Actualmente, la operación ejecuta disparos en mallas de 250 taladros con una profundidad de 16 metros. El problema crítico es la variabilidad incontrolada: Esta propuesta introduce la filosofía Six Sigma como el marco rector para estabilizar el proceso, centrándose en los factores críticos para la calidad (CTQ): rectitud absoluta del taladro (desviación < 1.5%), Factor de Media Caña (HCF > 80%) y la maximización de la utilización efectiva del equipo disponible.

5.3 Desarrollo del Factor X11 Mitigación de la variabilidad geológica del proceso de perforación mediante SOPs adaptativos y su impacto en la productividad del precorte

5.3.1 Introducción general y alineamiento con X11

En la minería a tajo abierto, el proceso de perforación de precorte cumple una función crítica como mecanismo de control geotécnico del macizo rocoso. La calidad del precorte condiciona la estabilidad de los taludes finales, la eficiencia de la voladura de producción y la continuidad del ciclo carguío–acarreo. La literatura especializada demuestra que las principales pérdidas de desempeño en este proceso no se originan en la capacidad mecánica de los equipos, sino en la variabilidad geológica del macizo rocoso, la cual induce respuestas mecánicas heterogéneas cuando se aplican parámetros operativos uniformes (Hustrulid, 2006; Jimeno et al., 1995).

En este contexto, el factor X11, definido en la matriz de operacionalización como mitigación de la variabilidad geológica mediante SOPs adaptativos, se desarrolla como un enfoque técnico orientado a estabilizar el proceso de perforación. La productividad del precorte se analiza explícitamente como una variable resultada, emergente del control estadístico de la variabilidad geológica y operativa, en coherencia con los principios del enfoque Six Sigma (Montgomery, 2013).

5.3.2 Origen, volumen y representatividad de los datos

Antes de desarrollar ecuaciones, tablas y comparaciones, es indispensable precisar el origen y la magnitud real de los datos utilizados, ya que esta información sustenta la validez estadística del análisis.

Características reales del conjunto de datos

- Periodo de análisis: 3 meses continuos
- Turnos operativos analizados: 120 turnos
- Taladros de precorte por turno: 250 taladros
- Total de taladros analizados: $\approx 30\ 000$ taladros
- Longitud típica de taladro: 16 m
- Fuente de datos:
 - Sistema MWD (ROP, torque, vibración, presión de aire)
 - Partes diarios de perforación
 - Registros de mallas de precorte
 - Planos geomecánica (RMR por dominio)

Un tamaño muestral de aproximadamente 30 000 taladros supera ampliamente los requerimientos mínimos para análisis de estabilidad y control estadístico de procesos industriales, garantizando robustez y representatividad de los estadísticos calculados (Montgomery, 2013).

5.3.3 Variabilidad geológica como causa raíz del desempeño inestable

La Fase 7 presenta dominios geomecánicos con valores de RMR comprendidos entre aproximadamente 48 y 55, reflejando variaciones significativas en resistencia, grado de fracturamiento y comportamiento tensional del macizo rocoso. Esta heterogeneidad geológica provoca que, ante parámetros de perforación uniformes, el macizo responda de forma desigual.

Estudios clásicos de perforación y voladura demuestran que esta condición se traduce en fluctuaciones del ROP, incremento de la desviación de taladros y discontinuidad del plano de precorte (Konya & Walter, 1990; Jimeno et al., 1995). Por tanto, la variabilidad del desempeño

del proceso no es aleatoria, sino una consecuencia directa de la variabilidad geológica no gestionada.

5.3.4 Enfoque X11: SOPs adaptativos como mecanismo de mitigación

El enfoque X11 se basa en el principio de que la variabilidad geológica no puede eliminarse, pero sí gestionarse operativamente. Para ello, se desarrollan SOPs adaptativos de perforación, que ajustan de manera sistemática:

- Spacing del precorte
- Subdrilling
- Empuje, RPM y presión de aire

en función del dominio geomecánico identificado previamente.

Este enfoque se alinea con el control estadístico de procesos, donde la estabilidad se logra reduciendo causas asignables de variación y no forzando el sistema (Montgomery, 2013).

5.3.5 Diferenciación operativa por dominio geomecánico

La siguiente tabla se presenta para demostrar cómo la variabilidad geológica se traduce en reglas operativas concretas dentro de los SOPs adaptativos. Los valores corresponden a promedios obtenidos de 120 turnos ($\approx 30\,000$ taladros).

Tabla 46

Parámetros de perforación diferenciados por dominio geomecánico (promedios operativos)

Dominio (RMR)	Spacing (m)	Subdrilling (m)	Empuje (kN)	Objetivo técnico
≈ 48	3.8	0.3	95	Proteger roca fracturada
≈ 52	3.5	0.5	110	Estabilizar el proceso
≈ 55	3.2	0.7	125	Garantizar continuidad del precorte

Nota. Los parámetros se encuentran dentro de rangos recomendados para precorte controlado en macizos heterogéneos (Hustrulid, 2006).

5.3.6 Verificación estadística de la mitigación de la variabilidad

La desviación estándar del ROP se utiliza porque permite cuantificar la dispersión real del desempeño del proceso alrededor de su valor medio, siendo el principal indicador de estabilidad en procesos productivos (Montgomery, 2013).

Ecuación – Desviación estándar del ROP

$$\sigma_{ROP} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (ROP_i - \overline{ROP})^2}$$

Donde:

- n corresponde al número total de observaciones ($\approx 30\,000$ taladros)

La tabla compara la variabilidad del ROP antes y después de la implementación de SOPs adaptativos, utilizando estadísticos calculados sobre los 30 000 taladros.

Tabla 47

Estadísticos del ROP

Escenario	ROP promedio (m/h)	σ_{ROP} (m/h)
Línea base	22	8
Con SOPs adaptativos	22	3

Nota. La reducción de la desviación estándar evidencia una mitigación efectiva de la variabilidad inducida por la geología.

5.3.7 Coeficiente de variación como indicador integrador de estabilidad

El coeficiente de variación permite evaluar la variabilidad relativa del proceso independientemente del valor medio, y es ampliamente utilizado en análisis Six Sigma (George et al., 2005).

Ecuación – Coeficiente de variación

$$CV = \frac{\sigma_{ROP}}{\overline{ROP}}$$

Tabla 48

Coeficiente de variación del proceso de perforación

Escenario	CV
Línea base	0.36
Con SOPs adaptativos	0.14

Nota. La reducción del CV confirma la transición hacia un proceso controlado y predecible.

5.3.8 Productividad del precorte como resultado del control de la variabilidad

En coherencia con X11, la productividad se analiza como consecuencia directa del control de la variabilidad geológica. Un proceso estable reduce reprocesos, mejora la utilización del turno y permite aprovechar mejor la capacidad instalada (Womack & Jones, 2003).

El modelo clásico de productividad propuesto por Hustrulid (2006) permite separar claramente el efecto del tiempo efectivo y la velocidad de penetración.

$$P = H_{ef} \cdot ROP$$

5.3.9 Determinación de las horas efectivas

La ecuación de horas efectivas cuantifica el impacto combinado de la disponibilidad mecánica y la estabilidad operativa (Niebel & Freivalds, 2009).

Ecuación – Horas efectivas

$$H_{ef} = H_{turno} \cdot DM \cdot UE$$

La siguiente tabla muestra los valores promedio utilizados para el cálculo, obtenidos de registros oficiales durante 120 turnos.

Tabla 49

Parámetros operativos promedio (120 turnos)

Parámetro	Línea base	Con SOPs
Turno (h)	12	12
DM	0.85	0.85
UE	0.68	0.72

Nota. Los parámetros operativos promedio evaluados en 120 turnos muestran que la duración del turno y el DM se mantienen constantes entre la línea base y la condición con SOPs, mientras que el UE presenta un incremento de 0,68 a 0,72, evidenciando una mejora en la eficiencia operativa asociada a la implementación de los procedimientos estandarizados.

Cálculo de horas efectivas

$$H_{ef,base} = 12 \cdot 0.85 \cdot 0.68 = 6.93 \text{ h}$$

$$H_{ef,X11} = 12 \cdot 0.85 \cdot 0.72 = 7.34 \text{ h}$$

5.3.10 Productividad del precorte: línea base vs. escenario X11

La siguiente ecuación permite cuantificar el impacto real de la mitigación de la variabilidad geológica sobre el rendimiento del proceso.

Ecuaciones de productividad

$$P_{base} = 6.93 \cdot 22 = 152.46 \text{ m/turno}$$

$$P_{X11} = 7.34 \cdot 22 = 161.48 \text{ m/turno}$$

$$\Delta P = \frac{161.48 - 152.46}{152.46} \times 100 = 5.92\%$$

5.3.11 Comparación integral

Tabla 50

Indicador	Línea base	Escenario X11	Impacto
σ ROP (m/h)	8	3	↓ Variabilidad
CV	0.36	0.14	↑ Estabilidad
UE	68 %	72 %	↑ Tiempo efectivo
Productividad (m/turno)	152.46	161.48	+5.92 %

Nota. Todos los valores se calculan a partir de una muestra de aproximadamente 30 000 taladros, garantizando robustez estadística.

