

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL SISTEMA DE

PROCESAMIENTO DIGITAL SPLIT ONLINE

EN EL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

EN UN PAD DE CIANURACIÓN

TESIS

Presentada por:

Bach. Jimmy Yair Villanueva Mamani

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA – PERÚ

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL SISTEMA
DE PROCESAMIENTO DIGITAL SPLIT ONLINE
EN EL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO
EN UN PAD DE CIANURACIÓN**

Tesis sustentada y aprobada el día 13 de septiembre de 2024, estando integrado el Jurado Calificador por:

PRESIDENTE


:
Dr. Freddy Felipe Cori Nina

SECRETARIO


:
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

VOCAL


:
Dr. Luis Fortunato Caso Palpa

ACCESITARIO


:
MSc. Edgardo Teófilo Valdez Cortijo

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **LUIS FORTUNATO CASO PALPA** docente de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, identificado con **DNI 06452883** y **Código ORCID 0000-0003-4986-5147** como asesor designado para realizar la evaluación a través del software de similitud textual **TURNITIN** de la **TESIS**, modalidad de titulación acreditada por Resolución de Facultad **N° 8849-2024-FAIN/UNJBG**, certifica que el informe titulado: **EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL SISTEMA DE PROCESAMIENTO DIGITAL SPLIT ONLINE EN EL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN UN PAD DE CIANURACIÓN** presentado por el Bachiller **JIMMY YAIR VILLANUEVA MAMANI** para optar el **Título Profesional de Ingeniero Metalurgista**, cumple con lo establecido en el reglamento de originalidad y similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la evaluación realizada a través del software de similitud textual **TURNITIN** con **código de identificación de reporte de similitud oid: 23228:384646849** cuenta con el nivel de similitud que es permitido cuyo porcentaje es de **09%** por lo que doy fe de la veracidad y queda declarado no cometer el delito de falsedad genérica del contenido de la **TESIS** y está de acuerdo con el **NIVEL PERMITIDO**, para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repertorio repositorio institucional.

Firmo el presente certificado con fines de continuar con los trámites respectivos para su publicación.

Tacna, 22 de Agosto del 2025

Firma del Asesor

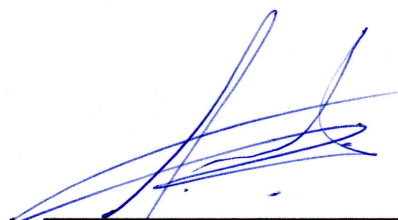


DNI: 06452883

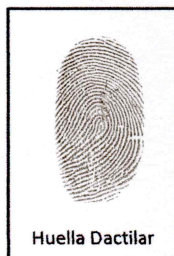


Nombres y Apellidos: **Luis Fortunato Caso Palpa**

Firma del Titulante



DNI: 71387872



Nombres y Apellidos: **JIMMY YAIR VILLANUEVA MAMANI**

Dedicatoria

Gracias a Dios por darme un sentido a mi vida.

Con cariño y mucho amor para mi madre Benicia Mamani por sus palabras de aliento para continuar la elaboración de esta investigación, mi hija Gaela Villanueva por la motivación constante, a mi pareja y futura esposa Nereida Venturo por el apoyo incondicional en mi vida.

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar, a mi asesor el Dr. Ing. Luis Caso Palpa, por confiar en mi propuesta y acompañar con sus conocimientos en este largo camino.

A mi casa de estudios la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, en especial a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, los cuales inspiraron y contribuyeron en potenciar mi profesión.

A mi madre y mi pareja por contagiarme de sus fortalezas y su apoyo incondicional.

Índice temático

DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
ÍNDICE TEMÁTICO	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FÍGURAS	xi
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I.....	3
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	3
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Identificación y Formulación del problema de investigación	5
1.3 Justificación e importancia de la investigación.	6
1.3.1 Justificación técnica.....	6
1.3.2 Justificación económica.....	7
1.3.3 Justificación práctica	7
1.3.4 Importancia del estudio	7
1.4 Objetivos.....	8
1.4.1 Objetivo general	8
1.4.2 Objetivos específicos.....	8

1.5	Hipótesis	8
1.5.1	Hipótesis general	8
1.5.2	Hipótesis específicas	9
1.6	Variables	9
1.6.1	Identificación de las variables	9
1.6.2	Caracterización de las variables	9
1.6.3	Definición operacional de las variables.....	10
1.7	Limitaciones de la investigación	11
1.8	Descripción de las características de la investigación.....	11
CAPITULO II.....		12
MARCO TEÓRICO		12
2.1	Antecedentes del estudio	12
2.1.1	Antecedentes internacionales	12
2.1.2	Antecedentes nacionales.....	13
2.2	Bases teóricas	15
2.2.1	Comminución	15
2.2.2	Granulometría.....	17
2.2.3	Chancado	18
2.2.4	Lixiviación.....	19
2.2.5	Tipos de lixiviación	19
2.2.6	Lixiviación del oro	20

2.2.7	Descripción del sistema Split Online	21
2.2.8	Componentes del sistema de monitoreo Split Online.....	22
2.2.9	Instalación y escalamiento del sistema Split Online	23
2.2.10	Delineación de fragmentos	25
2.2.11	Cálculo de curva de tamaños	26
2.2.12	Exportación de los resultados	28
2.2.13	Geología local.....	29
2.2.14	Alteración hidrotermal.....	30
2.2.15	Mineralización	32
2.2.16	Caracterización geológica.....	32
2.2.17	Operación minera	33
2.2.18	Método de explotación	34
2.3	Definición de términos	35
CAPÍTULO III		37
MARCO METODOLÓGICO		37
3.1	Caracterización del diseño de investigación.....	37
3.2	Acciones y actividades para la ejecución del proyecto	37
3.3	Materiales e instrumentos.....	39
3.4	Población y muestra de estudio	39
3.5	Tratamiento de datos (análisis estadístico).....	39
CAPÍTULO IV		41

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1 Resultados.....	41
4.1.1 Lixiviación en columnas.....	41
4.1.2 Muestreo de calicatas	46
4.1.3 Análisis granulométrico.....	50
4.1.4 Resumen del análisis granulométrico	56
4.1.5 Porcentaje de finos según Split Online.....	58
4.1.6 Resumen estadístico de data Split Online.....	61
4.1.7 Muestreo en el corte de faja.....	63
4.2 Contrastación de hipótesis	67
4.3 Discusión	68
CONCLUSIONES.....	70
RECOMENDACIONES	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ANEXOS.....	76

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Operacionalización de variables</i>	10
Tabla 2 <i>Acciones y actividades para la ejecución del proyecto</i>	38
Tabla 3 <i>Codificación de columnas</i>	42
Tabla 4 <i>Características de las columnas</i>	42
Tabla 5 <i>Parámetros de riego</i>	43
Tabla 6 <i>Tiempo de lixiviación</i>	44
Tabla 7 <i>Recuperación calculada</i>	46
Tabla 8 <i>Resumen m-200</i>	56
Tabla 9 <i>Datos almacenados de lectura del Split Online</i>	60
Tabla 10 <i>Lectura del Split vs muestreo en faja</i>	64

Índice de figuras

Figura 1 <i>Etapas de chancado de minerales con diferentes máquinas</i>	16
Figura 2 <i>Distribución granulométrica</i>	18
Figura 3 <i>Monitoreo granulométrico por Split Online</i>	22
Figura 4 <i>Colocación de cámara para la toma de imágenes por Split Online</i> ...	23
Figura 5 <i>Fotografía de cámara en el frente de minado de pala</i>	25
Figura 6 <i>Delineación de fragmentos de rocas</i>	26
Figura 7 <i>Representación granulométrica por el Split Online</i>	27
Figura 8 <i>Interfaz de Split Online</i>	29
Figura 9 <i>Geología del proyecto Pucamarca</i>	30
Figura 10 <i>Sección vertical idealizada de alternaciones hidrotermales</i>	31
Figura 11 <i>Tipos de alteraciones</i>	33
Figura 12 <i>Unidades litológicas presentes</i>	34
Figura 13 <i>Correlación porcentaje de finos y tiempo de lixiviación</i>	44
Figura 14 <i>Extracción de oro según porcentaje de finos</i>	45
Figura 15 <i>Encharcamiento superficial</i>	47
Figura 16 <i>Zona de muestreo de calicatas</i>	48
Figura 17 <i>Muestreo de calicatas</i>	49
Figura 18 <i>Ruma de mineral muestreado</i>	49
Figura 19 <i>Equipos usados en el análisis de porcentaje de finos</i>	50
Figura 20 <i>Granulometría del punto 1A</i>	52
Figura 21 <i>Granulometría del punto 2A</i>	52
Figura 22 <i>Granulometría del punto 3A</i>	53
Figura 23 <i>Granulometría del punto 4A</i>	53
Figura 24 <i>Granulometría del punto 1B</i>	54

Figura 25 <i>Granulometría del punto 2B</i>	54
Figura 26 <i>Granulometría del punto 3B</i>	55
Figura 27 <i>Granulometría del punto 4B</i>	55
Figura 28 <i>Test de normalidad % malla-200</i>	57
Figura 29 <i>Test de normalidad P80</i>	57
Figura 30 <i>Transporte y acarreo del mineral</i>	58
Figura 31 <i>Lectura en línea del porcentaje de finos</i>	59
Figura 32 <i>Test de normalidad a data del Split Online</i>	61
Figura 33 <i>Resumen de estadísticos</i>	62
Figura 34 <i>Lugar de muestreo en faja transportadora</i>	63
Figura 35 <i>Correlación Split vs muestreo en faja</i>	65
Figura 36 <i>Coefficientes de regresión</i>	66
Figura 37 <i>Ploteo del ajuste</i>	66

Resumen

La estimación del contenido de finos en el mineral que ingresa a las celdas en los PADS de lixiviación de mineral aurífero desempeña un rol preponderante, si se considera que la presencia relativamente alta de mineral que supera la malla - 200 en el lecho de mineral a lixiviar tendrá efectos adversos sobre la extracción del oro, en ese sentido, se hace necesario contar con una herramienta tecnológica que permita el monitoreo continuo del perfil granulométrico del mineral que ingresa a lixiviación.

El sistema de procesamiento y monitoreo digital Split Online se presenta como una alternativa tecnológica para el análisis granulométrico en tiempo real, esta característica es la principal ventaja de este sistema sobre mediciones convencionales a través del uso de tamices. Sin embargo, resulta importante la contrastación de los valores reportados por este sistema a fin de comprobar y medir la exactitud de la medición entregada por el sistema. Los valores obtenidos en la presente investigación dan cuenta de un nivel de aproximación de 93,48 % en la contrastación de la estimación de finos ofrecidos por el sistema y la medición manual efectuada al mismo mineral que ingresa al proceso de lixiviación, así mismo se logra edificar un modelo matemático capaz de corregir los valores reportados por el sistema digital.

Palabras claves: P80, cianuración, PAD, pH, cianuro libre, calicata, ripio, chancado.

Abstract

The estimation of the fine content in the ore entering the cells in gold ore leaching PADS plays a preponderant role, considering that the relatively high presence of ore that exceeds the -200 mesh in the leaching ore bed will have adverse effects on gold extraction. In this sense, it is necessary to have a technological tool that allows for continuous monitoring of the granulometric profile of the ore entering leaching.

The Split Online digital processing and monitoring system is presented as a technological alternative for granulometric analysis in real time. This characteristic is the main advantage of this system over conventional measurements using sieves. However, it is important to contrast the values reported by this system in order to verify and measure the precision of the measurement provided by the system. The values obtained in this thesis shows a level of approximation of 93.48% in the contrast between the estimation of fines offered by the system and the manual measurement carried out on the same mineral that enters the leaching process. Likewise, it is possible to build a mathematical model capable of correcting the values reported by the digital system.

Keywords: P80, cianuración, PAD, pH, cianuro libre, calicata, ripio, chancado.

Introducción

La industria minera constantemente se enfrenta al desafío de lograr que sus procesos de producción sean lo más eficientes y rentables posibles. En este contexto, la estimación precisa del tamaño de las partículas minerales es esencial para el control y la optimización de procesos como la lixiviación. El sistema Split Online parece ser una herramienta prometedora para estimar el tamaño de partícula en tiempo real. No obstante, es necesario evaluar la precisión de las estimaciones generadas por esta tecnología contrastándolas con los datos granulométricos obtenidos mediante métodos de muestreo convencionales.

Para este fin, el presente trabajo de investigación se divide en 4 capítulos. En el primer capítulo, se expone el problema de la investigación, así como sus respectivas justificaciones para proceder con el desarrollo de la tesis, para ello se establece los objetivos generales y específicos, las variables y las hipótesis respecto del problema ¿Es posible contrastar el grado de medición ofrecida por el software Split Online con la distribución granulométrica hallada en el muestreo del mineral utilizado en el proceso de lixiviación?; en el segundo capítulo se desarrolla los antecedentes y la base teórica para contextualizar y sentar las bases del estudio; en el tercer capítulo, se expone la caracterización de la investigación mediante el marco metodológico donde se enfoca las estrategias que se utilizarán en el desarrollo de la tesis; por último, en el cuarto capítulo, se analiza los resultados

obtenidos para desarrollar las conclusiones y recomendaciones que se desprenden del presente trabajo.

Capítulo I

El problema de investigación

1.1 Antecedentes

La presente investigación se realizó en una empresa minera aurífera a tajo abierto, en el departamento de Tacna. El proceso extractivo es desarrollado mediante la lixiviación en valle con la conformación de PAD's o pilas donde una solución de cianuro de sodio es regada mediante goteo, posteriormente la solución rica es tratada mediante el proceso ADR (adsorción, desorción y reactivación) donde la solución concentrada de oro y plata es reducida electrolíticamente formando depósitos catódicos en celdas electrolíticas para finalmente ser fundidos y refinados en un horno eléctrico previa recuperación del mercurio en una etapa anterior mediante un horno de retorta.

El monitoreo granulométrico representa una tarea esencial en el procesamiento hidrometalúrgico del oro, actualmente operaciones de gran minería realizan este monitoreo a través de sistemas como el Split Online. Este software representa más de una ventaja competitiva frente a la medición tradicional efectuada de forma manual, dentro de las principales ventajas de este sistema se describe a la rapidez, precisión, trazabilidad y fiabilidad para la obtención del perfil granulométrico del mineral sea en la etapa de minado, chancado o como, en este caso en particular, en la etapa de traslado mediante fajas transportadoras para la

conformación de los PAD's de lixiviación. Estas y algunas otras ventajas convierten a esta herramienta como esencial para el monitoreo granulométrico del mineral.

Ofosehene & Abaka-Wood (2020) elaboraron una evaluación metalúrgica con mineral aurífero proveniente de una mina en Ghana, dan cuenta de la importancia de la distribución del tamaño de las partículas en el proceso de lixiviación con cianuro de sodio a pH de trabajo entre 10,5 y 11, se efectúa una valoración en términos de recuperación de oro estudiando el impacto originado por los cambios en la distribución granulométrica del mineral.

Se explica que siendo la lixiviación un proceso controlado por difusión se debe prestar especial atención al tamaño de las partículas en el mineral de cabeza puesto que durante la lixiviación la solución de riego debe filtrarse a través del lecho del mineral para poder disolver el oro, sin embargo, la eficiencia de disolución es afectada en sistemas donde predomina las partículas demasiado finas donde es propenso la generación de "slimes" (lomas) lo que deriva en menores tasas de percolación.

El trabajo desarrollado por Ofosehene & Abaka-Wood (2020) describe que el contenido de finos en un rango de 27 a 30 % en el mineral aurífero de alimentación ocasiona bajas densidades de riego para evitar el empozamiento en las pilas de lixiviación originando menor producción. Se asocia principalmente al

contenido de mineral -200 mallas como la variable con mayor significancia en la permeabilidad del mineral depositado en el PAD de lixiviación.

El objetivo del estudio mencionado fue evaluar la incidencia del contenido de finos en la extracción de oro, de esta forma el estudio propone realizar blending en el mineral de cabeza para alcanzar un contenido máximo de 15 % de -200 mallas a fin de obtener mejores recuperaciones.

1.2 Identificación y Formulación del problema de investigación

Estudios anteriores concernientes a la extracción de oro, realizados por la empresa donde se efectúa el presente trabajo, dieron como conclusión que el impacto negativo en la conductividad e infiltración hidráulica de la solución lixivante a través del mineral fue originado principalmente por la presencia de finos en el PAD de cianuración.

Se determinó una tolerancia máxima en el porcentaje de finos de –malla 200 en 14% para evitar los problemas mencionados, precisamente bajo este argumento se justifica la necesidad e importancia de contar con un sistema que permita el monitoreo continuo del perfil granulométrico que ingresa como mineral de cabeza a los PADS donde se efectúa el proceso hidrometalúrgico de cianuración de oro.

Por lo expuesto, mediante el presente trabajo se propone el estudio del grado de precisión en el uso del sistema Split Online para la medición en línea del tamaño

del mineral a través del procesamiento digital de imágenes, en ese sentido se plantea el siguiente cuestionamiento a fin de dar solución a la problemática mencionada

¿Es posible contrastar el grado de precisión ofrecida por el software Split Online con la distribución granulométrica hallada en el muestreo del mineral utilizado en el proceso de lixiviación?