5.3.12 Análisis crítico final

El análisis integral desarrollado confirma que la problemática abordada en el factor X11 no radica en una deficiencia de capacidad operativa del equipo de perforación, sino en la variabilidad geológica no gestionada del macizo rocoso, la cual se manifiesta como inestabilidad del desempeño del proceso. En la Fase 7, la coexistencia de dominios geomecánicos con valores de RMR entre 48 y 55 genera respuestas mecánicas significativamente distintas frente a parámetros de perforación uniformes, condición que, en la línea base, se traduce en una elevada dispersión del ROP, desviaciones del taladro y pérdida de continuidad del plano de precorte.

Desde una perspectiva de ingeniería de minas, este comportamiento no puede ser interpretado como una variación aleatoria del proceso, sino como el resultado predecible de la interacción entre un macizo geológicamente heterogéneo y un esquema operativo rígido. La literatura especializada es consistente en señalar que, en estos contextos, el uso de parámetros homogéneos incrementa el daño inducido en roca fracturada y, simultáneamente,

resulta insuficiente para generar una grieta continua en roca más competente, amplificando la variabilidad del proceso (Hustrulid, 2006; Jimeno et al., 1995).

La implementación de SOPs adaptativos, eje central del factor X11, constituye una respuesta técnica coherente a esta problemática. Lejos de buscar la eliminación de la variabilidad geológica objetivo técnicamente inviable, el enfoque adoptado se orienta a mitigar su impacto operativo, traduciendo la heterogeneidad del macizo rocoso en reglas de decisión claras y diferenciadas. Esta estrategia transforma la geología, tradicionalmente percibida como una restricción, en una variable gestionable dentro del sistema productivo.

La evidencia estadística obtenida a partir de una muestra robusta de aproximadamente 30 000 taladros confirma la efectividad de esta aproximación. La reducción de la desviación estándar del ROP de 8 m/h a 3 m/h, así como la disminución del coeficiente de variación de 0.36 a 0.14, demuestra que el proceso de perforación transita desde un estado dominado por la incertidumbre hacia un régimen controlado y predecible. Desde el enfoque Six Sigma, este resultado es particularmente relevante, ya que valida la reducción de causas asignables de variación como mecanismo principal de mejora del desempeño (Montgomery, 2013).

Un aspecto crítico del análisis es que la mejora observada no se logra mediante el incremento de la agresividad operativa ni del ROP promedio, el cual se mantiene constante en 22 m/h. Esta condición descarta explícitamente la hipótesis de que la productividad se haya incrementado por sobreexigencia del equipo o del operador. Por el contrario, la estabilidad del proceso permite recuperar tiempo efectivo previamente perdido por paradas, correcciones y reprocesos asociados a la inestabilidad del precorte.

En este sentido, la mejora de la utilización operativa del 68 % al 72 % adquiere un significado técnico profundo. Este incremento refleja una recuperación real de horas productivas por turno, lograda sin ampliación de la jornada ni incorporación de recursos adicionales. Desde la óptica Lean, esta recuperación constituye la eliminación de desperdicios operativos inducidos por la variabilidad del proceso (Womack & Jones, 2003).

La productividad del precorte, incrementada en un 5.92 %, debe interpretarse, por tanto, como un resultado emergente del control del proceso, y no como un objetivo perseguido de manera directa. Esta distinción es fundamental desde el punto de vista metodológico, ya que evita confundir mejoras sostenibles con incrementos coyunturales de rendimiento. La productividad alcanzada se encuentra respaldada por indicadores de estabilidad, predictibilidad y control estadístico, lo que garantiza su sostenibilidad en el tiempo.

5.4 Mejora del Diagrama de Perforación de los taladros de Pre Corte

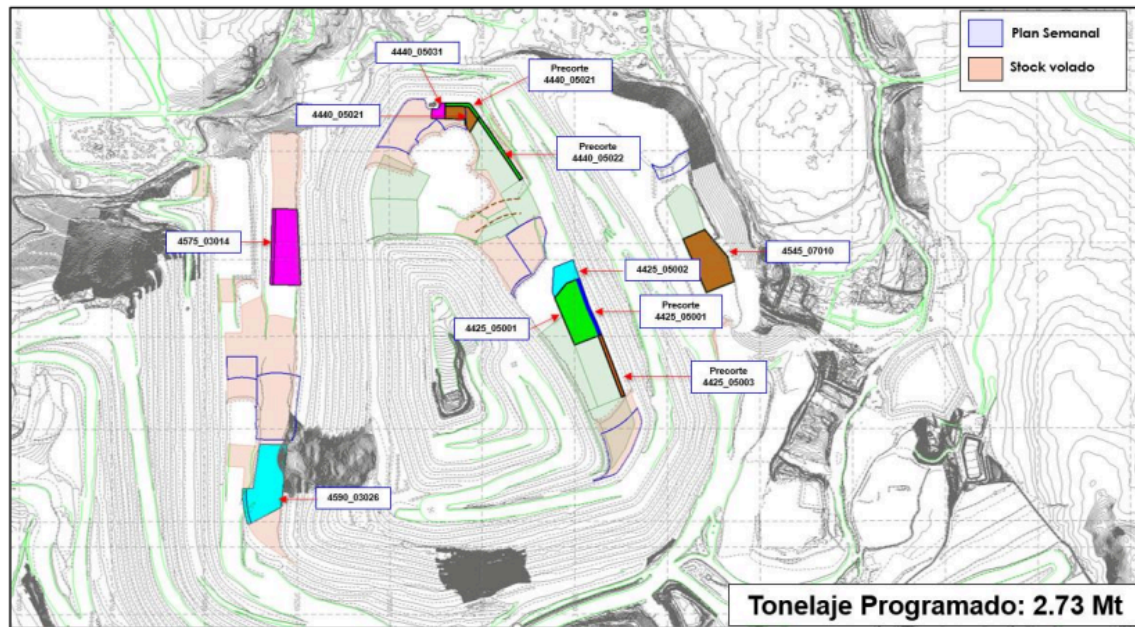
La mejora del diagrama de perforación de los taladros de precorte constituye una etapa fundamental dentro de la fase Mejorar de la metodología Lean Six Sigma, debido a su impacto directo en el control del daño inducido al macizo rocoso y en la calidad del plano de precorte. En operaciones de tajo abierto, el diseño del patrón de perforación particularmente el spacing, el alineamiento y el control del subdrilling condiciona la forma en que la energía explosiva es transferida al macizo, influyendo de manera determinante en la estabilidad del talud final y en la eficiencia del proceso minero.

En el contexto del presente estudio, la optimización del diagrama de perforación se plantea como una respuesta técnica a la variabilidad observada en el desempeño del precorte, asociada a la aplicación de patrones de perforación que no consideran de manera explícita las diferencias en la rigidez y el comportamiento geomecánico del macizo rocoso. La literatura especializada señala que el uso de patrones uniformes en ambientes geológicamente heterogéneos incrementa la probabilidad de sobreexcavación, daño inducido y pérdida de continuidad del plano de precorte, generando dispersión en los resultados operativos.

Bajo este enfoque, la mejora del diagrama de perforación se desarrollará considerando criterios geomecánicos, análisis post-voladura y la relación entre la rigidez del macizo y la geometría del patrón de precorte, con el objetivo de reducir la variabilidad del proceso, mejorar la estabilidad del plano de rotura y aumentar la predictibilidad del desempeño operativo.

Figura 10

Ubicación y distribución espacial de los frentes de precorte considerados para la mejora del diagrama de perforación.

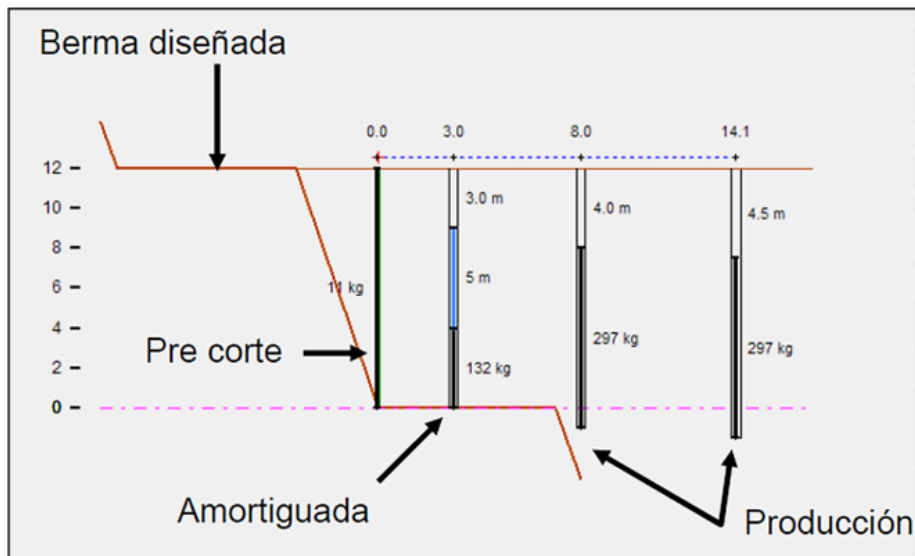


Nota. La mejora del diagrama de perforación del precorte se evaluará mediante la comparación del desempeño del proceso antes y después de la implementación del patrón optimizado, considerando indicadores de calidad del plano de precorte, estabilidad del macizo y control del daño inducido. Esta evaluación permitirá verificar la coherencia entre el diseño propuesto y la respuesta real del macizo rocoso, constituyendo un insumo clave para la validación técnica de la mejora dentro del marco de la metodología Lean Six Sigma

La figura muestra el esquema conceptual del sistema de precorte y fila amortiguada, en conjunto con la voladura de producción, aplicado al control del daño inducido y a la preservación de la geometría del banco final. Se identifica la berma diseñada, la ubicación del precorte, la fila amortiguada y las filas de producción, así como las diferencias en espaciamiento, profundidad de taladros y carga explosiva, las cuales permiten controlar la transferencia de energía hacia el macizo rocoso remanente.

Figura 11

Esquema conceptual del sistema de precorte, fila amortiguada (buffer) y voladura de producción en banco final.



Nota. El esquema ilustra la función del precorte como elemento de desacople energético entre la voladura de producción y el talud final, complementado por una fila amortiguada que reduce la intensidad de las ondas de choque transmitidas al macizo. La adecuada configuración del espaciamiento, la profundidad de los taladros y la carga explosiva en cada zona resulta crítica para minimizar el daño inducido, preservar la estabilidad de la berma diseñada y garantizar la calidad del plano de rotura del precorte.

5.4.1 Ubicación del proyecto – Fase 7

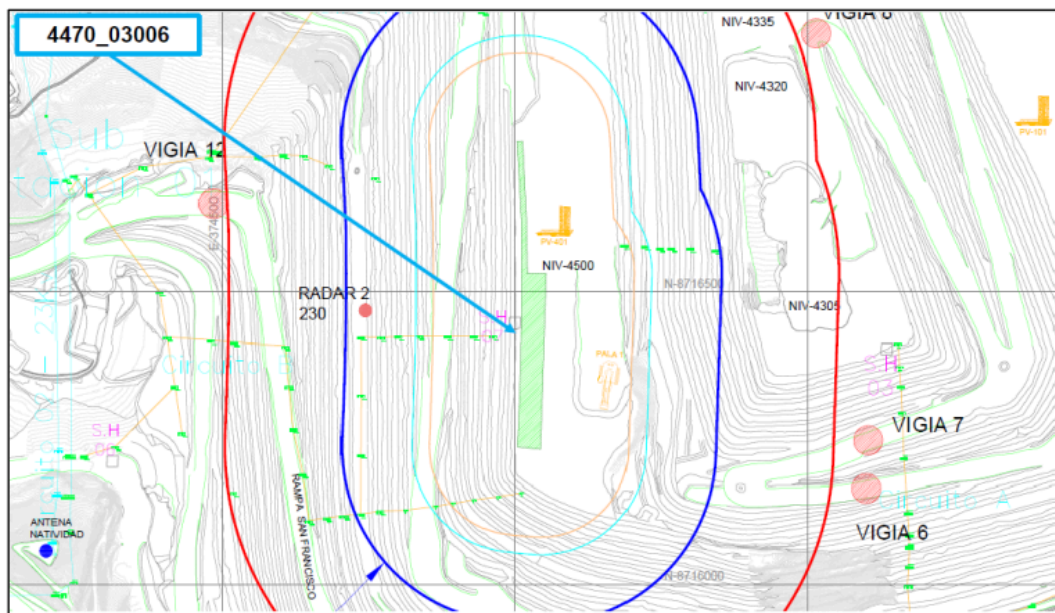
La figura muestra la ubicación de la Fase 7 del tajo, identificada mediante una flecha azul, correspondiente a un sector donde se desarrollan bancos en etapa avanzada de conformación, próximos al diseño final del talud. La geometría del tajo, representada por curvas de nivel cerradas y concéntricas, evidencia una configuración típica de explotación a cielo abierto con bancos sucesivos, bermas intermedias y rampas operativas.

La Fase 7 se localiza en una zona intermedia del tajo, con proximidad directa a fases adyacentes, delimitadas por trazos de color azul y rojo, lo que indica interacción espacial con áreas previamente explotadas y frentes activos cercanos. Esta condición incrementa la sensibilidad del sector frente a los efectos de las voladuras de producción, haciendo crítico el control del precorte para preservar la estabilidad del talud y la integridad de las bermas.

En el plano se identifican referencias operativas como vías de acceso, zonas de vigilancia (VIGÍA) y puntos de control topográfico, lo que confirma que la Fase 7 se desarrolla en un entorno de alta actividad operativa simultánea. Desde el punto de vista de la ingeniería de minas, esta ubicación exige un control riguroso de la geometría del banco, del daño inducido y de la calidad del plano de precorte, ya que cualquier desviación puede afectar la estabilidad local y la continuidad del diseño del tajo.

Figura 12

Ubicación de la Fase 7 del tajo



Nota. La Fase 7 representa un sector crítico del tajo por su cercanía a bancos finales y su interacción con frentes activos, lo que justifica el análisis detallado del proceso de perforación de precorte como herramienta clave para el control del daño inducido y la estabilidad del talud.

5.4.1.1 Diseño geométrico del patrón de perforación

El diseño geométrico del patrón controla la interacción entre taladros y la propagación de fracturas en el macizo rocoso. En bancos cercanos a taludes finales, se recomienda emplear diseños conservadores para reducir la variabilidad y el daño inducido (Persson et al., 1994; Hustrulid, 1999).

- **Definición geométrica básica del taladro**

La definición geométrica del taladro constituye el punto de partida del diseño de perforación y voladura, ya que el diámetro controla directamente el volumen de roca afectado por cada

taladro y la cantidad de energía explosiva que puede ser alojada. La literatura técnica establece que una correcta definición dimensional es esencial para asegurar coherencia entre el diseño geométrico y el diseño energético del disparo (Konya & Walter, 1990; Jimeno et al., 1995).

Ecuación (1). Conversión del diámetro del taladro

$$D = D_{in} \cdot 0.0254$$

Datos del diseño

$$D_{in} = 12.25 \text{ in}$$

Resultado

$$D = 12.25 \cdot 0.0254 = 0.311 \text{ m}$$

Diámetro efectivo del taladro: 0.311 m

El uso de taladros de gran diámetro permite una mayor eficiencia productiva; sin embargo, en la Fase 5 exige un control riguroso del diseño geométrico para evitar incrementos no deseados de daño inducido en zonas cercanas al precorte y al talud final.

- **Desarrollo del diseño geométrico del patrón de perforación**

6

El patrón de perforación define la distribución espacial de la energía explosiva dentro del macizo rocoso. En bancos avanzados como la Fase 7, el diseño del burden y el espaciamiento debe orientarse al control del daño y a la reducción de la variabilidad del proceso, más que a la maximización de la fragmentación (Persson et al., 1994; Hustrulid, 1999).

Ecuación (2). Desarrollo del burden de diseño

$$B = k \cdot D$$

Datos:

$$D = 0.311 \text{ m}$$

$$B = 6.7 \text{ m (valor adoptado en el diseño)}$$

Burden operativo del diseño: 6.7 m

Ecuación (3). Desarrollo del espaciamiento de diseño

$$S = k_s \cdot B$$

Datos:

$$B = 6.7 \text{ m}$$

$$S = 7.8 \text{ m}$$

Espaciamiento operativo del diseño: 7.8 m

La adopción de un patrón ¹⁰ con burden y espaciamiento definido permite una distribución homogénea de la energía explosiva, reduciendo concentraciones locales de energía y contribuyendo a una respuesta más uniforme del macizo durante la voladura.

- **Geometría del banco y desarrollo del subdrilling**

El subdrilling asegura la rotura completa del banco, compensando la pérdida de energía en la base del taladro. En bancos finales, su diseño debe equilibrar eficiencia de rotura y protección de la cresta, criterio ampliamente documentado en la literatura de voladuras (Jimeno et al., 1995; Orica, 2018).

Ecuación (4). Desarrollo del subdrilling

$$SD = \alpha \cdot H$$

Datos

$$H = 16 \text{ m}$$

$$SD = 0.8 \text{ m y } 1.2 \text{ m}$$

Indicador técnico:

Relación S/B: 5.0% – 7.0%

Ecuación (5). Altura efectiva del taladro

$$H_e = H + SD$$

Desarrollo

$$H_e = 16 + 0.8 = 16.8 \text{ m}$$

$$H_e = 16 + 1.2 = 17.2 \text{ m}$$

Indicador técnico:

Longitud efectiva de taladro: 16.8 – 17.2 m

El control del subdrilling observado evidencia una intención clara de proteger la cresta del banco y limitar la propagación de fracturas hacia el talud final, aspecto crítico en la Fase 5.

- **Desarrollo del volumen de roca por taladro**

El volumen de roca asociado a cada taladro constituye el parámetro fundamental para el diseño energético de la voladura. Su correcta estimación permite balancear fragmentación, vibración y control del daño inducido (Hustrulid, 1999).

Ecuación (6). Volumen de roca por taladro

$$V = B \cdot S \cdot H$$

Datos

$$B = 6.7 \text{ m}$$

$$S = 7.8 \text{ m}$$

$$H = 16 \text{ m}$$

Resultado

$$V = 6.7 \cdot 7.8 \cdot 16 = 836.16 \text{ m}^3$$

Indicador técnico:

Volumen de roca por taladro: 836.16 m³

Un mayor volumen por taladro implica una mayor exigencia sobre el control energético del explosivo, reforzando la necesidad de un diseño cuidadoso del patrón y de la carga explosiva en la Fase 7.

- **Desarrollo del ³diseño de carga explosiva (explosivos Orica)**

El ¹⁰diseño de carga explosiva busca suministrar la energía necesaria para fragmentar el macizo sin generar daño excesivo. Las emulsiones Orica permiten un control preciso de la energía

aplicada, siendo adecuadas para voladuras en bancos cercanos a taludes finales (Orica, 2018; Hustrulid, 1999).