1.3 Justificación e importancia de la investigación.

1.3.1 Justificación técnica

La automatización de tareas, en el campo de la ingeniería, busca mejorar la eficiencia, la precisión y la seguridad de los distintos procesos; sin embargo, puede presentar algunos desafíos. En específico, es crucial asegurarse de que la precisión de la comparación automatizada se adapte a las demandas del usuario. En operaciones hidrometalúrgicas donde presencia de partículas demasiado finas es considerable, es probable que se produzcan "laminas" una vez sean contactadas con la solución de riego, lo que resulta en menores tasas de percolación, afectando la eficiencia de disolución. El trabajo de investigación busca comparar los resultados de los tamaños granulométricos obtenidos por el software Split Online y manualmente. La investigación se llevó a cabo de manera experimental. Los datos se utilizaron de una fuente de información confiable y se empleó una medida estándar de error de estimación para calcular el error de comparación.

1.3.2 Justificación económica

La minería del oro es una actividad económica importante que contribuye significativamente a la economía del Perú. Con una producción de 136 toneladas de oro en 2021, el Perú fue el octavo productor de oro del mundo y el mayor productor de oro de América Latina. En el año 2023, la extracción del oro en el Perú significó un ingreso de divisas considerable contribuyendo al 13.4% del PBI, generó un promedio de 231 479 empleos directos y favorece al desarrollo social a través de la inversión en educación, salud y servicios públicos (MEM, 2023).

1.3.3 Justificación práctica

El uso de software para la recopilación de datos puede ayudar a las empresas a ser más eficientes, precisas y confiables, lo que puede tener un efecto positivo en sus operaciones. Las empresas pueden asegurarse de que sus datos sean precisos y confiables mediante la comparación de datos. Esto es crucial para tomar decisiones inteligentes y mejorar el desempeño de la empresa.

1.3.4 Importancia del estudio

Los resultados de las evaluaciones granulométricas realizadas son respaldados estadísticamente. El trabajo de investigación se basa en factores como la validez, análisis de distribución de datos y aplicación de estadísticos de tendencia central como media y desviación estándar, para ello se toman muestras representativas de datos históricos y mineral, a los cuales se les aplica el adecuado

rigor estadístico, brindando de esta forma, una oportunidad para comparar los resultados granulométricos del software con carácter científico.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Medir la precisión en la estimación del tamaño de partículas generado por el sistema Split Online Technology.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar la distribución granulométrica de la celda de lixiviación mediante el muestreo de calicatas para la contrastación con el sistema digital mediante la caracterización granulométrica manual del mineral fracturado.
- Determinar la distribución granulométrica del corte de mineral de la faja transportadora para la contrastación con el sistema digital mediante la caracterización granulométrica manual del mineral fracturado.

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis general

- La estimación del tamaño de partículas de mineral fracturado resultante del procesamiento automático de imágenes digitales con Split Online

Tecnology se ajusta a los valores resultantes de la caracterización granulométrica manual.

1.5.2 Hipótesis específicas

- Existe congruencia entre los valores obtenidos del análisis de distribución granulométrica del muestreo de calicatas en las celdas de lixiviación y los valores reportados del sistema digital Split Online.
- Existe congruencia entre los valores obtenidos del análisis de distribución granulométrica del corte de mineral de la faja transportadora y los valores reportados del sistema digital Split Online.

1.6 Variables

1.6.1 Identificación de las variables

- **Variable dependiente:**
 - a. Rendimiento operativo del sistema Split Online
- **Variable independiente:**
 - a. Datos generados de la caracterización granulométrica del mineral

1.6.2 Caracterización de las variables

- **Rendimiento operativo del sistema Split Online:** Es definido como la relación en términos de eficiencia porcentual entre la diferencia de los

valores de tamaño de mineral fracturado entregado por el sistema digital frente a lo determinado en la medición granulométrica manual.

- Datos generados de la caracterización granulométrica del mineral: La información resultante de la evaluación granulométrica permitió conocer la distribución real del tamaño de partículas del mineral, esto permitió evaluar el grado de precisión de la medición digital ofrecida por el software Split Online.

1.6.3 *Definición operacional de las variables*

De acuerdo con Vara (2015), la definición de operacionalización permite definir la forma como va a medirse o manipularse una variable, es decir, define o da sentido a una variable. La definición teórica define conceptualmente una variable, pero es necesario su operacionalización para materializar los conceptos teóricos convirtiendo a la variable en una magnitud objetiva que puede ser observada y replicada por cualquier investigador.

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variable	Dimensión	Indicador
VI Perfil granulométrico	tamaño de partícula	% mallas
VD Rendimiento operativo del Split Online	eficiencia operativa	%

Nota: VI: variable independiente; VD: variable dependiente

1.7 Limitaciones de la investigación

Los resultados obtenidos, en el presente trabajo de investigación, tienen carácter aplicativo solo dentro de la empresa de estudio, ya que algunas empresas mineras miden la granulometría de los fragmentos minerales usando distintos procesos y diferentes tecnologías; sin embargo, queda a criterio de los interesados evaluar dicha idoneidad para fines pertinentes.

1.8 Descripción de las características de la investigación

La presente investigación presenta una naturaleza cuantitativa de carácter experimental, en su desarrollo fue necesario el uso de conocimientos de la ciencia metalúrgica, puntualmente en el área de la metalurgia extractiva del oro a fin de describir, en términos de eficiencia, el rendimiento del sistema de procesamiento digital Split Online.

Capítulo II

Marco teórico

2.1 Antecedentes del estudio

2.1.1 Antecedentes internacionales

El trabajo titulado “Tratamiento de imágenes de mineral acarreado post-voladura. Análisis de curvas granulométricas y comparativa mediante sistema Split On-line y Split Desktop: automático y manual” desarrollado por Benítez (2014) en el departamento de ingeniería geológica y minera de la escuela técnica de ingenieros y energía en España, direccionó su investigación al análisis granulométrico de una variedad de imágenes correspondientes a fragmentos de rocas originados por la voladura en la cantera El Aljibe ubicado en la región de Toledo – España. El objetivo principal fue la obtención de una curva granulométrica media que sea significativamente representativa tras la voladura, se utilizó tres métodos diferentes para el análisis granulométrico digital obteniéndose un total de trescientas setenta curvas granulométricas para el análisis estadístico, el estudio concluye que todos los métodos estudiados ofrecen estimaciones bastantes aceptables para la obtención de la curva granulométrica media a fin de determinar los X50 y X80 (porcentajes de malla pasantes) debido a que no existe diferencia significativa entre los métodos de análisis digitales.

Schunnesson & Mozaffari (2009) en su investigación “Control y optimización de la producción en la minería a cielo abierto mediante un sistema de monitoreo de perforación y un sistema de análisis de imágenes: un estudio de caso de la mina de cobre Aitik en Suecia” menciona que la producción de una mina puede verse significativamente afectada por la optimización del proceso minero y que los sistemas de monitoreo son herramientas cruciales para proporcionar datos a varios tomadores de decisiones en la mina. Además, la voladura es crucial para la fragmentación de la roca y la productividad de la mina en la minería a cielo abierto. Por lo tanto, los datos y la información son esenciales para optimizar la fragmentación y la voladura. Actualmente, la industria minera tiene dos sistemas disponibles: monitoreo de perforación y análisis de imágenes. Este caso de estudio demuestra la capacidad de estos dos sistemas para el control de la producción al proporcionar la información necesaria para la optimización de la voladura. El sistema de gestión de perforación Aquila y el sistema de análisis de imágenes Split-online están instalados en la mina Aitik, la mina de cobre a cielo abierto más grande de Europa, ubicada en el norte de Suecia. Ambos sistemas proporcionan los datos de este estudio.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Chambi (2016) en su trabajo “Monitoreo continuo para determinar el grado de fragmentación en roca a tiempo real y mejora en el proceso de voladura - unidad minera Cuajone” para la obtención del título profesional de ingeniero de minas,

desarrolló un estudio sobre la influencia en la fragmentación de roca en tiempo real utilizando el mismo sistema Split Online aplicado en la empresa Southern Perú, unidad minera Cuajone. Se planteó el objetivo de demostrar el grado de confiabilidad y representatividad del Split Online contrastándolos con otros programas similares de análisis granulométrico a fin de poder utilizar esta información para ajustar parámetros de voladura. Se realizó una investigación del tipo cuantitativo transversal no experimental con un alcance descriptivo y aplicativo, para el desarrollo del análisis estadístico se utilizó data generada en la voladura del mineral (registro de base de datos entregado por el sistema). El sistema de monitoreo fue instalado específicamente sobre 5 palas donde se evaluó el grado de fragmentación de la roca basado en el P80 alcanzado tras la voladura. Los resultados obtenidos demuestran que el seguimiento mediante este sistema permite la posibilidad de extender la malla de perforación y voladura de 9x9 m a 9,5x9,5 m logrando una disminución por costos de voladura en 0,019 \$/t así como 0,01 \$/t en costos por perforación manteniendo los estándares de fragmentación requeridos por la operación.

Cotrado (2017) en su trabajo de investigación “Efecto del parámetro de fragmentación P80 en la velocidad de excavación de las palas electromecánicas en mina Cuajone” menciona que su estudio tiene como objetivo evaluar las variables de fragmentación P80 (menor y mayor a 40 cm) y la velocidad de excavación (TM/h) de tres palas BUCYRUS de capacidad de cuchara de 42,8; 45,9 y 55,8 m³,

que cargan volquetes de 363 y 290 TM de capacidad de tolva. Según los antecedentes, no se ha realizado mucho estudio sobre este tipo de palas y volquetes, por lo que no se sabe con certeza cuánto varía la velocidad de excavación en comparación con la variación. Se utilizó el software MineOps, para recopilar datos de velocidad de excavación y Split-Online para recopilar datos de fragmentación obteniéndose 180 datos de fragmentación y 180 datos de velocidad de excavación de un año de trabajo en un solo turno día. La metodología de investigación fue longitudinal no experimental. El análisis estadístico realizado indica que cuando la fragmentación P80 es menor a 40 cm, hay una tendencia en aumentar la velocidad de excavación hasta 9 000 TM/h, mientras que cuando la fragmentación P80 es mayor a 40 cm, hay una disminución en la velocidad de excavación.

2.2 Bases teóricas

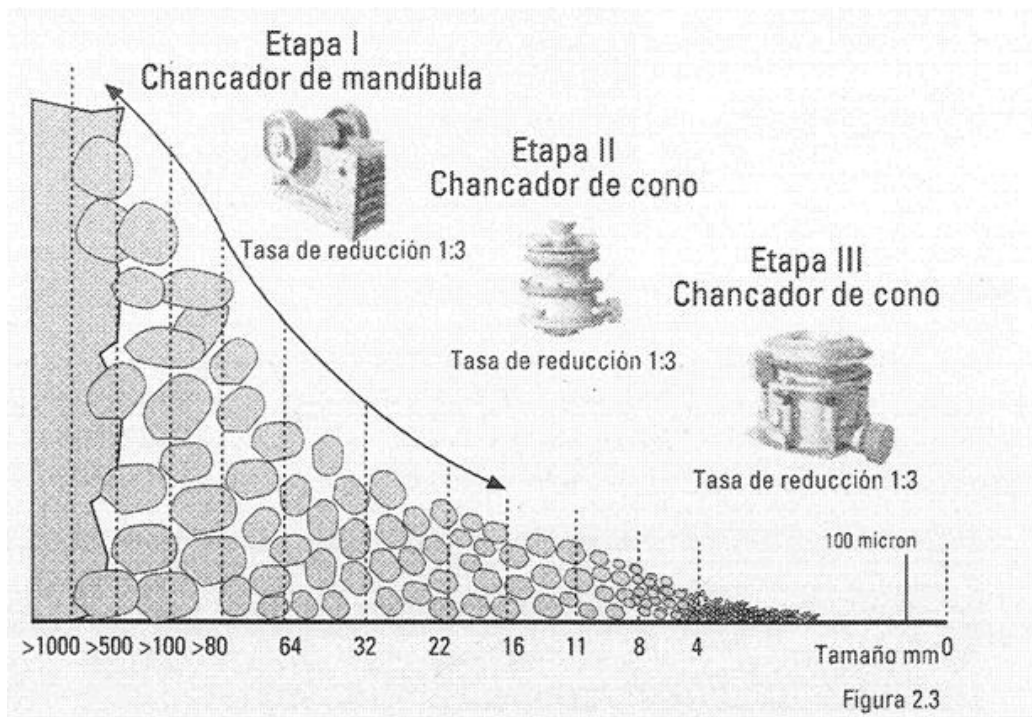
2.2.1 Conminución

En minería, la conminución es el proceso de reducir el tamaño de los materiales, generalmente rocas o minerales, para que sean más fáciles de manipular y procesar. La conminución es una etapa crucial del proceso minero porque permite preparar el material para las siguientes etapas, como la electrometalurgia, la separación gravimétrica o la flotación. Sus etapas más importantes son Chancado y Molienda. La conminución se lleva a cabo a través de máquinas llamadas chancadores y molinos, que rompen la roca o los minerales utilizando una variedad

de mecanismos. Los siguientes son los tipos de chancadores y molinos más comunes son: chancadores de mandíbulas, chancadores de cono, molinos de bolas, molinos de barras, entre otros.

Figura 1

Etapas de chancado de minerales con diferentes máquinas



Nota. Adaptado de *Comportamiento de un material granular no tratado en ensayos triaxiales cíclicos con presión de confinamiento constante y variable*, 2008 ([Distribución granulométrica del material \(denotado como " curva... | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#)).

Es preciso señalar, que actualmente se considera a la voladura como la primera etapa de chancado, esto debido principalmente por que en esta etapa se produce una fragmentación significativa del mineral.

2.2.2 *Granulometría*

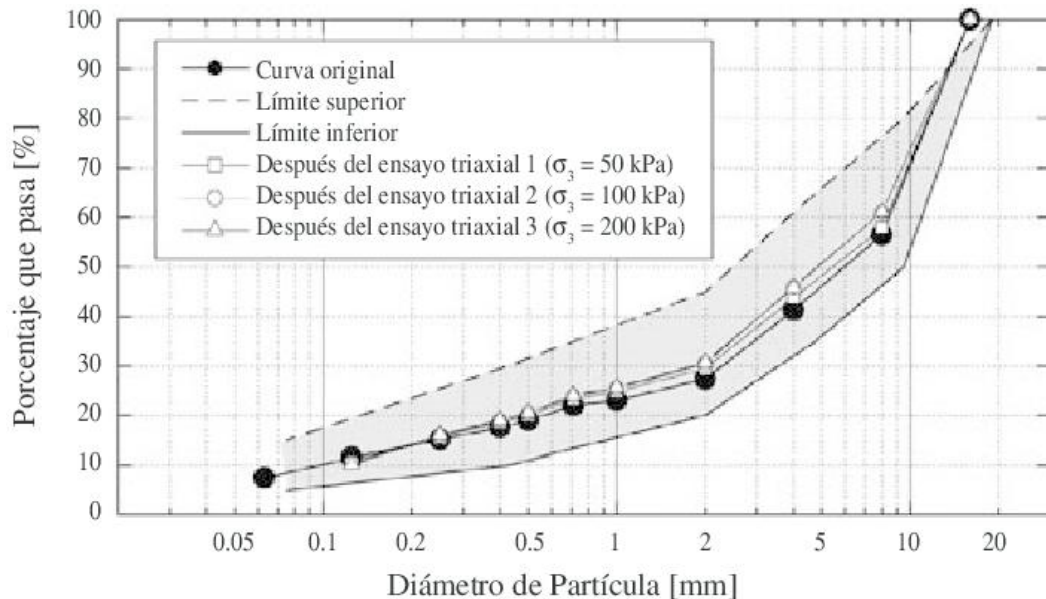
Se conoce como granulometría al estudio de la distribución de tamaños de las partículas de un mineral donde se mide por el diámetro de las partículas, que se puede expresar en milímetros, micrómetros o nanómetros (Madrid, 2015).

La distribución granulométrica de los fragmentos minerales se determina empleando una diversidad de métodos:

- Tamizado: el método más común para medir la granulometría de un mineral es el tamizado. Este método tamiza las partículas a través de una variedad de mallas con diferentes aberturas.
- Sedimentación: la sedimentación utiliza la fuerza de la gravedad para separar partículas de varios tamaños. Este método suspende las partículas en un líquido y las deja reposar. Las partículas más grandes se sedimentarán primero, y las partículas más pequeñas seguirán después.
- Dispersión óptica: la dispersión óptica utiliza luz para medir la granulometría de los minerales. Este método dispersa las partículas en un haz de luz. El tamaño de las partículas determina la cantidad de luz dispersada.

Figura 2

Distribución granulométrica



Nota. Adaptado de *Comportamiento de un material granular no tratado en ensayos triaxiales cíclicos con presión de confinamiento constante y variable*, 2008 ([Distribución granulométrica del material \(denotado como " curva... | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#)).

2.2.3 Chancado

La primera etapa de la conminución, que consiste en reducir el tamaño de los trozos de roca mineralizada hasta un diámetro de aproximadamente 1 cm. El objetivo del chancado es preparar el material para las siguientes etapas del proceso minero, como la flotación, la separación gravimétrica y la molienda. El chancado generalmente se lleva a cabo en varias etapas, cada una de las cuales tiene un tamaño de producto diferente. El tipo de mineral que se procesó y la siguiente etapa del proceso minero determinaron el tamaño del producto final (Haro, 2020).