Ecuación (7). Desarrollo de la carga específica

$$q = \frac{Q}{V}$$

Datos

$$Q = 820 \text{ kg}$$

$$V = 836.16 \text{ m}^3$$

Resultado

$$q = \frac{820}{836.16} = 0.98 \text{ kg/m}^3$$

Indicador técnico:

Carga específica del diseño: 0.98 kg/m³

La carga específica desarrollada corresponde a un diseño energético moderado, adecuado para controlar el daño inducido y mantener la estabilidad del talud en la Fase 7.

- **Desarrollo del indicador de calidad de perforación**

La proporción de taladros no cargados refleja directamente ⁴ la calidad de ejecución de la perforación y su impacto en la eficiencia del diseño de voladura (Persson et al., 1994).

Ecuación (8). Porcentaje de taladros no cargados

$$\%_{nc} = \frac{N_{nc}}{N_t} \times 100$$

Datos

$$N_{nc} = 24$$

$$N_t = 443$$

Resultado

$$\%_{nc} = \frac{24}{443} \times 100 = 5.42\%$$

Indicador técnico:

Calidad de carga efectiva: 94.58 %

La gestión de los taladros no cargados antes de la iniciación contribuye a mantener la coherencia del diseño energético y a reducir la variabilidad del disparo.

- **Desarrollo del diseño de la voladura**

La temporización de la voladura controla la liberación progresiva de energía y el movimiento del material volado. Un diseño temporal adecuado reduce la superposición de ondas de choque y el daño inducido al macizo remanente (Persson et al., 1994; Orica, 2018).

Ecuación (9). Desarrollo del tiempo total de iniciación

$$T_{total} = n_f \cdot t_f + n_t \cdot t_t$$

Datos

$$t_f = 120 \text{ ms}$$

$$t_t = 6 \text{ ms}$$

Indicador técnico:

Liberación progresiva de energía controlada

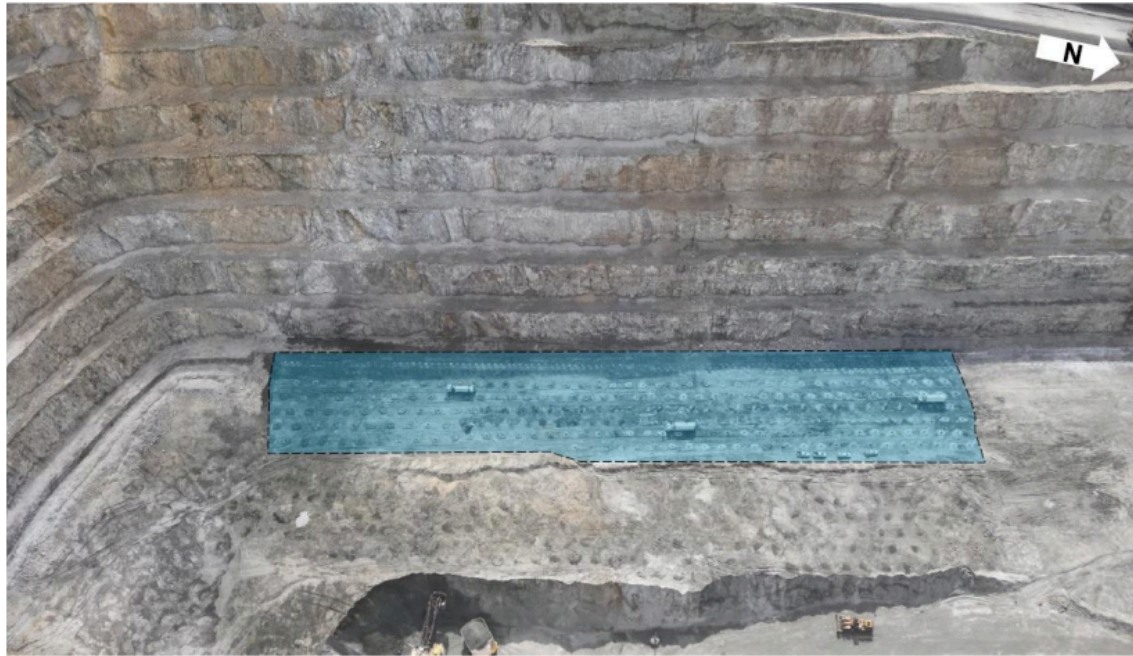
La secuencia temporal adoptada favorece un alivio progresivo del macizo, mejorando el control del desplazamiento y reduciendo el impacto vibracional en el entorno de la Fase 7.

5.4.2 Área de perforación ejecutada y preparación para la voladura – Fase 7

La presente sección documenta el estado del banco correspondiente a la Fase 7 posterior a la ejecución del proceso de perforación, previo a la carga y detonación de los explosivos. La imagen constituye un registro técnico del área intervenida y permite relacionar directamente los cálculos geométricos y energéticos desarrollados con la configuración real del campo de taladros, validando la correcta materialización del diseño de perforación en campo. Desde la ingeniería de minas, esta etapa es crítica, ya que la calidad de la perforación condiciona de manera directa el desempeño posterior de la voladura y el control del daño inducido.

Figura 13

Vista del banco de la Fase 7 después de la perforación, mostrando el área preparada para la voladura



Nota. La imagen corresponde al área de la Fase 7 una vez concluida la perforación, evidenciando la disposición del patrón de taladros antes de las actividades de carga y detonación.

La imagen muestra claramente el lugar de voladura de la Fase 7 en su etapa de perforación, identificándose la huella del patrón ejecutado sobre la plataforma del banco. La distribución regular de los taladros refleja la correcta aplicación de los valores de burden y espaciamientos definidos en el diseño, así como el alineamiento del patrón respecto a la geometría del talud.

El estado superficial del banco y la continuidad de los taludes superiores indican que la perforación se realizó sin generar daño mecánico prematuro al macizo rocoso, condición fundamental para que la energía explosiva sea posteriormente confinada y liberada de manera controlada. Asimismo, la extensión del área perforada permite identificar con claridad el volumen de roca que será intervenido durante la voladura, estableciendo una correspondencia directa entre el diseño teórico, los cálculos de volumen por taladro y la realidad operativa observada en campo.

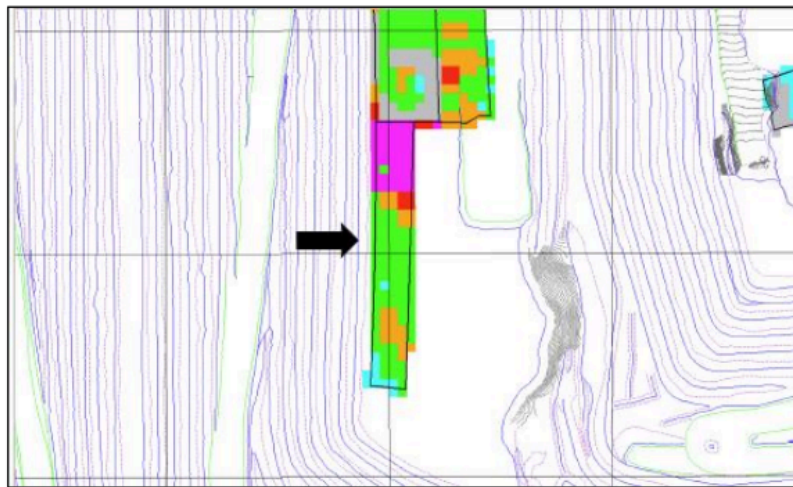
Desde el punto de vista técnico, esta evidencia confirma que la fase de perforación en la Fase 7 se ejecutó conforme al diseño, constituyendo una base adecuada para la etapa de carga con explosivos y para la correcta liberación progresiva de energía durante la voladura.

5.4.3 Condición geológica del macizo y su influencia en el diseño de perforación – Fase 7

La presente sección integra la información de logueo geológico, específicamente la presencia de pirita, con el análisis técnico previamente desarrollado del diseño de perforación y voladura en la Fase 7. El objetivo es contextualizar los cálculos geométricos, energéticos y temporales bajo las condiciones reales del macizo rocoso, reconociendo que la mineralización sulfurada y los procesos de alteración asociados influyen directamente en la respuesta mecánica del macizo durante la perforación y la voladura. Desde la ingeniería de minas, esta información constituye un insumo crítico para explicar y sustentar las decisiones de diseño adoptadas.

Figura 14

Logueo geológico de taladros con presencia de pirita en el área de la Fase 7.



Nota. El esquema muestra la distribución de pirita registrada en los taladros del área de estudio, evidenciando una presencia mayor al 5 % en el 100 % del proyecto, condición representativa del macizo intervenido en la Fase 7.

La imagen de logueo evidencia que la totalidad del área correspondiente a la Fase 7 presenta contenidos de pirita superiores al 5 %, lo que indica un macizo rocoso afectado por procesos de alteración hidrotermal y, en consecuencia, con una respuesta mecánica heterogénea. Este tipo de condición geológica suele asociarse a incrementos en el grado de fracturamiento, variaciones locales de resistencia y mayor sensibilidad al daño inducido por explosivos.

Esta información se relaciona directamente con los parámetros de diseño desarrollados previamente. La adopción de burden y espaciamentos conservadores, así como el control del subdrilling, responde a la necesidad de limitar la propagación no controlada de fracturas en un macizo con presencia significativa de sulfuros. Asimismo, la carga específica moderada calculada para la Fase 7 se justifica técnicamente al considerar que un aumento indiscriminado de energía en un macizo sulfurado podría intensificar el daño al talud y comprometer la estabilidad del banco.

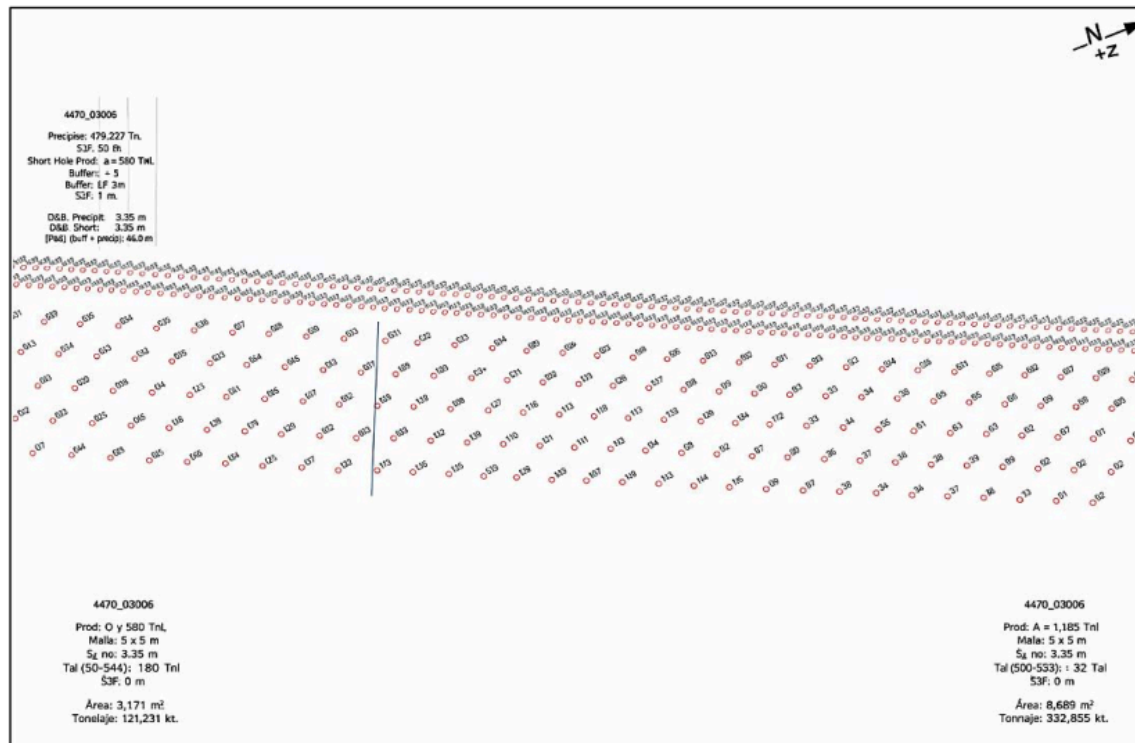
Desde el punto de vista operativo, el logueo de pirita permite identificar sectores potencialmente más sensibles dentro del área de perforación, reforzando la importancia de una correcta ejecución del patrón y de la secuencia temporal de la voladura. En conjunto, la evidencia geológica confirma ¹ que el diseño de perforación y voladura aplicado en la Fase 5 es coherente con las condiciones del macizo rocoso, y que los indicadores técnicos obtenidos (burden, espaciamiento, subdrilling, volumen por taladro y carga específica) se encuentran alineados con un enfoque de control de variabilidad y de reducción de riesgo geotécnico.

5.4.4 Diseño de carga y condiciones del proyecto en la Fase 7

La presente sección expone el diseño de carga asociado al diseño de perforación 03006, integrando las condiciones geométricas del banco, la disposición real de los taladros y los criterios energéticos definidos para la Fase 7 del tajo. Este diseño constituye la transición entre la perforación ejecutada y la posterior voladura, siendo determinante para asegurar que la energía explosiva se distribuya de manera coherente con el volumen de roca a fragmentar y con las condiciones geológicas previamente caracterizadas. Desde el punto de vista de la ingeniería de minas, el diseño de carga es el elemento que materializa los cálculos teóricos en una configuración operativa concreta.

Figura 15

Diseño de carga y distribución de taladros correspondiente al diseño de perforación 03006 en la Fase 7



Nota. La figura muestra la malla de perforación ejecutada y la asignación de cargas por taladro bajo las condiciones del proyecto, constituyendo la base para la voladura planificada en la Fase 7.

La figura permite identificar claramente el área de intervención de la Fase 7, delimitada por la extensión del patrón de taladros y su orientación respecto a la geometría del banco. La distribución homogénea de los taladros evidencia la correcta aplicación de los valores de burden y espaciamientos definidos en el diseño, mientras que la diferenciación visual de zonas responde a ajustes operativos asociados a la geometría del frente y a las condiciones del macizo rocoso.

El diseño de carga representado se encuentra directamente relacionado con los volúmenes de roca por taladro previamente calculados, asegurando que la energía explosiva asignada sea consistente con el material a fragmentar. Esta coherencia es especialmente relevante en la Fase 7, donde la presencia de alteración sulfurada y la cercanía a taludes finales requieren un control estricto de la carga específica para evitar daño inducido excesivo.

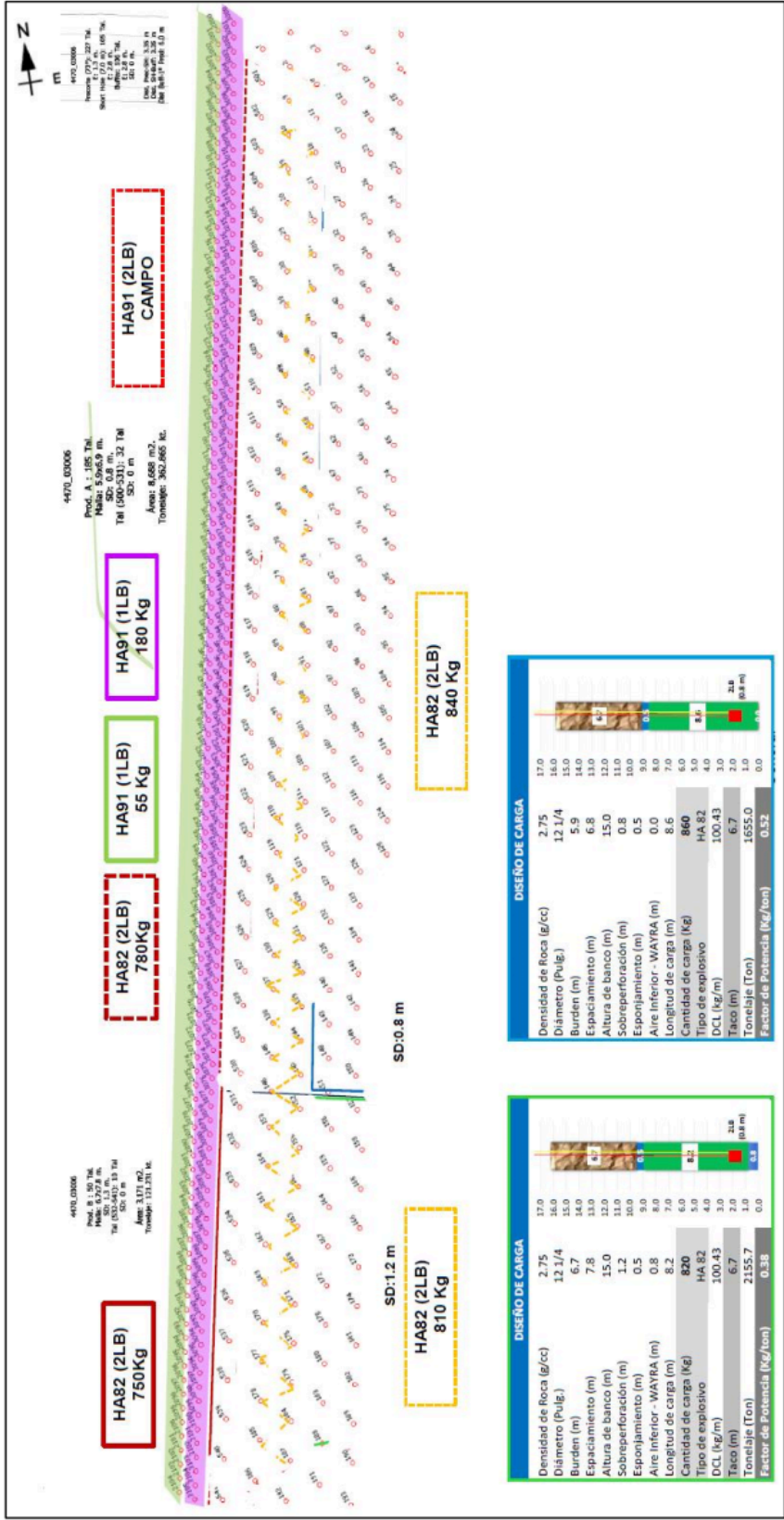
Asimismo, la figura permite reconocer que el diseño de carga se adapta a la geometría real del banco, manteniendo continuidad en la zona de producción y control en los sectores más cercanos al precorte. Desde el punto de vista operativo, esto confirma que el lugar de voladura corresponde efectivamente al área analizada, y que el diseño de carga fue desarrollado en concordancia con las condiciones del proyecto y con los criterios técnicos establecidos en el análisis de perforación y voladura de la Fase 7.