2.2.4 Lixiviación

La lixiviación es un proceso químico por el cual se extraen solutos deseados de cuerpos sólidos mediante un disolvente líquido. El lixivante debe ser capaz de disolver la sustancia deseada y compatible con el material sólido que se lixivia. La lixiviación es utilizada en una diversidad de aplicaciones (CODELCO, 2018).

- La extracción de minerales: la lixiviación es un proceso importante en la industria minera porque se utiliza para extraer metales de las rocas mineralizadas. Por ejemplo, el cobre, el oro, la plata y el zinc se extraen de las rocas mediante la lixiviación.
- El tratamiento de aguas residuales: los contaminantes como metales pesados, pesticidas y compuestos orgánicos volátiles (COV) se pueden eliminar de las aguas residuales mediante el proceso de lixiviación.
- La producción de productos químicos: la lixiviación se puede utilizar para producir productos químicos como ácido sulfúrico, ácido nítrico y soda cáustica.

2.2.5 Tipos de lixiviación

Los tipos de lixiviación se clasifican según cómo se combinan el material sólido y el lixivante. Los tipos de lixiviación más comunes son (M. Martínez, 2012):

- Lixiviación en pilas: Este método coloca el material sólido en pilas y luego lo rocía con el lixivante.
- Lixiviación en pilas agitadas: este método utiliza pilas y agita el material sólido para mejorar el contacto entre el material sólido y el lixivante.
- Lixiviación en tanques: este método consiste en poner el material sólido en tanques y luego mezclarlo con el lixivante.

Además de estos tipos básicos, existen métodos de lixiviación adicionales que se utilizan para propósitos particulares. Por ejemplo, las bacterias disolverán los minerales en la lixiviación bacteriana. La lixiviación de alta presión utiliza altas presiones para que los minerales sean más solubles.

2.2.6 Lixiviación del oro

Es un proceso hidrometalúrgico, para extraer oro de minerales y concentrados. Este proceso utiliza una solución de cianuro para disolver el oro de la mena y se puede disgregar en las siguientes etapas (Arias-Lafargue et al., 2017) :

- Pretratamiento: para mejorar la eficiencia de la extracción del oro, se realiza un tratamiento previo a la lixiviación. El chancado, la separación de la ganga y la oxidación del oro son ejemplos de este tipo de procesamiento.

- Lixiviación: la mena se coloca en pilas o tanques y la solución de cianuro se rocía sobre ella. Se forma un complejo de cianuro de oro cuando el oro se disuelve en la solución de cianuro.
- Separación: el material sólido se separa de la solución de cianuro. Los procesos de adsorción, precipitación o electrometalurgia permiten la recuperación de oro de una solución de cianuro.

2.2.7 Descripción del sistema Split Online

El programa Split-Online es un sistema automatizado de medición de tamaño de partícula de roca utilizado en la industria minera. El sistema captura imágenes de la roca en movimiento con una cámara de alta resolución, que luego utiliza un software de análisis de imágenes para calcular el tamaño de las partículas. Posee una serie de ventajas sobre los métodos tradicionales de medición del tamaño de partícula, como flotación y tamizado, ya que es más rápido, preciso y fácil de usar. Además, el sistema es más seguro porque los operadores no deben trabajar en entornos peligrosos. Las mediciones del tamaño de partículas de la roca son usadas en una variedad de aplicaciones mineras, como trituración, procesamiento y transporte. El sistema puede mejorar la eficiencia, la recuperación y el control de calidad en las operaciones mineras (Huamán, 2022).

Figura 3

Monitoreo granulométrico por Split Online



Nota. La imagen muestra colocación de las cámaras sensibles en puntos estratégicos, para la toma granulométrica de los fragmentos minerales. Adaptado de *Sistema Split-ShovelCam*, de Splinteng, 2024 ([Sistema Split-ShovelCam - Split Engineering](#)).

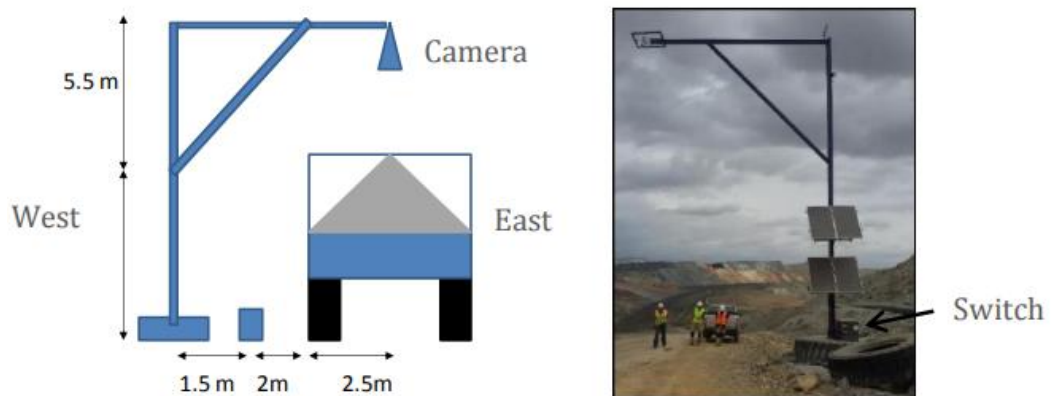
2.2.8 Componentes del sistema de monitoreo Split Online

El sistema Split Online combina distintos componentes para crear un procedimiento personalizado que se adapte a las necesidades específicas de una operación minera y consta de cuatro partes. El primer paso es capturar imágenes de una o más cámaras digitales y puede captar hasta 100 imágenes por segundo de rocas en movimiento. La delineación automática de cada imagen capturada es el segundo aspecto. El software de análisis de imágenes divide las imágenes en partículas individuales y mide su tamaño. En tercer lugar, el cálculo de la curva de

tamaños utilizando los datos de delineación de fragmentos. Por último, el cuarto componente muestra los resultados de la curva de tamaños en la pantalla y permite exportarlos a computadoras o redes externas (A. Martínez, 2016).

Figura 4

Colocación de cámara para la toma de imágenes por Split Online



Nota. Adaptado de *Medida de la fragmentación del escombros de voladura con sistemas digitales de imágenes-split online y split desktop en las minas el Aljibe (Toledo) y cobre las Cruces (Sevilla).* Sistema Split-ShovelCam, de Martínez, 2016.

2.2.9 Instalación y escalamiento del sistema Split Online

Machaca (2015) menciona que la puesta en marcha del sistema Split Online se resumen en los siguientes puntos:

- Planificación: la planificación cuidadosa de la instalación del sistema es crucial. Esto incluye tener en cuenta la ubicación del sistema, la fuente de alimentación y las necesidades de iluminación.

- Instalación de las cámaras y computadoras: para que el sistema Split Online funcione, primero se colocan las cámaras en ubicaciones estratégicas, las computadoras se colocan áreas de trabajo o subestaciones.
- Instalación del software: es necesario instalar el software de análisis de imágenes en una computadora que tenga los recursos necesarios para ejecutarlo y se realiza el escalamiento para obtener dimensiones de la superficie de las rocas. El algoritmo del sistema de identificación de la cámara capta las imágenes y se almacenan en un servidor asignado.
- Configuración del sistema: el sistema debe modificarse para adaptarse a las circunstancias específicas de la operación minera. Esto incluye la configuración de la cámara, el software de análisis de imágenes y los componentes opcionales.

Figura 5

Fotografía de cámara en el frente de minado de pala



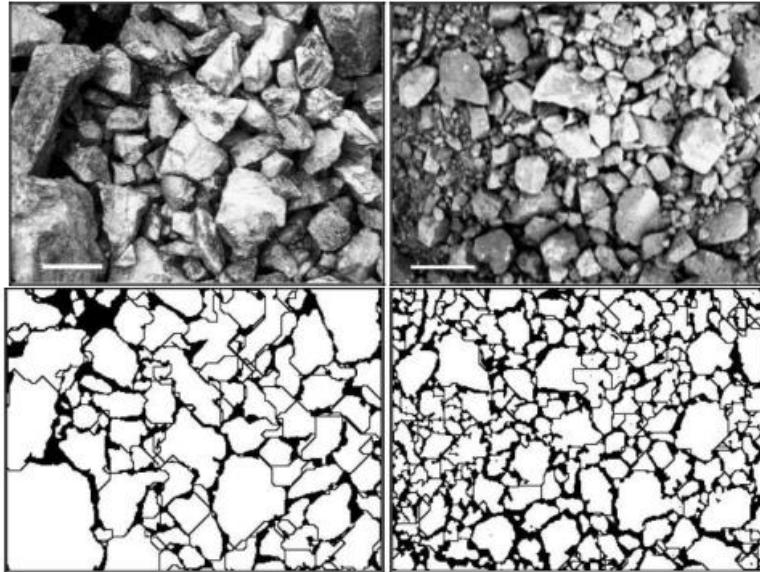
Nota. Adaptado de “Determinación de la fragmentación utilizando el sistema split online en los frentes de minado de las palas en la unidad minera Cujone de la empresa Southern Perú Copper Corporation”, de Machaca, 2015.

2.2.10 Delineación de fragmentos

El proceso de identificar y separar partículas individuales en una imagen se conoce como delineación de fragmentos. Permite la medición del tamaño de partícula en el sistema. La aplicación Split-Online emplea una variedad de técnicas para delinear fragmentos. El análisis de contornos es un método común. El análisis de contornos puede identificar los bordes de las partículas en una imagen. El software puede separar las partículas una vez que se han identificado los bordes. Además, el análisis de momentos es otro método común para delinear fragmentos. El análisis de momentos identifica las partículas utilizando datos sobre su centro de masa, área y forma. En el caso de estudio, se usó el primer método.

Figura 6

Delineación de fragmentos de rocas



Nota. Adaptado de “Determinación de la fragmentación utilizando el sistema split online en los frentes de minado de las palas en la unidad minera Cujone de la empresa Southern Perú Copper Corporation”, de Machaca, 2015.

2.2.11 Cálculo de curva de tamaños

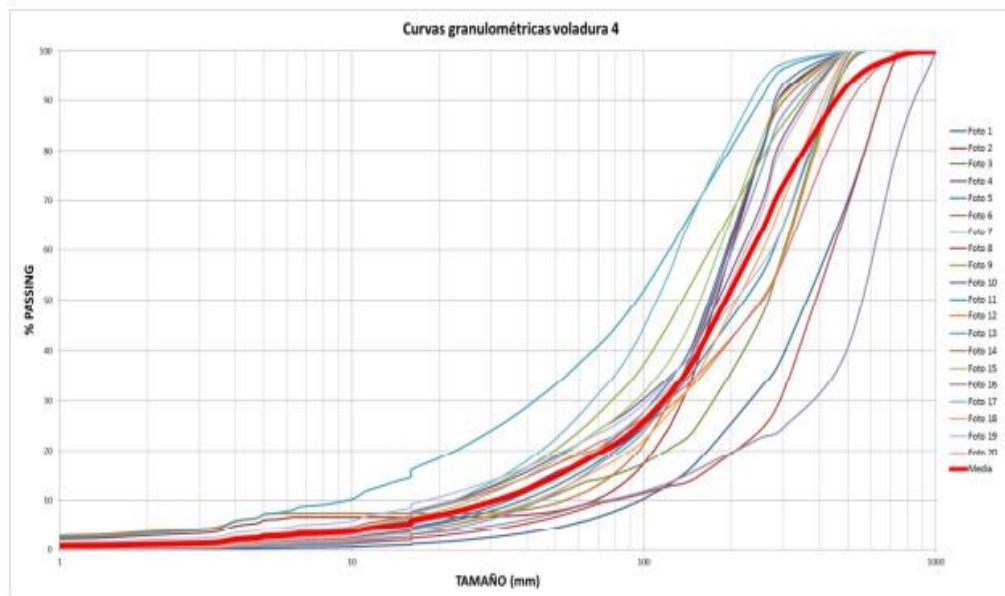
Las imágenes de roca fragmentada no incluyen finos. Debido a la vibración, el asentamiento, el viento, la lluvia u otros factores. Por lo tanto, el material fino no siempre está presente en la superficie de los fragmentos y si los finos se pueden ver en la superficie, dependiendo del nivel de zoom y la resolución de la imagen, los fragmentos finos individuales son demasiado pequeños para ser delineados.

El software Split-Online toma en cuenta los finos en dos pasos. En primer lugar, se determina el tamaño más grande de los finos a tener en cuenta (conocido como "tamaño-fino") y se calcula la cantidad de material que supera este volumen.

Dependiendo de la escala y la forma del histograma de partículas en la imagen, los tamaño-finos varían para cada imagen. El tamaño-fino para imágenes de material en pilas de roca post voladura puede ser tan grande como 100 mm, mientras que el tamaño-fino para imágenes de pequeños fragmentos con acercamiento puede ser tan pequeño como 0.1 mm o menos. El siguiente paso es encontrar una curva realista para materiales finos. Una distribución Schuhmann se utiliza en Split-Online para distribuir el volumen de finos abajo del punto de corte (Benítez, 2014).

Figura 7

Representación granulométrica por el Split Online



Nota. Adaptado de "Tratamiento de imágenes de mineral acarreado post voladura. Análisis de curvas granulométricas y comparativa mediante sistema Split On-line y Split Desktop: automático y manual", de Benítez, 2014.

2.2.12 Exportación de los resultados

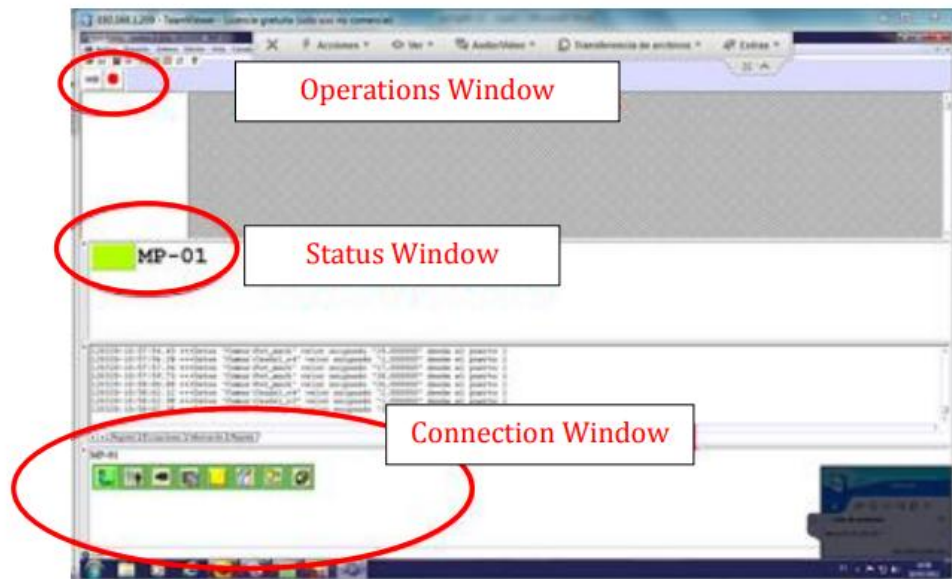
El software Split Online permite el procesamiento de las imágenes obtenidas de los materiales analizados y su exportación en distintos formatos reflejando en las pantallas las distintas curvas granulométricas (P80, P20, entre otros). Esta información cuantitativa es almacenada en el disco duro del sistema, pudiéndose transferir a una base de datos relacional los datos P80, P20, P50, tamaño mayor-menor, la curva de estos datos, hojas de cálculos, entre otros a un sistema en la nube para su posterior análisis y consulta por cualquier medio tecnología por medio de la internet.

Entre los menús más resaltantes se describen a continuación:

- Archivo: permite abrir y cerrar imágenes procesadas.
- Proyecto: permite guardar los ajustes realizados a cada proyecto
- Sistema: permite cambiar el modo de trabajo. Usualmente se emplea el modo ingeniería que nos permite cambiar parámetros del sistema de acuerdo con nuestro estudio.
- Vista: permite seleccionar las ventanas a visualizar. la ventana de estado muestra una luz amarilla si el sistema está esperando nuevas imágenes y verde si se toma una fotografía (Figura 8).

Figura 8

Interfaz de Split Online



Nota. Adaptado de *Medida de la fragmentación del escombros de voladura con sistemas digitales de imágenes-split online y split desktop en las minas el Aljibe (Toledo) y cobre las Cruces (Sevilla).* Sistema Split-ShovelCam, de Martínez, 2016.