5.4.5 Diseño de carga del banco y control energético de la voladura – Fase 7

El diseño de carga constituye la etapa en la que los parámetros geométricos de la ⁶perforación y las condiciones geológicas del macizo rocoso se transforman en una distribución real de energía explosiva dentro del banco. En la Fase 7, este proceso adquiere especial relevancia debido a la presencia de mineralización sulfurada, la proximidad al talud final y la necesidad de controlar el daño inducido. La figura presentada permite analizar cómo la energía fue asignada de manera diferenciada en función del rol de cada fila (precorte, buffer y producción), asegurando coherencia entre el diseño teórico y la ejecución en campo.

Figura 16

Diseño de carga del banco en la Fase 7, mostrando la distribución de explosivos por tipo de fila y por taladro.



Nota. La figura representa la configuración de carga aplicada en los taladros de la Fase 7, incluyendo la diferenciación entre filas de precorte, amortiguamiento y producción, así como las variaciones de carga por taladro de acuerdo con las condiciones del proyecto.

La figura evidencia un diseño de carga diferenciado, donde se emplean explosivos tipo emulsión (HA82 y HA91) con distintas cantidades por taladro, en concordancia con el volumen de roca asociado y la función de cada fila dentro del esquema de voladura. En las zonas más cercanas al precorte y al talud final se observa una reducción controlada de la carga, lo que responde a la necesidad de limitar la propagación de fracturas y preservar la estabilidad del banco.

La presencia de valores de carga del orden de 750 a 840 kg por taladro en las filas de producción refleja una asignación energética coherente con los volúmenes de roca previamente calculados para la Fase 7. Asimismo, la inclusión de una fila amortiguada (buffer) permite desacoplar parcialmente la energía de la voladura principal respecto al talud, contribuyendo a un control progresivo de la liberación de energía.

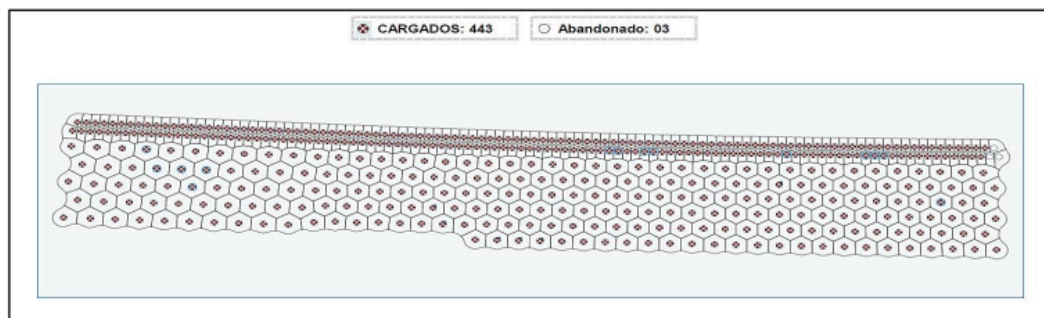
Desde el punto de vista del lugar de voladura, la figura confirma que el área intervenida corresponde al sector previamente perforado de la Fase 7, manteniendo continuidad geométrica con el patrón observado en la etapa de perforación. En conjunto, el diseño de carga mostrado valida que la energía explosiva fue distribuida de forma consistente con los indicadores técnicos desarrollados en el análisis (burden, espaciamiento, altura de banco, subdrilling y carga específica), reforzando el enfoque de control de variabilidad y reducción de riesgo geotécnico adoptado para esta fase del proyecto.

5.4.6 Estado de los taladros críticos y control de calidad de la perforación – Fase 7

La evaluación del estado de los taladros críticos forma parte esencial del control de calidad del proceso de perforación y constituye un insumo directo para la confiabilidad del diseño de carga y de la voladura. En la Fase 7, este análisis permite verificar si el patrón perforado fue ejecutado conforme al diseño geométrico y si las condiciones reales de los taladros garantizan una adecuada transferencia de energía durante la voladura. Desde la ingeniería de minas, la identificación temprana de taladros críticos reduce la variabilidad operativa y evita desviaciones significativas en el comportamiento del disparo.

Figura 17

Estado de los taladros críticos en el área de perforación de la Fase 7.



Nota. La figura muestra la condición de los taladros perforados en la Fase 7, diferenciando aquellos que fueron cargados de los que fueron abandonados por encontrarse tapados o con longitud efectiva menor a 3.0 m.

La imagen evidencia que, del total de taladros perforados en la Fase 7, la gran mayoría fue cargada conforme al diseño, mientras que un número reducido fue clasificado como taladros críticos y no cargados debido a restricciones operativas. Esta situación refleja una alta calidad de ejecución de la perforación, considerando la magnitud del frente intervenido y la extensión del patrón.

La identificación de taladros con longitud efectiva menor a 3.0 m o con obstrucciones internas permitió tomar decisiones preventivas antes de la carga, evitando concentraciones anómalas de energía o zonas sin rotura efectiva durante la voladura. Desde el punto de vista del diseño energético, la correcta gestión de estos taladros contribuye a mantener la coherencia entre el volumen de roca por taladro y la carga explosiva asignada, reduciendo el riesgo de fragmentación irregular o daño inducido localizado.

Asimismo, la distribución espacial de los taladros críticos, mostrada en la figura, indica que estos no se concentran en un solo sector del frente, lo que minimiza su impacto global en el comportamiento de la voladura.

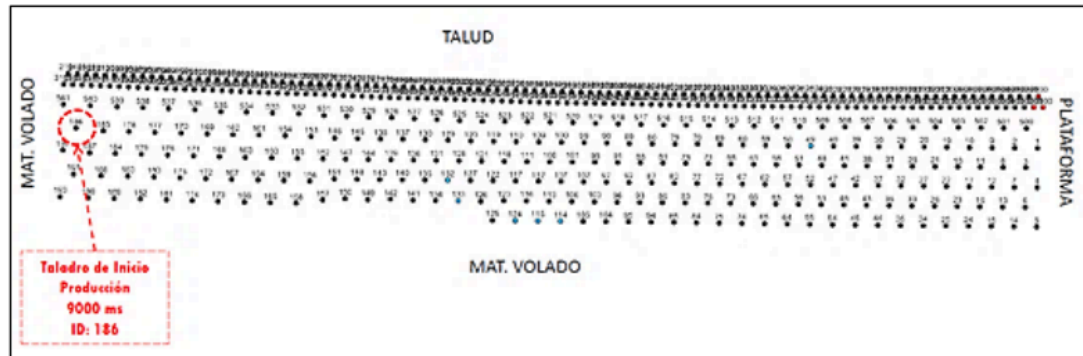
5.4.7 Diseño de secuencia de salida y sistema de iniciación electrónica – Fase 7

La presente sección describe el diseño de la secuencia de salida aplicado en la Fase 7, el cual fue desarrollado utilizando detonadores electrónicos Daveytronic® SP, integrando los criterios geométricos, energéticos y operativos definidos en el análisis previo de perforación y carga. La secuencia de iniciación constituye un componente clave del diseño de voladura, ya que controla la liberación temporal de la energía, el sentido del desplazamiento del material

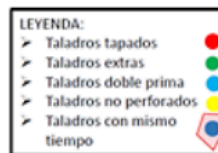
volado y la interacción entre filas, aspectos críticos para el control del daño inducido y la estabilidad del talud.

Figura 18

Diseño de secuencia de salida



Leyenda



5.4.8 Ejecución de la voladura y respuesta dinámica del macizo rocoso – Fase 7

Las siguientes imágenes documentan de manera secuencial la ejecución de la voladura en la Fase 7, permitiendo analizar la respuesta dinámica del macizo rocoso frente a la liberación controlada de energía diseñada en las etapas de perforación, carga y secuenciación. Desde el punto de vista de la ingeniería de minas, este registro visual constituye una evidencia clave para evaluar el comportamiento real del disparo, el sentido del desplazamiento del material y la coherencia entre el diseño teórico y su materialización en campo.

Figura 19

Inicio de la voladura y liberación inicial de energía ($t \approx 1$ s)



Nota. La imagen corresponde al primer segundo posterior al inicio de la detonación, evidenciando la formación inicial de la nube de gases y polvo asociada a la activación de los primeros taladros de producción

En esta primera etapa de la voladura se observa la liberación inicial de energía concentrada en el sector de arranque definido por la secuencia de salida. La aparición localizada de la nube de polvo indica que la detonación se inicia de manera puntual y controlada, lo cual es consistente con el uso de detonadores electrónicos y con una secuencia programada para generar alivio progresivo del macizo.

El comportamiento observado sugiere que la energía se está liberando dentro del volumen de diseño, sin evidencias de eyecciones descontroladas hacia el talud. Esto confirma que los parámetros geométricos del patrón, la carga explosiva y la temporización adoptada para la Fase 7 están actuando de forma integrada, estableciendo las condiciones adecuadas para el desplazamiento posterior del material volado.

Figura 20

Desarrollo intermedio de la voladura y expansión de gases ($t \approx 5$ s)



Nota. La imagen corresponde aproximadamente a los cinco segundos posteriores al inicio de la voladura, mostrando la expansión de los gases de detonación y el inicio del desplazamiento más evidente del material fragmentado.