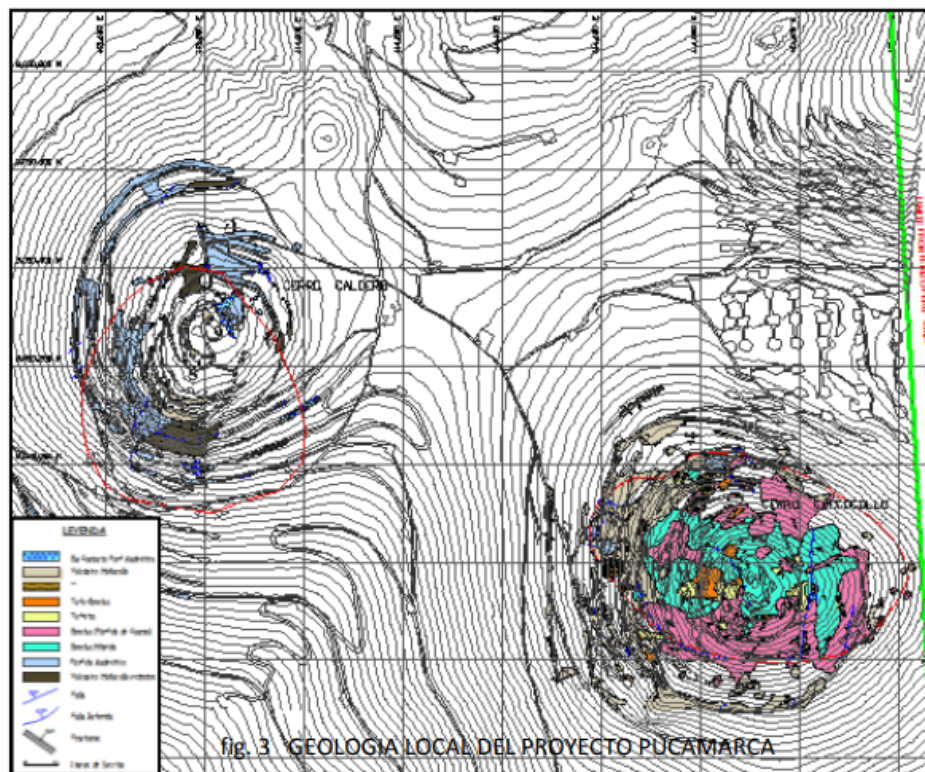
2.2.13 Geología local

El proyecto Pucamarca se ubica en la cercanía de los cerros Caldero y Checocollo, con una formación volcánica Huilacollo del tipo andesita-dacita. Presentan derrames de lava, piroclástico, aglomerados y brechas. La geología del cerro Checocollo presenta mineralización de oro y plata dentro de las rocas. Además, la geología histórica muestra la intrusión de un pórfido cuarcífero.

Por otro lado, el cerro Caldero presenta pórfido feldespático con una caracterización principal de argílica moderada. Además, se encuentra diseminación fina de pirita, calcocita-bonita (Guzmán & Hermitaño, 2005a).

Figura 9

Geología del proyecto Pucamarca



Nota. Adaptado de “Geología del proyecto Pucamarca”. INGEMMET, de Guzmán & Hermitaño, 2005.

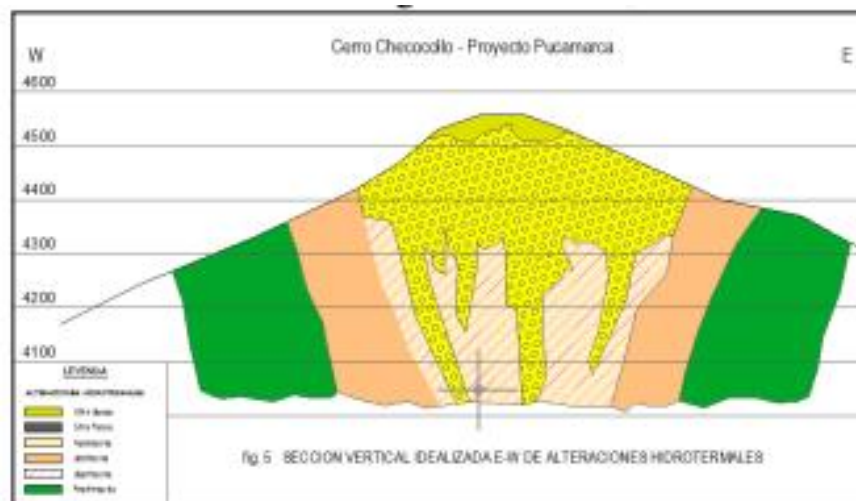
2.2.14 Alteración hidrotermal

Las alteraciones hidrotermales en el proyecto Pucamarca presentan una silicificación intensa, argilización moderada y propilitización moderada. La Figura

10 presenta un corte imaginario del cerro Checocollo donde muestra los cambios gradacionales de mayor a menor intensidad de la silicificación en su grado máximo. Además, debido a la silicificación continuada y las distintas actividades tectónicas produjeron, en primera instancia, brechas y posterior silificación de diversos tipos; por ejemplo, sílice masiva (color amarillo) y sílice porosa (vuggy). La argilización moderada está relacionada con la presencia de pirita y la intrusión de pórfido feldespático. Además, la alteración propilítica se presenta en forma de un halo periférico en el cerro Checocollo. Mostrando una cloritización de los ferromagnesianos donde se encuentran la calcita en forma de venillas, epidota y pirita (Guzmán & Hermitaño, 2005b).

Figura 10

Sección vertical idealizada de alternaciones hidrotermales



Nota. Adaptado de "Geología del proyecto Pucamarca". INGEMMET, de Guzmán & Hermitaño, 2005.

2.2.15 Mineralización

Guzmán & Hermitaño (2005) mencionan que la mineralización en el proyecto Pucamarca se encuentran yacimientos formado por óxidos y sulfuros. En cuanto a los metales preciosos, se encuentran en forma de óxidos de Au- Ag (HS), dentro del cerro Checocollo. Esta mineralización de oro está relacionada con la silicificación intensa, contactos litológicos y la presencia de óxidos de hierro. Asimismo, los autores mencionan que cuando las concentraciones de oro y plata son elevadas los elementos trazas de antimonio, mercurio y azufre presentan un fuerte incremento. Por otro lado, la mineralización del tipo sulfuro (ubicada en el cerro Caldero) presenta minerales como la pirita, bornita, calcocita calcopirita y baritina asociadas a facies argílica.

2.2.16 Caracterización geológica

Existen diversos tipos de alteraciones geológicas, en el yacimiento explotado por la empresa en estudio. La Figura 11 muestra el promedio de oro por tonelada siendo la sílice pulverulenta, morrenas y rocas frescas entre los más resaltantes. La sílice pulverulenta es un polvo de material fino y suelto compuesto principalmente de sílice de cuarzo. Las morrenas son acumulaciones de sedimentos glaciares. Está compuesta por una mezcla heterogénea de rocas, grava y limo. La roca fresca es conocida por que conservan sus estructuras mineralógicas originales, que no ha sido alterada significativamente por la erosión, medio ambiente o

actividades hidrotermales. Por otro lado, se presenta poca presencia del tipo argílica intermedia que es una alteración hidrotermal que ocurren en las rocas por las interacciones con fluidos calientes, que son ricos en minerales disueltos. Estos líquidos fluyen entre las diversas aberturas de las rocas provocando una reacción con los minerales (Quiliche, 2022).

Figura 11

Tipos de alteraciones

Tipos de Alteraciones	Simbología	% de distribución	Au (g/t)
Argílica avanzada	AAR	15,06	0,30
Argílica Intermedia	AR	1,38	0,21
Sílice granular	Si-GR	5,78	0,30
Sílice masiva	Si-MA	39,34	0,44
Sílice pulverulenta	Si-PU	0,08	0,66
Sílice Vuggy	VUG	25,43	0,35
Morrenas	MORR	11,70	0,55
Roca fresca	UA	1,01	0,47
Propilítica		0,22	0,33

Nota. Adaptado de “Mejoramiento de la percolabilidad con el uso del Kollasol STG LF y la recuperación de oro en la unidad minera Pucamarca Minsur – Tacna”, de Quiliche, 2022.

2.2.17 Operación minera

Juárez (2019) menciona que los recursos extraídos del proyecto Pucamarca se estiman en 34,24 Mt de mineral con una media de 0,72 g/t de oro y 6,97 g/t de plata. Además, se presentan 6 unidades litológicas como: brecha híbrida, tufo

brecha, tufo fragmental, tufisita y brecha pórfido de cuarzo. Este mineral extraído es lixiviado por cianuración en pilas. Donde la solución es procesada para obtener barras de doré. Los porcentajes de recuperación de oro para cada una de las unidades litológicas se presenta en la Figura 12.

Figura 12

Unidades litológicas presentes

Unidad Litológica	%Au@	%Au@	NaCN	Cal
	19mm	125mm	kg/t	kg/t
Brecha Híbrida	67%	58%	0,16	0,4
Tufo Brecha	62%	60%	0,12	0,7
Tufo Fragmental	82%	80%	0,14	1,0
Tufisita	72%	70%	0,39	1,5
Brecha pórfido de Cuarzo	72%	68%	0,14	1,0
Volcánico Huilacollo	81%	71%	0,07	0,6
Promedio Aproximado proporcionado por Minsur	70%	65%	0,12	0,5

Nota. Adaptado de “Implementación del programa de observadores de seguridad para identificar y reducir comportamientos inseguros – unidad minera Pucamarca – compañía minera MINSUR”, de Juárez, 2019.

2.2.18 Método de explotación

El proceso de obtención de oro y plata en Pucamarca se realiza en operaciones de tajo abierto, de donde se extrae las rocas. Estas pasan por un proceso de chancado, alimentadas por camiones de 90 toneladas. El proceso de conminución es realizado por una chancadora de 1,400 t/h obteniéndose un producto menor a 3,5” de tamaño. Un sistema de correas traslada el mineral al siguiente proceso donde se añade cal para obtener alcalinidad protectora. El mineral chancado es trasladado al proceso de lixiviación en un área aproximada de 10,000 m².

Los metales preciosos son extraídos a partir de una solución de cianuro de sodio con una media de consumo de 0,12 kg/t. Esta solución rica es recolecta por las tuberías de drenaje siendo su destino la poza PLS. Esta solución rica es bombeada hacia baterías formada por 5 columnas que contienen carbón activado. La finalidad es que los valores metálicos sean absorbidos y la solución pobre es bombeada hacia la pila de lixiviación. Finalmente, a través de un proceso electrolíticos se obtienen barras de doré de 60% a 70% de pureza (Juárez, 2019).

2.3 Definición de términos

- **Granulometría:** Se refiere a la distribución por tamaños de las partículas que forman un material granular. Además, se investiga la medida de cada fragmento o grano que forma un material como arena, grava, suelo o incluso polvos.
- **Conminución:** El proceso de reducir el tamaño de las partículas de un material sólido se conoce como conminación. Se puede lograr mediante trituración, molienda, corte y vibración, entre otras técnicas.
- **SplitOnline:** Es un programa que se especializa en la determinación automatizada del tamaño de las partículas en la roca. Se usa principalmente en la minería.

- Calicata: Una calicata es una técnica de prospección que consiste en perforar o excavar un terreno a una profundidad baja o media para obtener muestras de tierra o roca.

Capítulo III

Marco metodológico

3.1 Caracterización del diseño de investigación

La revisión exhaustiva de la literatura pertinente permite extraer información relevante para afrontar el problema de la investigación siendo necesario detectar, consultar y obtener bibliografía concerniente a los propósitos del estudio (Hernández et al., 2014). El objetivo en este caso en particular de estimar la precisión del sistema SPLIT-ONLINE TECHNOLOGY mediante la contrastación y caracterización manual de mineral fracturado implica la revisión bibliográfica de reportes para un adecuado estudio y comprensión de todas las características y bondades que ofrece este sistema de medición, lo expuesto otorga características de una investigación documental; no obstante, es necesario complementar este tipo de investigación con información numérica obtenida de las evaluaciones metalúrgicas relacionadas con el proceso en estudio; en ese sentido, el análisis estadístico necesario para el análisis y contrastación de hipótesis, confiere un carácter cuantitativo. Se define la presente tesis como cuantitativa documental.

3.2 Acciones y actividades para la ejecución del proyecto

El proyecto de tesis requiere una planificación y ejecución meticulosas. El proceso comienza describiendo el tema, la pregunta de investigación y los objetivos de la investigación. Luego se elaboró un marco teórico sólido después de una

revisión exhaustiva de la literatura. La siguiente etapa consiste en desarrollar una técnica para la recolección y análisis de datos.

Finalmente, la tesis se redacta, se revisa y se presenta de manera formal. A continuación, se presenta los pasos que componen la investigación:

Tabla 2

Acciones y actividades para la ejecución del proyecto

N°	Elaboración de tesis fase 1
1	Presentación del plan de tesis
2	Revisión de aprobación del asesor
3	Búsqueda de información
4	Planeamiento de pruebas
5	Elaboración del capítulo I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN
6	Envío de solicitud para el uso de laboratorios de UNJBG
Elaboración de tesis fase 2	
7	Compra de materiales
8	Elaboración del capítulo II: MARCO TEÓRICO
9	Elaboración del capítulo III: MARCO METODOLÓGICO
10	Recopilación de información
11	Análisis estadístico de resultados en base a las pruebas desarrolladas
12	Elaboración del capítulo IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN
Elaboración de tesis fase 3	
13	Envío de tesis para su revisión
14	Subsanación de observaciones
15	Aprobación del asesor
16	Designación de jurados
17	Revisión de tesis por el jurado

3.3 Materiales e instrumentos

- Sistema de monitoreo Split Online
- Maquinaria para muestreo por calicatas
- Tamices de diferentes aberturas
- Balanza
- Bandejas o recipientes
- Horno secador

3.4 Población y muestra de estudio

Se establece como unidad de análisis al mineral operativamente acondicionado que conforma los PAD'S de lixiviación, en ese contexto la población estaría representado por todo el universo que conforma el mineral procesado.

De acuerdo con el concepto de muestra, esta debe ser representativa de la población al presentar sus mismas características y propiedades en una cantidad sustancialmente menor que hace posible su estudio en términos de tiempo y economía, el tamaño de muestra se indicará en el siguiente capítulo debido a que se realizaron diferentes muestreos en diferentes momentos para diferentes pruebas.

3.5 Tratamiento de datos (análisis estadístico)

En cuanto a la colección de datos, el sistema Split Online provee de forma automática la información necesaria para el almacenamiento de datos lo que

permite el monitoreo en línea del mineral alimentado a los PAD'S de lixiviación, se aprovechó esta ventaja para el análisis respectivo; por otro lado, a partir de las evaluaciones de caracterización granulométrica se ejecutó el estudio respectivo mediante la generación de gráficas y análisis estadístico para dar cumplimiento al objetivo planteado.

Se usaron los siguientes programas de procesamiento de datos y ofimática:

- Microsoft Excel para la generación de gráficos y tablas
- Statgraphics para el análisis estadístico
- Microsoft Word para la elaboración del presente trabajo.

Capítulo IV

Resultados y discusión

4.1 Resultados

El objetivo del presente trabajo está enfocado en la determinación de la efectividad de la medición digital ofrecido por el sistema Split on-line, para ello es necesario contrastar las mediciones frente a un procedimiento de análisis granulométrico ejecutado de forma mecánica-manual; previo a este análisis, se realizó la determinación del porcentaje máximo de finos con el que se alimenta el PAD de lixiviación a fin de determinar su efecto sobre la extracción del oro, se estimó el porcentaje adecuado de finos a fin de maximizar el mecanismo de contacto entre el mineral y la solución lixivante.

4.1.1 Lixiviación en columnas

La extracción de oro respecto del tiempo de lixiviación fue obtenida en la evaluación de 9 pruebas de lixiviación en columnas a fin de establecer la influencia del contenido de finos (% -200m) en la recuperación del oro, se utilizó el mineral que se depositó en las celdas de lixiviación C1A y C1B que también son objetos del muestreo por calicatas para el análisis granulométrico. Se adquirió aproximadamente 1000 kg de mineral para las evaluaciones, el cual fue homogenizado y cuarteado, se destinó 50 kg para el análisis de cabeza, 50 kg para el análisis granulométrico y 100 kg para cada columna.

Se acondicionó cada columna con el perfil granulométrico determinado y el contenido de finos mediante el siguiente esquema y dimensiones de las columnas:

Tabla 3

Codificación de columnas

Nº columna	código	% de finos -200m
1	20	20
2	18A	18
3	18B	18
4	16A	16
5	16B	16
6	14A	14
7	14B	14
8	12A	12
9	12B	12

Tabla 4

Características de las columnas

Cargado de mineral		
Volumen útil de la columna	0,06	m ³
Altura columna	200	cm
Diámetro de columna	7,50	pulg
Altura del mineral	196	cm
Diámetro columna en cm	19,05	cm
Área columna	0,03	m ²
Densidad apar. columna	1,69	t/m ³
Densidad apar. en cubo	1,45	t/m ³

Una vez que se completó el carguío del mineral destinado para cada columna con ayuda de sacos de máximo 20 kg, se instaló el circuito de bombeo para el riego de la solución cianurada con bombas peristálticas para cada columna. Se usó un volumen diario de riego con 7,52 litros, el riego permaneció continuo hasta obtener una asíntota en la curva de extracción (extracción uniforme).

Tabla 5

Parámetros de riego

Condiciones		
Tasa de riego	11	(L/h-m ²)
Flujo de riego	5.23	ml/min.
Volumen de riego	7.52	L
Fuerza de CN libre	60	ppm
pH	>10.5	-

De acuerdo con los resultados obtenidos, el porcentaje de finos tiene una fuerte dependencia en el tiempo de lixiviación, el coeficiente de correlación obtenido de -0,982 indica una alta relación indirecta, es decir que a mayor contenido de finos se tiene un menor tiempo de percolación, las columnas con más contenido de finos presentaron problemas para percolar por lo que el riego fue también menor.

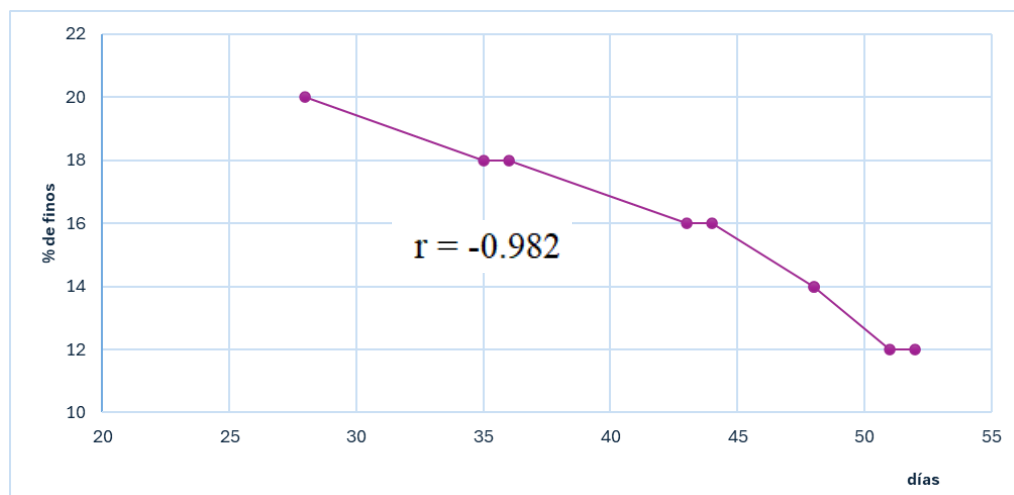
Tabla 6

Tiempo de lixiviación

% de finos -200m	tiempo de lix (días)
20	28
18	35
18	36
16	43
16	44
14	48
14	48
12	51
12	52

Figura 13

Correlación porcentaje de finos y tiempo de lixiviación



La relación inversa indicada una influencia significativa en la extracción de oro según lo mostrado en la siguiente figura, donde es claramente notorio que las columnas con menor contenido de finos son las que presentan mejores recuperaciones, esta condición es propiciada por el contacto más eficiente entre la solución de riego y una mayor cantidad de mineral a lo largo de todo el lecho de la columna, en un sentido inverso, las columnas con mayor porcentaje de sólidos promueven un menor contacto entre el lixivante y el mineral al presentar zonas “*taponadas*” por la presencia de material muy fino, esta condición escalada en un PAD de lixiviación ocasiona encharcamientos de la solución de riego en la superficie.

Figura 14

Extracción de oro según porcentaje de finos

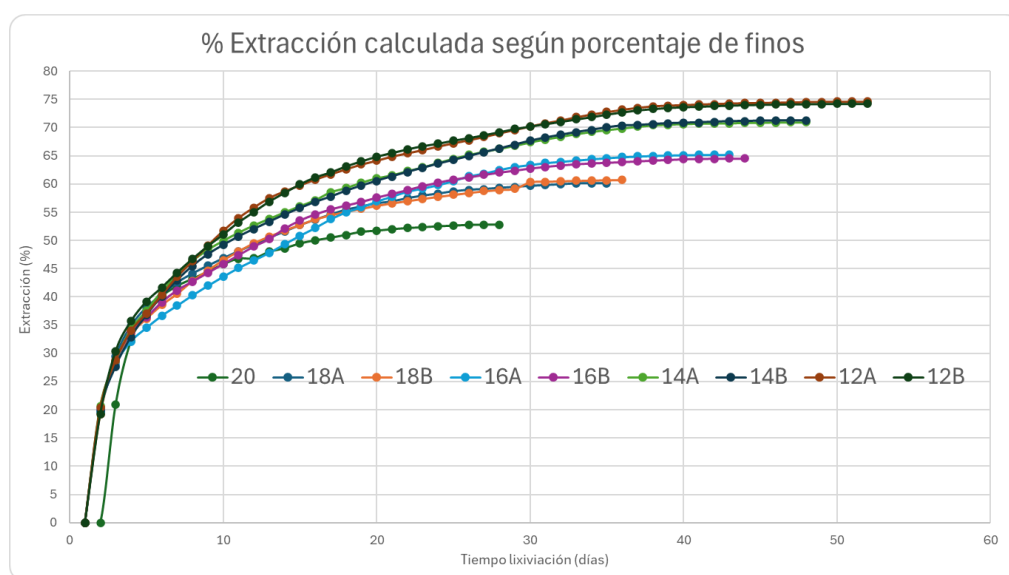


Tabla 7*Recuperación calculada*

columna	Ley de Cabeza mg Au	% Recuperación calculada	tiempo de lix (días)
20	23.01	52.82	28
18A	23.01	60.15	35
18B	23.01	60.73	36
16A	23.01	65.19	43
16B	23.01	64.50	44
14A	23.01	70.93	48
14B	23.01	71.25	48
12A	23.01	74.60	51
12B	23.01	74.21	52

Por lo comentado, es propicio que la granulometría en los PAD de lixiviación no supere el 14% de finos (Anexos del 9-17).

4.1.2 Muestreo de calicatas

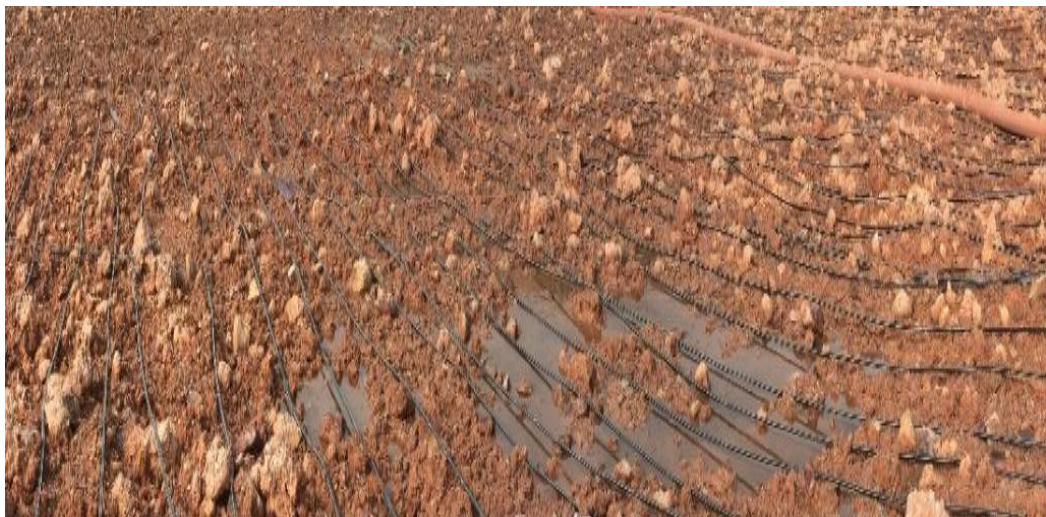
El tamaño y cantidad de finos presentes en el mineral que conforman las celdas de lixiviación son factores críticos en el proceso de cianuración, una alimentación de mineral con cantidad excesiva de finos conduce a una acumulación no deseable de inventario de oro no recuperado en lecho del mineral cianurado.

De acuerdo con lo determinado en las pruebas antes mencionadas, este exceso de finos dificulta el contacto entre solución de riego y partículas de oro diseminado en el mineral, de esta manera se tiene un impacto negativo en la conductividad e infiltración hidráulica del lixivante.

Como consecuencia de esta mala infiltración se crean zonas de empozamiento en la parte superficial de las celdas llamados *ponding*, tal como se muestra en la siguiente figura:

Figura 15

Encharcamiento superficial



Nota. Encharcamiento de solución de riego generado por baja permeabilidad por presencia excesiva de finos

La caracterización granulométrica para la determinación de finos se realiza a través de muestreos puntuales *insitu* denominadas calicatas, este muestreo permite desarrollar el seguimiento granulométrico del mineral acarreado y apilado en el PAD.

El muestreo del PAD seleccionado se realizó a través de cuatro calicatas por celda, de acuerdo con la topografía mostrada en la siguiente figura, el muestreo

inició con la excavación a una profundidad de 6 metros en los puntos rojos señalados en las celdas C1A y C1B, este material es acumulado a un lado para formar un montículo de mineral en forma de rumas.

Figura 16

Zona de muestreo de calicatas



Nota. Solo se consideró las celdas C1A y C1B señalados con puntos rojos.

Una vez que el mineral fue acumulado, se procedió a homogenizarlo cinco veces con la excavadora de acuerdo con el método de cuarteo y cono, después de la homogenización se tomó cuatro muestras representativas en sacos con un peso aproximado de 20 a 25 kg.

Esta tarea fue repetida tantas veces fue necesario de acuerdo la cantidad de calicatas requeridas. Para el siguiente punto de muestreo, se tomó como referencia la zona inicial desde el cual se midió una distancia equidistante que debe

mantenerse entre todas las calicatas, estas distancias son realizadas mediante topografía.

Figura 17

Muestreo de calicatas



Nota. Equipo pesado utilizado para la extracción de calicatas.

Figura 18

Ruma de mineral muestreado



Nota. Material generado por la excavación que fue apilado formando rumas.

4.1.3 Análisis granulométrico

Tiene como objetivo determinar el perfil granulométrico de las muestras tomadas de las cuatro calicatas por celda, mediante este análisis se determinó el P80 y el porcentaje de finos con el uso de las mallas: 4", 3", 2", 1 ½", 1", ½", # 10 y # 200 y -200.

Las muestras recepcionadas (20 a 25 kg.) fueron homogenizadas 2 veces para posteriormente ser separadas en dos partes con un cuarteador Jones (Splitter modelo SP-1). Una mitad se utilizó para determinar el porcentaje de humedad mientras que la otra se utilizó para lavar el mineral a distintas mallas.

Figura 19

Equipos usados en el análisis de porcentaje de finos



Nota. Izquierda: Cuarteador marca Jones Splitter SP-1. Derecha: Tamiz malla 200 marca Tyler

Se efectuó el lavado del mineral a través de las mallas mencionadas, se recepcionó de manera independiente en bandejas metálicas cada malla para su posterior secado en una mufla a 105 °C hasta obtener un peso constante.

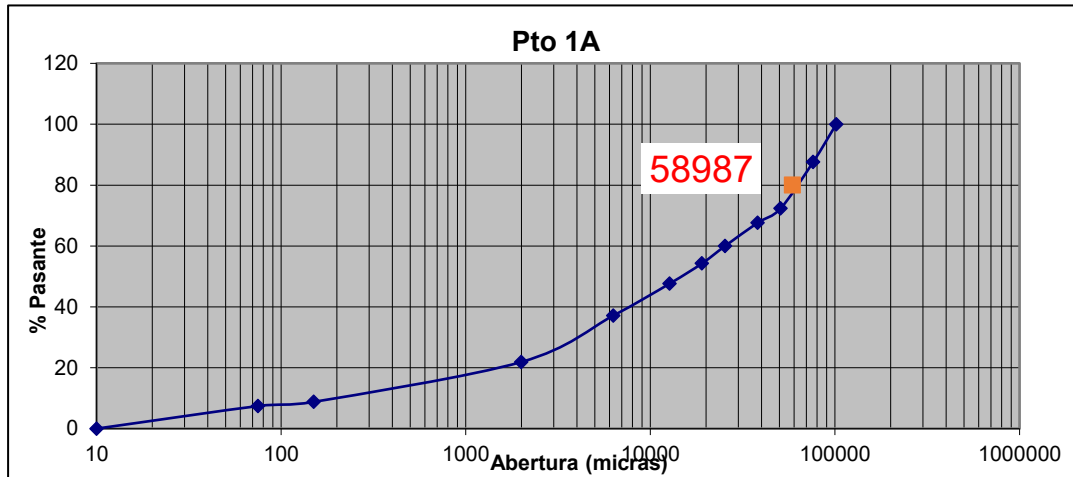
El análisis de material fino de interés corresponde a la malla -200, para ello, el fino -10m es pasado sobre las mallas 100 y 200, el retenido en la bandeja de malla -10 fue precipitado en una batea con ayuda de floculante Magnaflow al 0,1% a fin de asegurarse la precipitación de finos en suspensión, el mineral sedimentado fue lavado en tamiz Tyler 100m y 200m de 11” de diámetro con abundante agua a presión.

Lo retenido en cada malla fue traspasado hacia una bandeja metálica y llevado a la estufa a 120°C por 4 horas. Una vez seco, la diferencia de peso con la cantidad inicial determinó el peso -200m.

Los resultados de los análisis granulométricos efectuado a las 8 muestras (4 calicatas por celda) son mostrados en las siguientes figuras, la determinación del P80 es calculado mediante la regresión lineal de los pesos acumulados en cada malla y sus respectivas aberturas de mallas, para lo cual se intercepta el 80% de mineral pasante acumulado (eje de ordenadas) con la abertura de malla correspondiente expresado en micras (eje de abscisas) en un gráfico de escala logarítmica; los datos para construir los gráficos quedan referenciados en las tablas (anexos 1-8).