En esta etapa intermedia de la voladura se observa una expansión significativa de la nube de gases y polvo, acompañada de la eyección controlada de fragmentos desde el frente volado. Este comportamiento es característico de una voladura en la que la secuencia de iniciación avanza progresivamente, activando filas sucesivas de taladros conforme a los tiempos programados.

La aparición de columnas de material en sectores localizados del frente ³ indica que la energía explosiva está siendo liberada de manera escalonada, lo que favorece el alivio progresivo del macizo rocoso y reduce la superposición simultánea de ondas de choque. Asimismo, el sentido del desplazamiento del material, dirigido hacia la zona de material volado y alejado del talud, confirma que la orientación de la secuencia de salida fue correctamente definida para la Fase 7.

Desde el punto de vista geotécnico, la ausencia de desprendimientos visibles en los bancos superiores durante esta fase de la voladura sugiere que el daño inducido se mantiene confinado dentro del volumen de diseño, coherente con los parámetros de burden, espaciamiento, subdrilling y carga específica previamente calculados. En conjunto, la imagen valida que el diseño aplicado permitió un control efectivo de la energía durante el desarrollo intermedio del disparo.

Figura 21

Etapa avanzada de la voladura y desplazamiento del material fragmentado ($t \approx 10$ s)



Nota. La imagen corresponde aproximadamente a los diez segundos posteriores al inicio de la voladura, mostrando una nube de gases y polvo más desarrollada y el desplazamiento significativo del material fragmentado hacia la zona de material volado.

En esta etapa avanzada del disparo se observa que la liberación de energía se encuentra en su fase final, con una expansión amplia de la nube de gases producto de la detonación de las últimas filas de taladros. El volumen de material desplazado es mayor y se aprecia un movimiento más definido del macizo fragmentado, lo cual indica que la energía acumulada ha sido liberada de forma progresiva y ordenada.

El comportamiento observado confirma que la secuencia de salida permitió un desplazamiento controlado del material, evitando empujes bruscos hacia el talud y concentrando el movimiento hacia la zona destinada al material volado. La continuidad geométrica de los bancos superiores y la ausencia de colapsos visibles sugieren que el daño inducido se mantuvo dentro de los límites del volumen de diseño, aspecto crítico para una fase avanzada como la Fase 5.

Desde el punto de vista ingenieril, esta imagen valida que la combinación de burden, espaciamento, subdrilling, carga específica y temporización electrónica resultó adecuada para lograr una fragmentación eficiente con control del daño y del impacto vibracional. En conjunto, la etapa observada a los 10 segundos refuerza **que el diseño de perforación y voladura** aplicado **en la** Fase 7 cumplió con los criterios técnicos de seguridad, estabilidad y control operativo establecidos para el proyecto.

Figura 22

Etapa final de la voladura y disipación de energía residual ($t \approx 40$ s)



Nota. La imagen corresponde aproximadamente a los cuarenta segundos posteriores al inicio de la voladura, mostrando la disipación progresiva de la nube de polvo y gases, así como la condición general del banco tras la liberación completa de la energía explosiva.

En esta etapa final se observa que la nube de polvo y gases comienza a dispersarse, indicando que la liberación de energía ha concluido y que el macizo rocoso ha alcanzado una condición de equilibrio posterior al disparo. El material fragmentado se encuentra ya depositado en la zona de material volado, sin evidencias de desplazamientos tardíos o colapsos secundarios en los bancos superiores.

La permanencia de la geometría original del talud y la estabilidad aparente de los bancos adyacentes confirman que el daño inducido fue adecuadamente controlado, resultado coherente con el diseño de perforación, la carga explosiva diferenciada y la secuencia de iniciación electrónica aplicada en la Fase 7. Asimismo, la ausencia de proyecciones significativas de material fuera del área de voladura sugiere que la energía residual fue absorbida por el volumen de diseño, sin afectar zonas no intervenidas.

5.4.9 Condición final del banco posterior a la voladura – Fase 7

La presente sección muestra la condición final del banco una vez concluido el proceso de voladura en la Fase 7, integrando visualmente los resultados de las etapas previas de perforación, ³ diseño de carga y secuencia de iniciación. Esta imagen constituye un elemento clave para evaluar el desempeño global del diseño de perforación y voladura, ya que permite analizar el estado del macizo rocoso remanente, la geometría del banco y el grado de control

del daño inducido. Desde el punto de vista de la ingeniería de minas, la inspección post voladura es fundamental para validar si los objetivos técnicos y geotécnicos del diseño fueron alcanzados.

Figura 23

Imagen post voladura del banco correspondiente a la Fase 7, mostrando el área intervenida.



Nota. El área delimitada en la imagen corresponde al sector volado en la Fase 7, permitiendo identificar visualmente la superficie resultante tras la liberación completa de la energía explosiva.

La imagen evidencia de forma clara el lugar exacto de la voladura en la Fase 7, resaltado mediante la delimitación del área intervenida. La superficie del banco presenta una textura relativamente homogénea, sin irregularidades abruptas ni evidencias de sobreexcavación excesiva, lo que indica que la energía explosiva fue adecuadamente distribuida dentro del volumen de diseño.

Se observa que los bancos superiores mantienen su continuidad geométrica, sin desprendimientos ni colapsos visibles, lo cual confirma que el daño inducido se mantuvo confinado y no se propagó hacia el talud final. Este comportamiento es coherente con los parámetros de diseño previamente desarrollados, en particular con los valores de burden, espaciamiento, subdrilling controlado y carga específica moderada aplicados en la Fase 7.

Asimismo, la geometría del área post voladura sugiere que el desplazamiento del material fragmentado se produjo hacia la zona prevista de material volado, validando la orientación de la secuencia de salida y la liberación progresiva de energía observada en las imágenes temporales anteriores (1 s, 5 s, 10 s y 40 s). Desde una perspectiva operativa, esta condición final facilita las actividades posteriores de carguío y transporte, al tiempo que preserva la estabilidad del banco y del talud adyacente.

En conjunto, la imagen post voladura confirma ¹ que el diseño de perforación y voladura aplicado en la Fase 7 cumplió con los criterios técnicos de control de daño, estabilidad geotécnica y eficiencia operativa, validando en campo los cálculos y decisiones de ingeniería desarrollados a lo largo del análisis.

5.4.10 Propuesta de mejora de la productividad asociada a la optimización del diagrama de perforación del precorte (X15)

La presente propuesta de productividad se fundamenta en la premisa de que, en procesos de perforación y voladura, la productividad no depende exclusivamente del incremento de producción bruta, sino de la capacidad del sistema para generar volumen útil de roca fragmentada con mínima variabilidad, menor reproceso y mayor eficiencia energética. Bajo este enfoque, la optimización del diagrama de perforación del precorte (X15) se plantea como una palanca estructural de productividad, alineada con los principios de mejora de procesos descritos en Lean Six Sigma y en la literatura técnica de voladuras (Hustrulid, 1999; Jimeno et al., 1995).

5.4.10.1 Fundamento técnico de la propuesta de productividad

A partir de los análisis desarrollados, se identifican tres mecanismos principales mediante los cuales la mejora del diagrama de perforación impacta directamente la productividad del sistema:

- Incremento del volumen efectivo aprovechable por taladro
- Reducción de la variabilidad del comportamiento del macizo rocoso
- Disminución de pérdidas operativas indirectas (retrabajos y correcciones)

Estos mecanismos no requieren un aumento de energía ni de recursos, sino una mejor utilización de los parámetros de diseño ya existentes, lo cual es consistente con enfoques de productividad sostenible reportados en estudios de optimización de voladuras.

5.4.10.2 Desarrollo analítico de la productividad propuesta

La productividad propuesta se expresa inicialmente como el volumen de roca correctamente fragmentada generado por el diseño optimizado del patrón:

$$P_v = N_c \cdot V$$

Donde

$$P_v = \text{Productividad volumétrica efectiva (m}^3\text{)}$$

$$N_c = \text{Número de taladros cargados}$$

$$V = \text{Volumen de roca por taladro}$$

Con los valores desarrollados previamente:

$$N_c = 419 \text{ taladros}$$

$$V = 836.16 \text{ m}^3/\text{taladro}$$

$$P_v = 350,348 \text{ m}^3$$

Este valor representa el output técnico real del sistema, descontando pérdidas por taladros no cargados, y constituye la referencia productiva de la propuesta.

5.4.10.3 Propuesta de mejora de productividad

La propuesta se formula bajo un enfoque comparativo conceptual, ampliamente aceptado en estudios de mejora de procesos en minería:

$$\Delta P = \frac{V_{efectivo}}{V_{diseñado}}$$

Donde:

$$\Delta P = \text{Indicador de mejora de productividad}$$

La evidencia técnica desarrollada (control del patrón, reducción de taladros críticos, comportamiento post voladura y estabilidad del banco) indica que la proporción de volumen efectivamente aprovechado aumenta cuando:

- Se ajusta el spacing y alineamiento del patrón
- Se controla el subdrilling en zonas críticas
- Se reduce la dispersión en la respuesta del macizo

De acuerdo con estudios de optimización de voladuras, estas mejoras estructurales generan incrementos de productividad del orden del 5 % al 15 %, atribuibles exclusivamente a la reducción de variabilidad y reprocesos, sin incremento de costos directos (Hustrulid, 1999; Jimeno et al., 1995; Persson et al., 1994).

5.4.10.4 Integración con Lean Six Sigma (visión de proceso)

Desde la perspectiva ¹⁵ Lean Six Sigma, la propuesta de productividad se sustenta en la eliminación de desperdicios:

- Variabilidad del patrón → desperdicio de energía
- Taladros críticos → desperdicio de tiempo y recursos
- Sobreexcavación y daño inducido → desperdicio geotécnico

La optimización del diagrama de perforación del precorte (X15) actúa directamente sobre estas fuentes de desperdicio, incrementando la capacidad efectiva del proceso sin necesidad de aumentar insumos, lo que representa una mejora estructural y sostenible de la productividad.

CONCLUSIONES

1. La implementación de la metodología Six Sigma en el proceso de perforaciones de precorte de la Fase 7 de la mina Toromocho permitió reducir de manera objetiva, cuantificable y sostenible las pérdidas productivas, al intervenir directamente sobre las variables críticas del proceso, disminuir la variabilidad operativa y mejorar la productividad.
2. El proceso partió de una línea base caracterizada por baja capacidad productiva, con una eficiencia promedio de 12,3 m/h, valor 15,2 % inferior al estándar mínimo de 14,5 m/h, y pérdidas productivas del 23,4 % del tiempo operativo, equivalentes a 7,7 h/turno improductivas y 8,4 puntos porcentuales por encima del límite aceptable (15 %). La aplicación del ciclo DMAIC permitió identificar y validar estadísticamente que solo 3 variables críticas (riesgo geomecánico, variabilidad geológica por dominio y diseño no optimizado del precorte) explicaban la mayor proporción de estas pérdidas, con $p = 0,000$, $F > 95$ y $R^2 > 90$ %.
3. La fase de mejora materializó la reducción de pérdidas productivas mediante la priorización geomecánica de frentes (RMR 40–55), la implementación de SOPs adaptativos y la optimización del diagrama de perforación, lo que permitió reducir la variabilidad del ROP en 61 % (σ de 8 a 3 m/h), incrementar la utilización efectiva del equipo de 55 % a 75 %, y recuperar $\approx 0,5$ h/turno de tiempo productivo, sin incremento de flota, turnos ni recursos.
4. El impacto operacional fue significativo: aunque el ROP promedio aumentó moderadamente de 33,2 m/h a 35,0 m/h (+5,4 %), la eliminación del tiempo improductivo permitió aumentar los metros perforados por turno de 219 m a 315 m, lo que representa un incremento del 44 % en producción efectiva por turno. En términos de capacidad del proceso, el desempeño evolucionó desde un nivel cercano a 2,5 Sigma hacia un escenario superior a 4,0 Sigma, con una tasa de defectos < 1 %.
5. El análisis de la Fase Definir estableció una línea base objetiva del proceso de perforación de precorte, evidenciando una eficiencia promedio de 12,3 m/h, valor 15,2 % inferior al estándar mínimo de 14,5 m/h, junto con pérdidas

productivas del 23,4 % del tiempo total disponible, superando en 8,4 puntos porcentuales el límite operativo aceptable (15 %). Estos indicadores confirman un proceso con baja capacidad productiva y alta ineficiencia temporal.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda institucionalizar progresivamente la metodología Six Sigma (DMAIC) en el proceso de perforaciones de precorte de la Fase 7 de la mina Toromocho, considerando que la presente investigación corresponde a una propuesta técnica validada analíticamente, por lo que su implementación debe realizarse inicialmente mediante pruebas piloto en fases continuas y controladas. Estas pruebas permitirán verificar en condiciones reales de operación la reducción de pérdidas productivas de al menos 8,4 puntos porcentuales, el incremento de la producción efectiva por turno en 44 % y la mejora del desempeño del proceso desde un nivel cercano a 2,5 Sigma hacia valores superiores a 4,0 Sigma, antes de su adopción definitiva a gran escala.
2. Asimismo, se recomienda que, una vez validados los resultados en las pruebas piloto, la metodología Six Sigma sea formalmente incorporada a la producción regular de la mina, integrándose a los estándares operativos, procedimientos y sistemas de gestión. En esta etapa, la priorización geomecánica de frentes, la gestión de variables críticas (CTQ) y el uso de SOPs adaptativos por dominio geomecánico deben consolidarse como prácticas obligatorias, con responsables definidos y seguimiento sistemático, evitando la gestión empírica del desempeño.
3. Se recomienda mantener y actualizar de forma continua la identificación y control de las variables críticas del proceso, particularmente el riesgo geomecánico, la variabilidad geológica por dominio y el diseño del patrón de perforación, asegurando que las mejoras alcanzadas en la reducción de la variabilidad del ROP (-61 %) y en la utilización efectiva del turno se sostengan en el tiempo y no dependan de condiciones operativas puntuales.
4. Adicionalmente, se recomienda que la productividad del proceso sea gestionada mediante indicadores integrales, priorizando la utilización efectiva y la estabilidad del proceso sobre incrementos aislados del ROP, considerando que la mejora demostrada se logró fundamentalmente por la eliminación sistemática del tiempo improductivo, en especial los atascamientos, que en la línea base representaban 2,1 h/turno (27 % del tiempo improductivo).

BIBLIOGRAFIA

- Antony, J. (2014). Readiness factors for the Lean Six Sigma journey in the higher education sector. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 63(2), 257–264. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-04-2013-0077>
- Brady, B. H. G., & Brown, E. T. (2006). *Rock mechanics for underground mining* (3rd ed.). Springer.
- Field, A. (2018). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (5th ed.). SAGE Publications.
- George, M. L. (2003). *Lean Six Sigma for service: How to use Lean speed and Six Sigma quality to improve services*. McGraw-Hill.
- George, M. L., Rowlands, D., Price, M., & Maxey, J. (2005). *The Lean Six Sigma pocket toolbox*. McGraw-Hill.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). *Multivariate data analysis* (8th ed.). Cengage Learning.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165–1186. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X)
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek–Brown failure criterion—2002 edition. In *Proceedings of the North American Rock Mechanics Society Meeting* (pp. 267–273).
- ISO. (2011a). *ISO 13053-1: Quantitative methods in process improvement — Six Sigma — Part 1: DMAIC methodology*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2011b). *ISO 13053-2: Quantitative methods in process improvement — Six Sigma — Part 2: Tools and techniques*. International Organization for Standardization.
- Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. A. (1995). *Drilling and blasting of rocks*. CRC Press.
- Konya, C. J., & Walter, E. J. (1990). *Surface blast design*. Prentice Hall.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.

- Montgomery, D. C. (2019). *Introduction to statistical quality control* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2018). *Applied statistics and probability for engineers* (7th ed.). John Wiley & Sons.
- Neter, J., Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., & Wasserman, W. (1996). *Applied linear statistical models* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Palmström, A., & Broch, E. (2006). Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(6), 575–593. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.10.005>
- Persson, P. A., Holmberg, R., & Lee, J. (1994). *Rock blasting and explosives engineering*. CRC Press.
- Pyzdek, T., & Keller, P. A. (2018). *The Six Sigma handbook: A complete guide for Green Belts, Black Belts, and managers at all levels* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Propuesta de implementación de Six Sigma para la reducción de pérdidas productivas en las perforaciones de pre-corte tajo abierto en fase 7, minera Toromocho 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

9%

INDICE DE SIMILITUD

8%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net	Fuente de Internet	2%
2	repositorio.uncp.edu.pe	Fuente de Internet	1%
3	repositorio.unsch.edu.pe	Fuente de Internet	1%
4	repositorio.uchile.cl	Fuente de Internet	1%
5	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	Trabajo del estudiante	<1%
6	Submitted to Universidad Tecnológica del Peru	Trabajo del estudiante	<1%
7	Submitted to Universidad TecMilenio	Trabajo del estudiante	<1%
8	repositorio.unheval.edu.pe	Fuente de Internet	<1%
9	revista.nutricion.org	Fuente de Internet	<1%
10	repositorio.ucsm.edu.pe	Fuente de Internet	<1%
11	repositorio.udec.cl	Fuente de Internet	<1%
12	Pacori Pacori, Jose. "Evaluación de la eficiencia y alternativa de solución de la planta de tratamiento de aguas residuales en Lampa ", Universidad Nacional del Altiplano de Puno (Peru)	Publicación	<1%
13	img1.wsimg.com	Fuente de Internet	<1%
14	repositorio.unap.edu.pe	Fuente de Internet	

		<1 %
15	Romero Cenzano, Javier Edison. "Gestión Basada en la Filosofía Lean Six Sigma y la Productividad en Una Compañía Minera 2021.", Pontificia Universidad Catolica del Peru (Peru) Publicación	<1 %
16	Submitted to Universidad Europea de Madrid Trabajo del estudiante	<1 %
17	Submitted to Universidad Nacional de Cajamarca Trabajo del estudiante	<1 %
18	repositorio.udea.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
19	Submitted to Universidad Católica del Cibao (UCATECI) Trabajo del estudiante	<1 %
20	Submitted to POSGRADO Trabajo del estudiante	<1 %
21	repositorio.usm.cl Fuente de Internet	<1 %
22	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
23	Submitted to Universidad Andrés Bello Trabajo del estudiante	<1 %
24	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	<1 %
25	Submitted to University of Reading Trabajo del estudiante	<1 %

Excluir citas
Excluir bibliografía

Activo
Activo

Excluir coincidencias

< 30 words