Figura 20

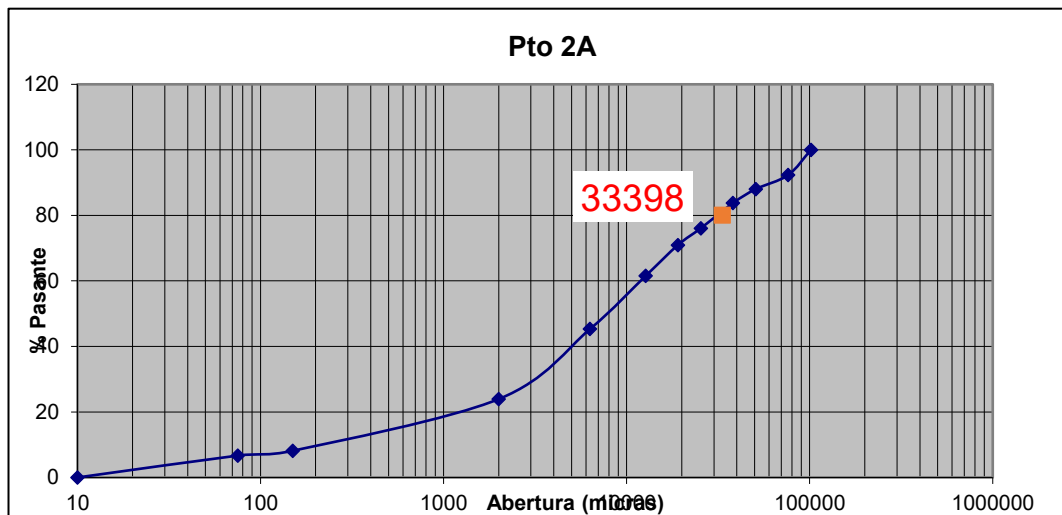
Granulometría del punto 1A



Nota. $P(80) = 2,32''$

Figura 21

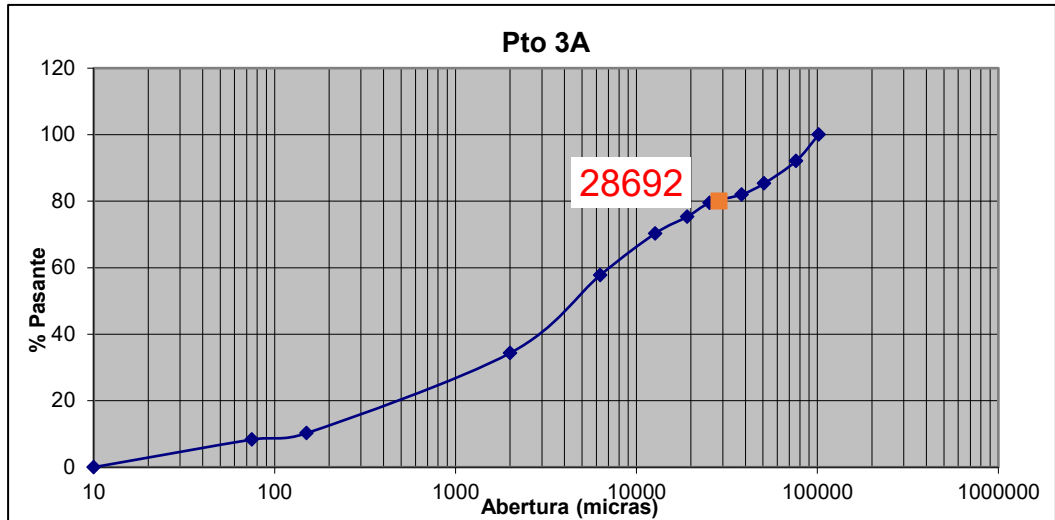
Granulometría del punto 2A



Nota. $P(80) = 1,31''$

Figura 22

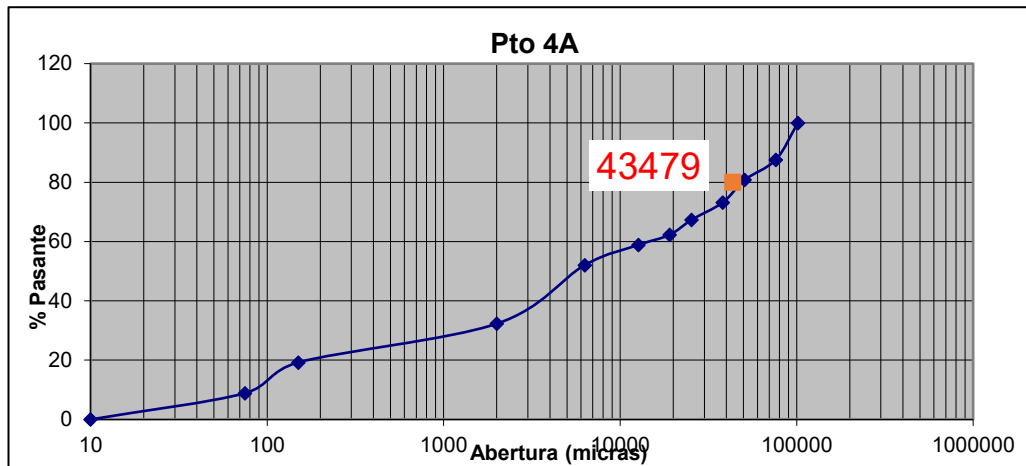
Granulometría del punto 3A



Nota. $P(80) = 1,13''$

Figura 23

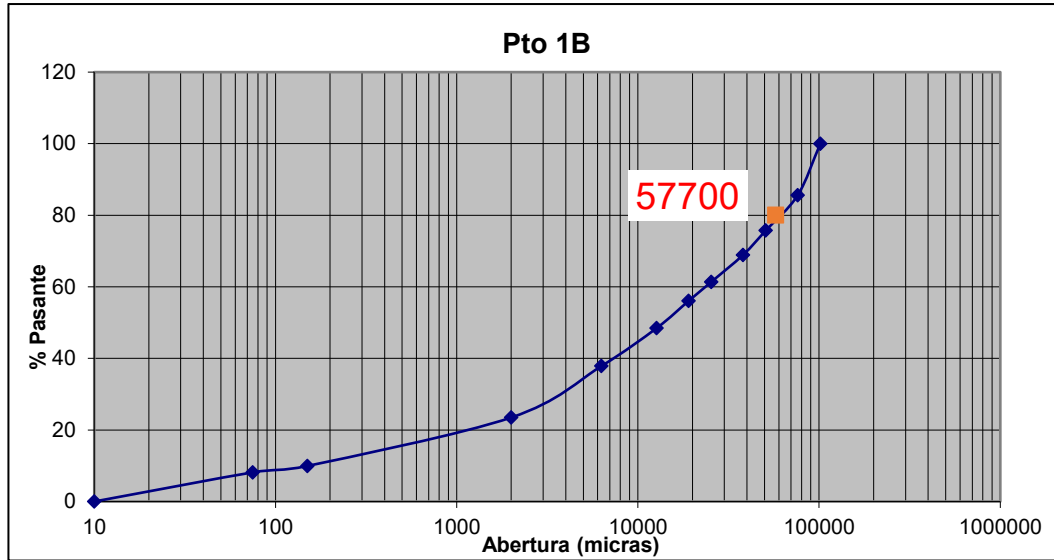
Granulometría del punto 4A



Nota. $P(80) = 1,71''$

Figura 24

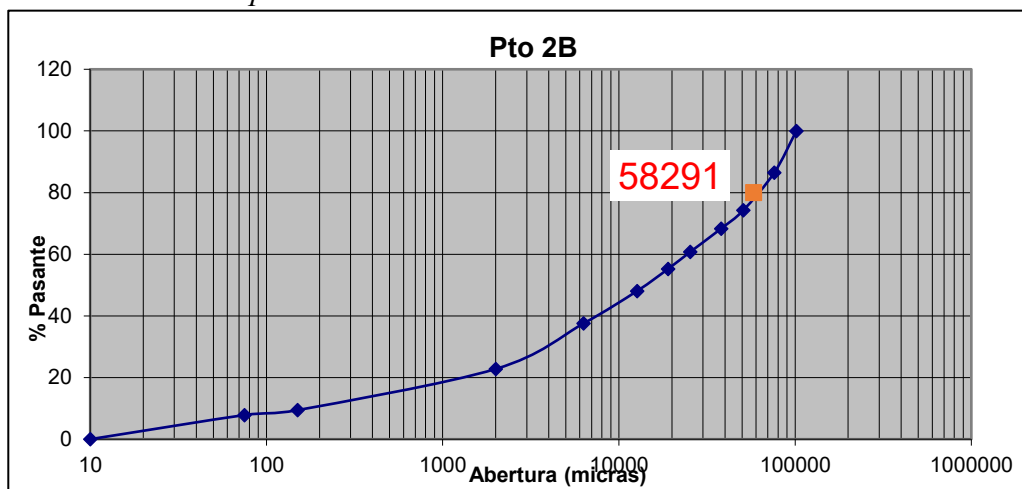
Granulometría del punto 1B



Nota. $P(80) = 2,27''$

Figura 25

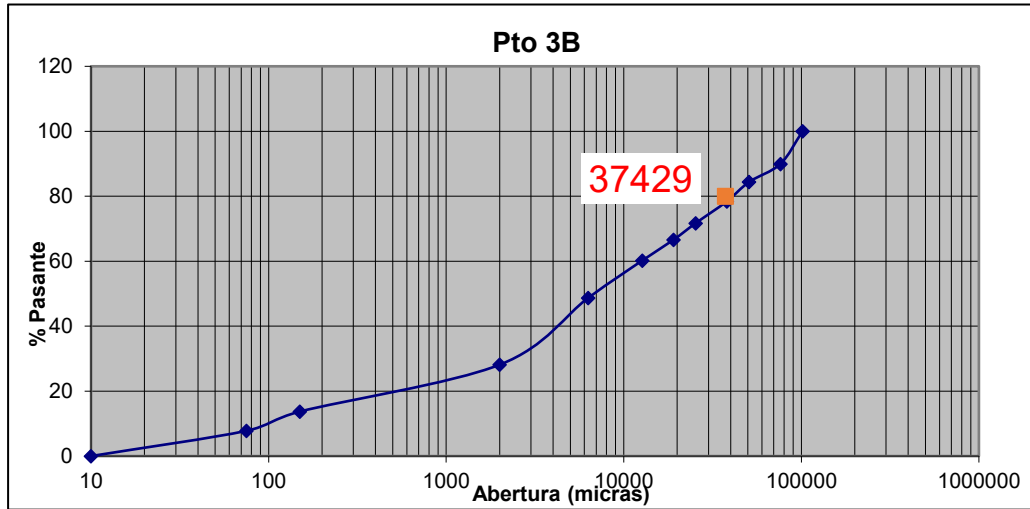
Granulometría del punto 2B



Nota. $P(80) = 2,29''$

Figura 26

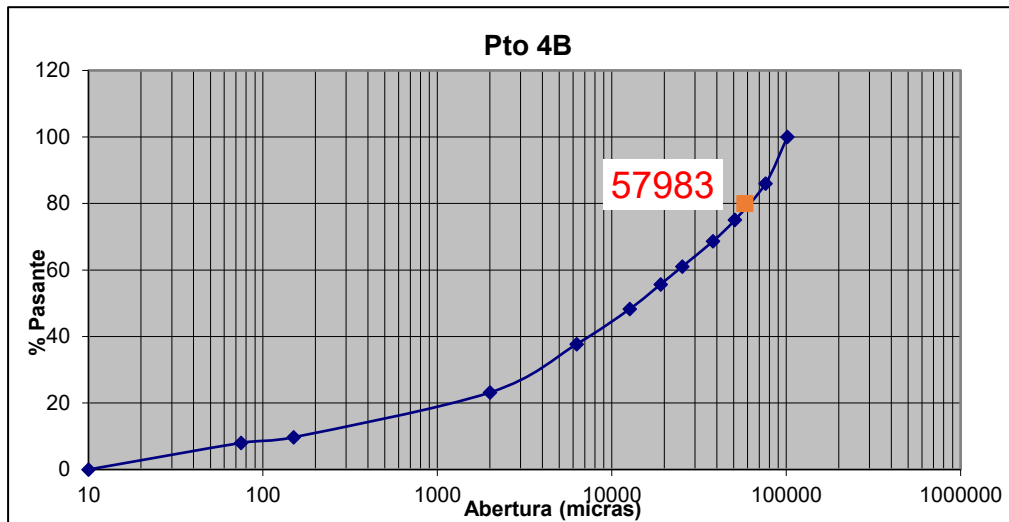
Granulometría del punto 3B



Nota. $P(80) = 1,47''$

Figura 27

Granulometría del punto 4B



Nota. $P(80) = 2,28''$

4.1.4 Resumen del análisis granulométrico

Los resultados obtenidos en las 8 muestras son resumidos en la siguiente tabla:

Tabla 8

Resumen m-200

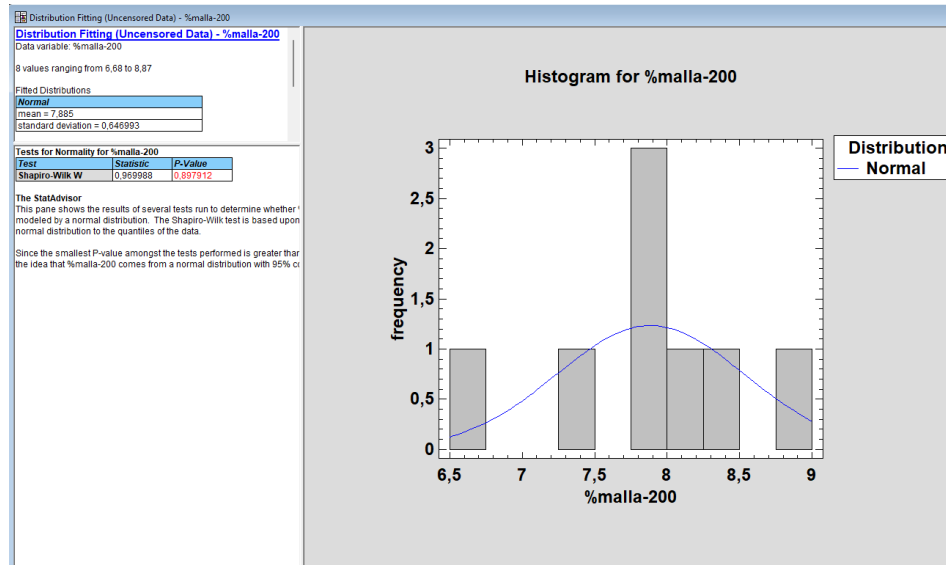
Código	% malla -200	P80 inch	P80 micras
PUNTO 1A	7,43	2,32	58987
PUNTO 2A	6,68	1,31	33398
PUNTO 3A	8,33	1,13	28692
PUNTO 4A	8,87	1,71	43479
PUNTO 1B	8,16	2,27	57700
PUNTO 2B	7,83	2,29	58291
PUNTO 3B	7,78	1,47	37429
PUNTO 4B	8,00	2,28	57983

Para establecer valores de comparación como el promedio del porcentaje de finos y P80, se requiere analizar previamente si los datos de las 8 muestras presentan distribución normal, de acuerdo con Molina (2022) es recomendable utilizar la prueba Shapiro-Wilk para muestras relativamente pequeñas donde la media y varianza poblacional son valores desconocidos en la determinación de distribución de probabilidad gaussiana o normal, para este fin se utiliza el software StatGraphics 19.

De acuerdo con el análisis de la siguiente figura, para el porcentaje de malla -200, se obtiene un valor de $p=0,898$ lo cual confirma la existencia de distribución normal por lo que se puede afirmar como promedio representativo a 7,885 %.

Figura 28

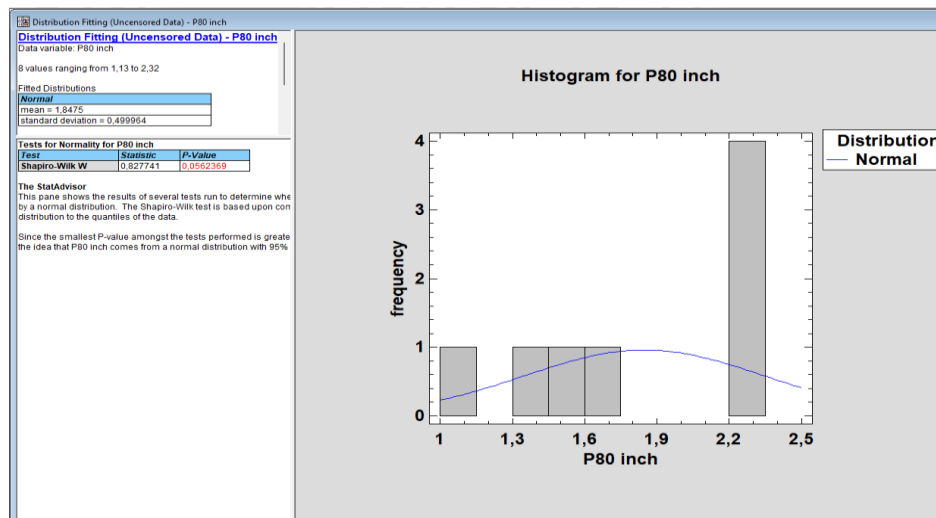
Test de normalidad % malla-200



Nota. P-value=0,898; u=7,885%

Figura 29

Test de normalidad P80



Nota. P-value=0,056; media=1,848"

Así mismo, al presentar un valor ligeramente superior a 0,05 ($p=0,056$), se puede afirmar como promedio representativo a 1,848” como el porcentaje pasante P80 al estar distribuidos de forma normal.

4.1.5 Porcentaje de finos según Split Online

El control granulométrico del mineral, posterior a la etapa de chancado, es realizado con la medición en línea del equipo instalado sobre la faja transportadora, esta se encarga de alimentar al *ore bin* donde se almacena el mineral que fue depositado en las celdas de lixiviación con el acarreo y tolveo de 7 volquetes Caterpillar 777F y 3 Komatsu HD785.

Figura 30

Transporte y acarreo del mineral



Nota. Izquierda: Tramo final de la faja sobre la cual está instalado el sistema Split. Derecha: Camiones mineros tolveando el mineral que conforma los PADS

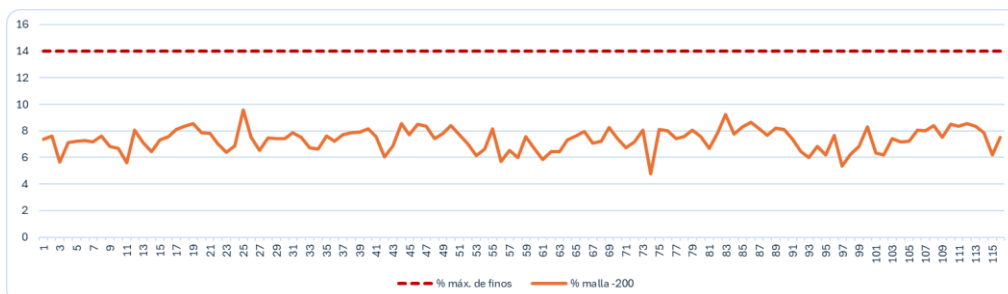
La utilización del software permite hacer mediciones de hasta 5 lecturas por minuto, el control del apilamiento del mineral en la operación está destinado a garantizar que no se sobrepase el 14 % de malla -200, esta condición es alcanzada mediante el blending del mineral desde el tajo posterior a la voladura y chancado a fin de no sobrepasar el porcentaje señalado.

El siguiente análisis se desarrolló sobre la base de 116 datos, recolectados en diferentes momentos durante la etapa de apilamiento de las celdas C1A y C1B que conforman parte de un PAD dinámico.

La figura siguiente muestra que la lectura de la granulometría del mineral transportado, para posteriormente ser encimado sobre las celdas mencionadas, se mantiene por debajo del 14 % de malla -200, si bien la tendencia no es uniforme en cuanto al porcentaje de esta granulometría, según la medición del equipo se mantiene una granulometría de alimentación adecuada.

Figura 31

Lectura en línea del porcentaje de finos



Nota. La línea en rojo indica el máximo permisible (14 %)

Tabla 9*Datos almacenados de lectura del Split Online*

dato	%m-200	dato	%m-200	dato	%m-200	dato	%m-200	dato	%m-200	dato	%m-200
1	7,38	21	7,84	41	7,57	61	5,83	81	6,68	101	6,36
2	7,62	22	7,04	42	6,04	62	6,44	82	7,86	102	6,19
3	5,66	23	6,39	43	6,89	63	6,43	83	9,25	103	7,41
4	7,13	24	6,91	44	8,54	64	7,32	84	7,79	104	7,18
5	7,24	25	9,57	45	7,72	65	7,62	85	8,29	105	7,24
6	7,26	26	7,51	46	8,49	66	7,95	86	8,64	106	8,04
7	7,17	27	6,56	47	8,35	67	7,07	87	8,14	107	7,99
8	7,60	28	7,46	48	7,44	68	7,24	88	7,66	108	8,40
9	6,84	29	7,41	49	7,82	69	8,27	89	8,22	109	7,53
10	6,71	30	7,42	50	8,42	70	7,45	90	8,10	110	8,50
11	5,61	31	7,85	51	7,72	71	6,74	91	7,37	111	8,36
12	8,08	32	7,51	52	7,03	72	7,17	92	6,44	112	8,56
13	7,10	33	6,76	53	6,15	73	8,05	93	6,00	113	8,35
14	6,46	34	6,64	54	6,63	74	4,79	94	6,85	114	7,87
15	7,32	35	7,60	55	8,16	75	8,09	95	6,17	115	6,17
16	7,57	36	7,21	56	5,71	76	8,03	96	7,66	116	7,51
17	8,11	37	7,72	57	6,53	77	7,42	97	5,34		
18	8,33	38	7,86	58	6,01	78	7,57	98	6,26		
19	8,54	39	7,92	59	7,57	79	8,08	99	6,81		
20	7,84	40	8,18	60	6,67	80	7,59	100	8,31		

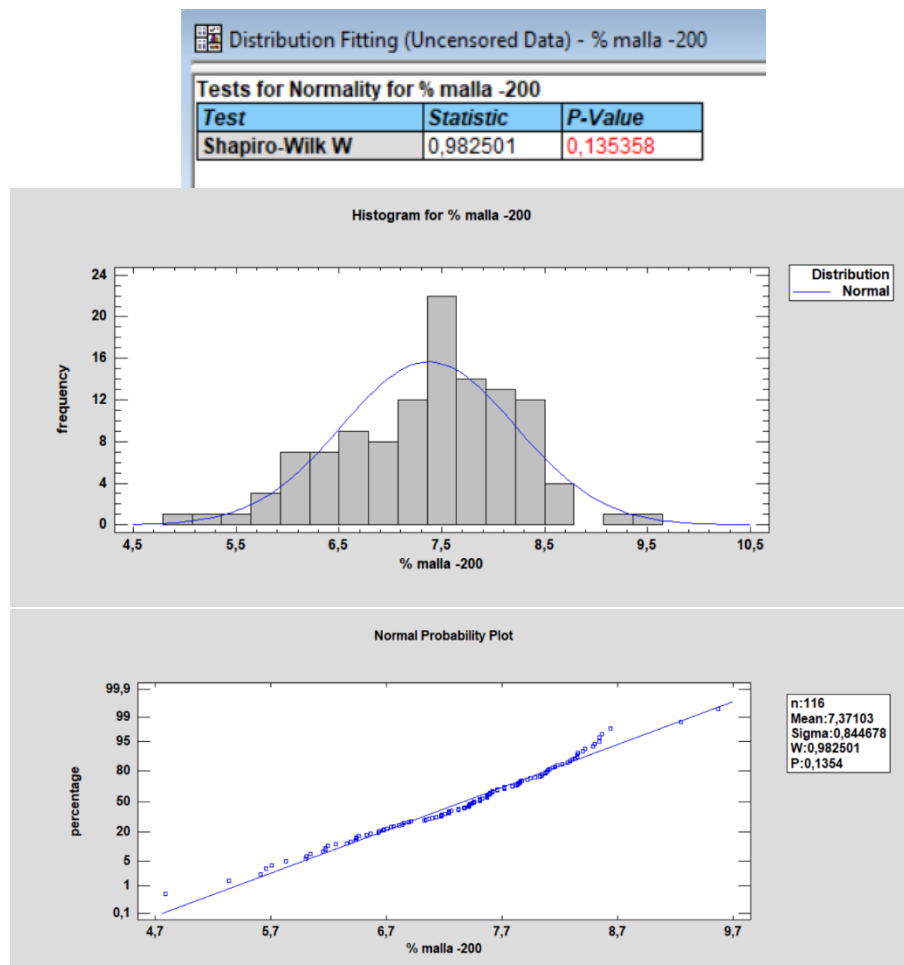
Nota. Datos recolectados durante el encimado del mineral.

4.1.6 Resumen estadístico de data Split Online

La prueba de Shapiro-Wilk efectuado a los 116 datos indica una distribución normal según la prueba efectuada en StatGraphics 19, el valor de significancia p es superior a 0,05 ($p=0,135$).

Figura 32

Test de normalidad a data del Split Online



Nota. Figuras generadas en StatGraphics 19

Demostrado la existencia de normalidad, se puede afirmar como promedio representativo a 7,371 % como porcentaje de malla pasante a 200 mesh según la lectura entregada por el sistema de monitoreo Split on line.

De la figura mostrada a continuación, es rescatable el valor mínimo y máximo de 4,79 % y 9,57 % respectivamente donde el coeficiente de variación 11,46 % indica una variabilidad relativamente mediana, esto puede ser consecuencia de la no uniformidad de la granulometría menor a -200 pero que en todo caso siempre se mantiene muy por debajo del máximo permisible, siendo en este caso 14 %.

Figura 33

Resumen de estadísticos

One Variable Analysis - % malla -200	
Summary Statistics for % malla -200	
Count	116
Average	7,37103
Standard deviation	0,844678
Coeff. of variation	11,4594%
Minimum	4,79
Maximum	9,57
Range	4,78
Std. skewness	-1,77779
Std. kurtosis	0,373192

Nota. Datos generados en StatGraphics 19

4.1.7 Muestreo en el corte de faja

El muestreo realizado directamente sobre la faja transportadora permite la medición real del mineral que es alimentado a los PADS de lixiviación, a partir de estos valores se puede estimar un modelo matemático cuya función permitió disminuir el grado de incertidumbre o error generado en la medición del software, esta tarea es realizada dos veces al mes.

Para este procedimiento se necesita desenergizar la faja transportadora previa coordinación con todo el personal relacionado con las áreas de chancado primario, mantenimiento eléctrico y el personal que estuvo a cargo del muestreo, esta labor se realiza con la ayuda de tres personas encargadas de coleccionar el mineral en sacos a lo largo de 6 metros sobre la faja con el uso de palas, una vez completado el muestreo se realiza las coordinaciones necesarias para el energizado de los equipos asegurándose de que todo el personal se encuentre a buen recaudo.

Figura 34

Lugar de muestreo en faja



Nota. Personal encargado de desenergizar y bloquear el equipo para proceder al muestreo de la faja en la zona mostrada

Para la determinación de la ecuación, se utiliza el análisis granulométrico efectuado a cada muestra para determinar el porcentaje de malla -200, este valor es contrastado con la lectura promedio del día en que se realizó el corte de faja. Los datos utilizados en la regresión lineal corresponden al muestreo realizado durante 12 meses.

Tabla 10

Lectura del Split vs muestreo en faja

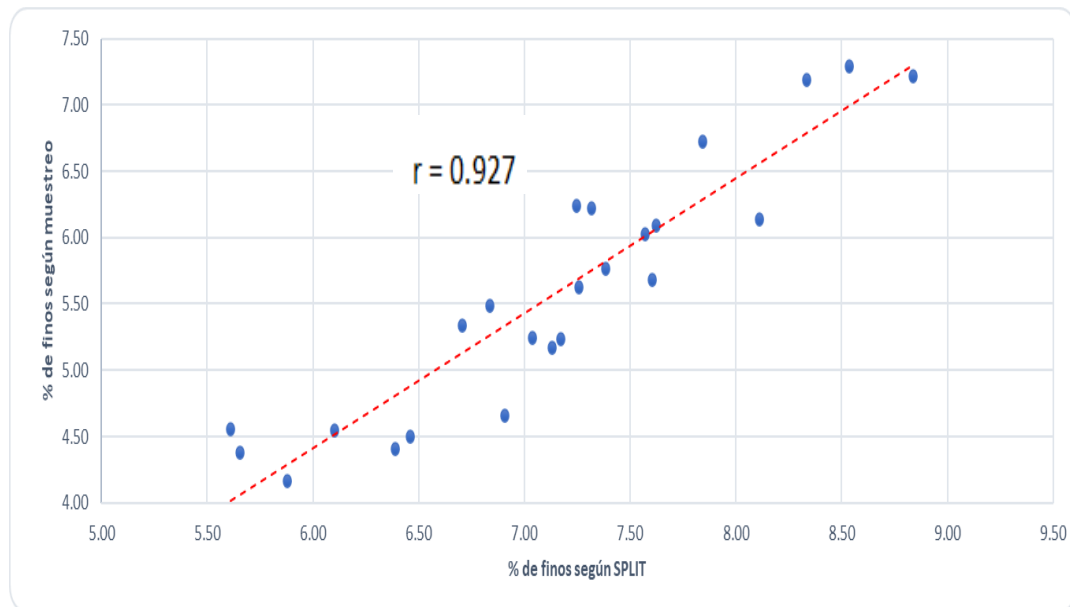
medición	lectura split	muestreo
1	7,38	5,77
2	7,62	6,09
3	5,66	4,38
4	7,13	5,17
5	7,24	6,24
6	7,26	5,63
7	7,17	5,24
8	7,60	5,68
9	6,84	5,49
10	6,71	5,33
11	5,61	4,55
12	5,88	4,17
13	6,10	4,55
14	6,46	4,50
15	7,32	6,22
16	7,57	6,03
17	8,11	6,14
18	8,33	7,18
19	8,54	7,29
20	7,84	6,73
21	8,84	7,22
22	7,04	5,25
23	6,39	4,41
24	6,91	4,65

Nota. Datos expresados en % de malla -200

De acuerdo con el análisis de correlación efectuado a ambas variables, se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,927 con lo cual se demuestra que existe bastante congruencia entre ambos valores al presentar una dependencia positiva cercana a 1.

Figura 35

Correlación Split vs muestreo en faja



La regresión lineal es elaborada con el software Statgraphics, de acuerdo con este análisis se encontró un ajuste adecuado con un coeficiente de determinación bastante aceptable de $R^2 = 86,93$. La función encontrada para este valor de ajuste corresponde a una función cuadrática de x: $Y = a + b \cdot X^2$.

Se muestra en la siguiente figura los coeficientes de la ecuación:

Figura 36

Coefficientes de regresión

Coefficients				
Parameter	Least Squares Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
Intercept	1,8676	0,315076	5,92746	0,0000
Slope	0,0716584	0,00592428	12,0957	0,0000

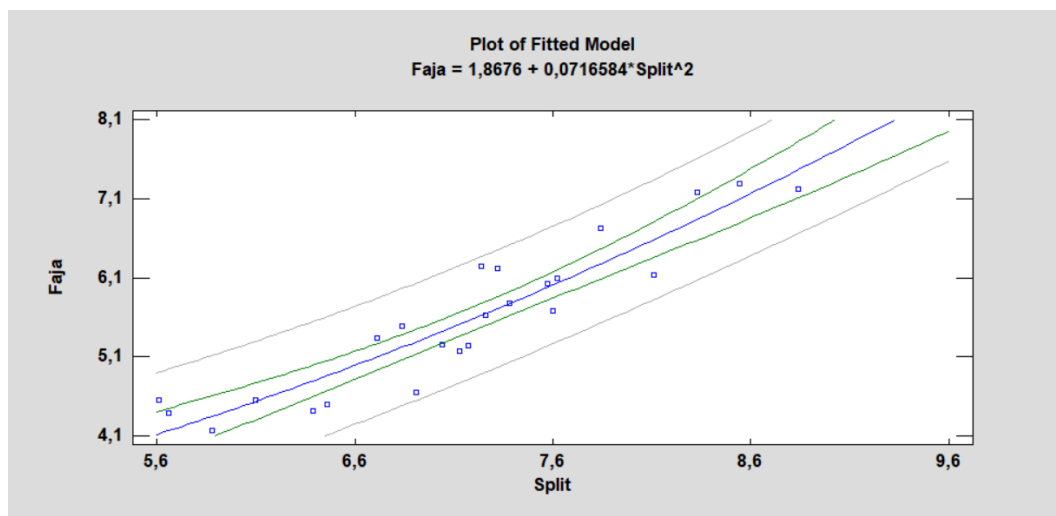
Nota. Datos generados en StatGraphics 19

Los valores menores a 0,05 del p-value en ambos casos indican que los valores son significativos para la conformación del modelo matemático, el cual queda representando por la siguiente ecuación cuadrática.

$$\% \text{ de finos en faja} = 1,8676 + 0,0716584 * \text{lectura de finos Split}^2$$

Figura 37

Ploteo del ajuste



Nota. Datos generados en StatGraphics 19

4.2 Contratación de hipótesis

- La hipótesis general planteada: La estimación del tamaño de partículas de mineral fracturado resultante del procesamiento automático de imágenes digitales con Split Online Technology se ajusta a los valores resultantes de la caracterización granulométrica manual. Los resultados de la prueba de Normalidad % Malla-200 tanto para el muestreo de calicatas y lectura de Split Online son positivas, en base a esto, ambos promedios de porcentaje de malla -200 presentan valores muy cercanos, siendo estos porcentajes de 7,885 % y 7,371 % respectivamente.
- Hipótesis específica 1: Existe congruencia entre los valores obtenidos del análisis de distribución granulométrica del muestreo de calicatas en las celdas de lixiviación con una aproximación de 93,48 % en referencia al porcentaje de finos reportados con el Split Online.
- Hipótesis específica 2: Existe congruencia entre los valores obtenidos del análisis de distribución granulométrica del corte de mineral de la faja transportadora y los valores reportados del sistema digital Split Online. Los resultados estadísticos muestran una relación lineal con coeficiente $r=0.927$ respecto a los valores granulométricos hallados de forma manual y con una ecuación cuadrática del tipo $Y = a + b \cdot X^2$ con coeficiente de determinación 86,93%.

4.3 Discusión

De los resultados de la investigación, se detalla lo siguiente:

- Se utilizó el mineral que se depositó en las celdas de lixiviación C1A y C1B para determinar la influencia del contenido de finos (% -200m) en la recuperación del oro. La extracción del oro en función del tiempo de lixiviación fue determinada mediante la evaluación de nueve pruebas de lixiviación en columnas.
- Los resultados muestran que el porcentaje de finos está fuertemente influenciado por el tiempo de lixiviación. Se encontró un coeficiente de correlación de -0,982, lo que indica una relación indirecta alta, lo que significa que a mayor contenido de finos hay un menor tiempo de percolación, por consiguiente, las columnas con mayor contenido de finos tuvieron problemas para humectarse homogéneamente, lo que resultó en menores extracciones de oro.
- Para determinar si los datos de las ocho muestras de calicatas presentan una distribución normal, se utilizó la prueba Shapiro-Wilk para muestras relativamente pequeñas mediante el software StatGraphics para establecer valores de comparación como el promedio del porcentaje fino y P80. Se encuentra un valor de $p=0,898$ para un porcentaje de malla de -200

confirmando la existencia de una distribución normal, lo que permite establecer que el promedio representativo es del 7,885 %.

- El porcentaje de finos según Split online según la prueba de Shapiro-Wilk efectuado a 116 datos muestra una distribución normal con un valor de significancia p superior a 0,05 ($p=0,135$). El porcentaje de malla pasante a 200 mesh es el 7,371 % con valores mínimos y máximos de 4,79 % y 9,57 %, respectivamente. El coeficiente de variación de 11,46 % muestra una variabilidad media, posiblemente debido a la no uniformidad de la granulometría menor a -200, pero que siempre está muy por debajo del máximo permisible, en este caso del 14 %.
- Se encontró un coeficiente de correlación de 0,927 entre la lectura Split y el muestreo en faja, lo que indica una dependencia positiva cercana a 1. La regresión lineal muestra un ajuste adecuado con un coeficiente de determinación bastante aceptable de $R^2 = 86,93$, la función que mejor se ajusta es la función cuadrática: $Y = a + b \cdot X^2$. Tanto el valor del intercepto como el de la pendiente tienen un p-valor inferior a 0,05 indicando que los valores son significativos para la conformación del modelo matemático representado en la siguiente ecuación cuadrática: **% de finos en faja = $1,8676 + 0,0716584 \cdot \text{lectura de finos Split}^2$.**

Conclusiones

1. Expresado en términos de porcentaje, el sistema digital Split online tiene una aproximación de 93,48 % en la lectura del porcentaje de malla -200 sobre las mediciones efectuadas en el muestreo mediante calicatas de dos celdas de lixiviación. Bajo este valor se puede afirmar fehacientemente la alta precisión del sistema Split Online sobre la medición del porcentaje de finos.
2. Se hace incidencia sobre el control irrestricto del porcentaje máximo de finos al sustentar, mediante pruebas de lixiviación en columnas, el contenido máximo de 14 % de finos que sobrepasan la malla -200 en el mineral que alimenta los PADS de lixiviación para no afectar significativamente la extracción de oro, valores inferiores a este porcentaje alcanzaron recuperaciones por encima de 70 % de extracción.
3. Se obtuvo medias representativas de 7,371 % y 7,885 % en la lectura del porcentaje de malla -200 % el sistema digital Split y las mediciones efectuadas en el muestreo mediante calicatas respectivamente, ambos promedios fueron validados mediante test de normalidad con valores superiores a 0,05 en su nivel de significancia (p-value).
4. El análisis granulométrico efectuado en el muestreo de la faja transportadora permitió establecer el siguiente modelo matemático con un coeficiente de correlación de $R^2 = 86,93$: % de finos en faja = $1,8676 + 0,0716584 * \text{lectura de}$

finos Split ². Esta ecuación permite corregir el valor del porcentaje de finos (Y) a partir de la lectura ofrecida por la medición del sistema Split Online (X).

Recomendaciones

1. Implementar un diseño de muestreo estratificado aleatorio para la recolección de calicatas en la celda de lixiviación. Esto asegurará una representación precisa de la variabilidad espacial de la distribución granulométrica del mineral dentro de la celda.
2. Establecer mantenimientos preventivos y/o correctivos para Split Online, para poder obtener resultados verídicos con baja desviación estándar de los datos recolectados.
3. Optar por tecnologías con inteligencia artificial como herramientas poderosas que tiene el potencial de facilitar la evaluación granulométrica del mineral. La IA puede ayudar a avanzar en la investigación científica, mejorar el control de calidad en procesos industriales con propiedades innovadoras al ofrecer mayor precisión, velocidad y objetividad.

Referencias bibliográficas

- Arias-Lafargue, T., Fernández, D., Sánchez, Y., & Lasserra, A. (2017). Influencia de la lixiviación en la recuperación de oro en la Mina Oro-Barita de Santiago de Cuba. *Scielo*.
- Benítez, S. (2014). *Tratamiento de imágenes de mineral acarreado post-voladura. Análisis de curvas granulométricas y comparativa mediante sistema Split On-line y Split Desktop: automático y manual*.
- Chambi, D. (2016). *Monitoreo continuo para determinar el grado de fragmentación en roca a tiempo real y mejora en el proceso de voladura - unidad minera Cuajone*.
- CODELCO. (2018). *LIXIVIACIÓN “El riego.”*
- Cotrado, R. (2017). *Efecto del parámetro de fragmentación P80 en la velocidad de excavación de las palas electromecánicas en mina Cuajone*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Guzmán, L., & Hermitaño, A. (2005a). *Geología del proyecto Pucamarca*. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG16-186.pdf>
- Guzmán, L., & Hermitaño, A. (2005b). *Geología del proyecto Pucamarca*. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG16-186.pdf>
- Haro, M. (2020). *Evaluación de Circuito Molienda Clasificatoria de la Planta Concentradora Toquepala* [UNSA]. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/11526>

- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. del P. (2014). *Metodología de la investigación*.
- Huamán, K. (2022). *Aplicación de la nueva solución acuosa de nitrato gasificable para optimizar las voladuras primarias de la fase 1 - 2 del Tajo Toromocho-Minera Chinalco Perú S.A.* UNDAC.
- Juárez, C. (2019). "Implementación del programa de observadores de seguridad para identificar y reducir comportamientos inseguros – unidad minera Pucamarca – compañía minera MINSUR." UNSA.
- Machaca, J. (2015). *Determinación de la fragmentación utilizando el sistema Split Online en los frentes de minado de las palas en la unidad minera Cuajone de la empresa Southern Perú Copper Corporation.* UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA.
- Madrid, A. (2015). *Determinación de granulometría y estrategia de extracción de material minero para un LHD minero por medio de mediciones laser.* Universidad de Chile.
- Martínez, A. (2016). *Medida de la fragmentación del escombros de voladura con sistemas digitales de imágenes Split Online y Split Desktop en las minas el Aljibe(Toledo) y cobre las Cruces (Sevilla).*
- Martínez, M. (2012). *Calibración, validación y aplicación del modelo HEAPSIM para estimar la producción de cobre de los bronce y Collahuasi.* Universidad de Chile.

- MEM. (2023). *Perú: La tierra del oro, la plata y el cobre.*
- Molina, M. (2022, February). *Análisis de normalidad. Una imagen vale más que mil palabras.* <https://anestesiario.org/2022/analisis-de-normalidad-una-imagen-vale-mas-que-mil-palabras/>
- Ofosuhene, N., & Abaka-Wood, G. B. (2020). *A study of the effect of changes in leach feed particle size on gold recovery from low-grade ores.* 354–358. <https://www.researchgate.net/publication/344160571>
- Quiliche, I. (2022). *Mejoramiento de la percolabilidad con el uso del Kollasol STG LF y la recuperación de oro en la unidad minera Pucamarca-MINSUR - Tacna.* Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Schunnesson, H., & Mozaffari, S. (2009). Production control and optimization in open pit mining using a drill monitoring system and an image analysis system - A case study from Aitik copper mine in Sweden. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 57(9), 244–251.
- Vara, A. (2015). *7 pasos para elaborar una tesis: cómo elaborar y asesorar una tesis para ciencias administrativas, finanzas, ciencias sociales y humanidades* (Empresa Editora Macro EIRL, Ed.).

Anexos

Anexo 1: Análisis granulométrico Punto 1A

Malla	Abertura (micrones)	PESO RETENIDO SECO Kg	Peso retenido %	Peso retenido acumulado%	Peso pasante acumulado%	P80			
						Log X	Log Y	Log Y'	Y'
4"	101600	0.00	0.00	0.00	100.00	5.01	2.00	1.99	97.45
3"	76200	2.53	12.38	12.38	87.62	4.88	1.94	1.94	87.79
2"	50800	3.11	15.24	27.62	72.38	4.71	1.86	1.88	75.78
1 1/2"	38100	0.97	4.76	32.38	67.62	4.58	1.83	1.83	68.27
1"	25400	1.55	7.62	40.00	60.00	4.40	1.78	1.77	58.93
3/4"	19050	1.17	5.71	45.71	54.29	4.28	1.73	1.73	53.09
1/2"	12700	1.36	6.67	52.38	47.62	4.10	1.68	1.66	45.83
1/4"	6300	2.14	10.48	62.86	37.14	3.80	1.57	1.55	35.53
10	2000	3.11	15.24	78.10	21.90	3.30	1.34	1.37	23.44
100	150	2.67	13.11	91.20	8.80	2.18	0.94	0.96	9.16
200	75	0.28	1.37	92.57	7.43	1.88	0.87	0.85	7.12
-200	10	1.52	7.43	100.00	0.00				
	peso muestra Kg	20.41							

Intercepto eje Y	0.17
Coef. de correlación	1.00
Coficiente (X)	0.36
10 [^] (intercepto en Y)	1.49
P(80) micras	58987
P(80) pulgadas	2.32

Anexo 2: Análisis granulométrico Punto 2A

Malla	Abertura (micrones)	PESO RETENIDO SECO Kg	Peso retenido %	Peso retenido acumulado%	Peso pasante acumulado%	P80			
						Log X	Log Y	Log Y'	Y'
4"	101600	0,00	0,00	0,00	100,00	5,01	2,00	2,10	125,90
3"	76200	1,75	7,69	7,69	92,31	4,88	1,97	2,05	111,97
2"	50800	0,97	4,27	11,97	88,03	4,71	1,94	1,98	94,91
1 1/2"	38100	0,97	4,27	16,24	83,76	4,58	1,92	1,93	84,41
1"	25400	1,75	7,69	23,93	76,07	4,40	1,88	1,85	71,55
3/4"	19050	1,17	5,13	29,06	70,94	4,28	1,85	1,80	63,64
1/2"	12700	2,14	9,40	38,46	61,54	4,10	1,79	1,73	53,94
1/4"	6300	3,69	16,24	54,70	45,30	3,80	1,66	1,61	40,54
10	2000	4,86	21,37	76,07	23,93	3,30	1,38	1,40	25,40
100	150	3,59	15,77	91,84	8,16	2,18	0,91	0,95	8,84
200	75	0,34	1,48	93,32	6,68	1,88	0,82	0,82	6,66
-200	10	1,52	6,68	100,00	0,00				
	peso muestra Kg	22,74							

Intercepto eje Y	0,06
Coef. de correlación	0,99
Coefficiente (X)	0,41
10^(intercepto en Y)	1,15
P(80) micras	33398
P(80) pulgadas	1,31

Anexo 3: Análisis granulométrico Punto 3A

Malla	Abertura (micrones)	PESO RETENIDO SECO Kg	Peso retenido %	Peso retenido acumulado%	Peso pasante acumulado%	P80			
						Log X	Log Y	Log Y'	Y'
4"	101600	0.00	0.00	0.00	100.00	5.01	2.00	2.10	127.14
3"	76200	1.84	7.92	7.92	92.08	4.88	1.96	2.06	114.42
2"	50800	1.56	6.72	14.64	85.36	4.71	1.93	1.99	98.63
1 1/2"	38100	0.78	3.35	17.99	82.01	4.58	1.91	1.95	88.76
1"	25400	0.58	2.51	20.50	79.50	4.40	1.90	1.88	76.51
3/4"	19050	0.97	4.18	24.68	75.32	4.28	1.88	1.84	68.85
1/2"	12700	1.17	5.02	29.70	70.30	4.10	1.85	1.77	59.35
1/4"	6300	2.92	12.55	42.26	57.74	3.80	1.76	1.66	45.91
10	2000	5.44	23.43	65.69	34.31	3.30	1.54	1.48	30.15
100	150	5.59	24.09	89.77	10.23	2.18	1.01	1.07	11.67
200	75	0.44	1.89	91.67	8.33	1.88	0.92	0.96	9.06
-200	10	1.94	8.33	100.00	0.00				
	peso muestra Kg	23.22							

Intercepto eje Y	0.27
Coef. de correlación	0.99
Coficiente (X)	0.37
10^(intercepto en Y)	1.86
P(80) micras	28692
P(80) pulgadas	1.13

Anexo 4: Análisis granulométrico Punto 4A

Malla	Abertura (micrones)	PESO RETENIDO SECO Kg	Peso retenido %	Peso retenido acumulado%	Peso pasante acumulado%	P80			
						Log X	Log Y	Log Y'	Y'
4"	101600	0.00	0.00	0.00	100.00	5.01	2.00	2.01	103.04
3"	76200	2.84	12.41	12.41	87.59	4.88	1.94	1.98	94.57
2"	50800	1.55	6.79	19.20	80.80	4.71	1.91	1.92	83.80
1 1/2"	38100	1.75	7.64	26.84	73.16	4.58	1.86	1.89	76.91
1"	25400	1.33	5.81	32.65	67.35	4.40	1.83	1.83	68.15
3/4"	19050	1.17	5.09	37.75	62.25	4.28	1.79	1.80	62.55
1/2"	12700	0.78	3.40	41.15	58.85	4.10	1.77	1.74	55.43
1/4"	6300	1.55	6.79	47.94	52.06	3.80	1.72	1.65	44.97
10	2000	4.53	19.78	67.71	32.29	3.30	1.51	1.50	31.94
100	150	2.99	13.06	80.78	19.22	2.18	1.28	1.17	14.75
200	75	2.37	10.35	91.13	8.87	1.88	0.95	1.08	12.00
-200	10	2.03	8.87	100.00	0.00				
	peso muestra Kg	22.89							

Intercepto eje Y	0.52
Coef. de correlación	0.98
Coeficiente (X)	0.30
10^(intercepto en Y)	3.31
P(80) micras	43479
P(80) pulgadas	1.71

Anexo 5: Análisis granulométrico Punto 1B

Malla	Abertura (micrones)	PESO RETENIDO SECO Kg	Peso retenido %	Peso retenido acumulado%	Peso pasante acumulado%	P80			
						Log X	Log Y	Log Y'	Y'
4"	101600	0.00	0.00	0.00	100.00	5.01	2.00	1.99	97.37
3"	76200	3.69	14.39	14.39	85.61	4.88	1.93	1.95	88.11
2"	50800	2.53	9.85	24.24	75.76	4.71	1.88	1.88	76.54
1 1/2"	38100	1.75	6.82	31.06	68.94	4.58	1.84	1.84	69.26
1"	25400	1.94	7.58	38.64	61.36	4.40	1.79	1.78	60.17
3/4"	19050	1.36	5.30	43.94	56.06	4.28	1.75	1.74	54.45
1/2"	12700	1.94	7.58	51.52	48.48	4.10	1.69	1.67	47.30
1/4"	6300	2.72	10.61	62.12	37.88	3.80	1.58	1.57	37.08
10	2000	3.69	14.39	76.52	23.48	3.30	1.37	1.40	24.89
100	150	3.47	13.54	90.05	9.95	2.18	1.00	1.01	10.13
200	75	0.46	1.79	91.84	8.16	1.88	0.91	0.90	7.96
-200	10	2.09	8.16	100.00	0.00				
	peso muestra Kg	25.65							

Intercepto eje Y	0.25
Coef. de correlación	1.00
Coeficiente (X)	0.35
10 [^] (intercepto en Y)	1.78
P(80) micras	57700
P(80) pulgadas	2.27

Anexo 6: Análisis granulométrico Punto 2B

Malla	Abertura (micrones)	PESO RETENIDO SECO Kg	Peso retenido %	Peso retenido acumulado%	Peso pasante acumulado%	P80			
						Log X	Log Y	Log Y'	Y'
4"	101600	0.00	0.00	0.00	100.00	5.01	2.00	1.99	97.38
3"	76200	3.11	13.50	13.50	86.50	4.88	1.94	1.94	87.96
2"	50800	2.82	12.24	25.74	74.26	4.71	1.87	1.88	76.20
1 1/2"	38100	1.36	5.91	31.65	68.35	4.58	1.83	1.84	68.82
1"	25400	1.75	7.59	39.24	60.76	4.40	1.78	1.78	59.62
3/4"	19050	1.26	5.49	44.73	55.27	4.28	1.74	1.73	53.85
1/2"	12700	1.65	7.17	51.90	48.10	4.10	1.68	1.67	46.65
1/4"	6300	2.43	10.55	62.45	37.55	3.80	1.57	1.56	36.40
10	2000	3.40	14.77	77.22	22.78	3.30	1.36	1.38	24.25
100	150	3.07	13.35	90.56	9.44	2.18	0.97	0.99	9.70
200	75	0.37	1.61	92.17	7.83	1.88	0.89	0.88	7.59
-200	10	1.80	7.83	100.00	0.00				
	peso muestra Kg	23.03							

Intercepto eje Y	0.22
Coef. de correlación	1.00
Coeficiente (X)	0.35
10^(intercepto en Y)	1.65
P(80) micras	58291
P(80) pulgadas	2.29

Anexo 7: Análisis granulométrico Punto 3B

Malla	Abertura (micrones)	PESO RETENIDO SECO Kg	Peso retenido %	Peso retenido acumulado%	Peso pasante acumulado%	P80			
						Log X	Log Y	Log Y'	Y'
4"	101600	0.00	0.00	0.00	100.00	5.01	2.00	2.05	112.95
3"	76200	2.29	10.06	10.06	89.94	4.88	1.95	2.01	102.27
2"	50800	1.26	5.54	15.60	84.40	4.71	1.93	1.95	88.90
1 1/2"	38100	1.36	5.96	21.56	78.44	4.58	1.89	1.91	80.49
1"	25400	1.54	6.75	28.31	71.69	4.40	1.86	1.84	69.97
3/4"	19050	1.17	5.11	33.42	66.58	4.28	1.82	1.80	63.35
1/2"	12700	1.46	6.39	39.81	60.19	4.10	1.78	1.74	55.07
1/4"	6300	2.62	11.50	51.31	48.69	3.80	1.69	1.64	43.23
10	2000	4.69	20.57	71.88	28.12	3.30	1.45	1.46	29.08
100	150	3.29	14.41	86.29	13.71	2.18	1.14	1.08	11.89
200	75	1.35	5.93	92.22	7.78	1.88	0.89	0.97	9.36
-200	10	1.77	7.78	100.00	0.00				
	peso muestra Kg	22.81							

Intercepto eje Y	0.32
Coef. de correlación	0.99
Coefficiente (X)	0.35
10^(intercepto en Y)	2.11
P(80) micras	37429
P(80) pulgadas	1.47

Anexo 8: Análisis granulométrico Punto 4B

Malla	Abertura (micrones)	PESO RETENIDO SECO Kg	Peso retenido %	Peso retenido acumulado%	Peso pasante acumulado%	P80			
						Log X	Log Y	Log Y'	Y'
4"	101600	0.00	0.00	0.00	100.00	5.01	2.00	1.99	97.37
3"	76200	3.40	13.97	13.97	86.03	4.88	1.93	1.94	88.04
2"	50800	2.67	10.98	24.95	75.05	4.71	1.88	1.88	76.38
1 1/2"	38100	1.55	6.39	31.34	68.66	4.58	1.84	1.84	69.05
1"	25400	1.85	7.58	38.92	61.08	4.40	1.79	1.78	59.91
3/4"	19050	1.31	5.39	44.31	55.69	4.28	1.75	1.73	54.17
1/2"	12700	1.80	7.39	51.70	48.30	4.10	1.68	1.67	46.99
1/4"	6300	2.58	10.58	62.28	37.72	3.80	1.58	1.57	36.76
10	2000	3.55	14.57	76.85	23.15	3.30	1.36	1.39	24.59
100	150	3.27	13.45	90.29	9.71	2.18	0.99	1.00	9.92
200	75	0.41	1.70	92.00	8.00	1.88	0.90	0.89	7.78
-200	10	1.95	8.00	100.00	0.00				
	peso muestra Kg	24.34							

Intercepto eje Y	0.23
Coef. de correlación	1.00
Coeficiente (X)	0.35
10 ⁴ (intercepto en Y)	1.71
P(80) micras	57983
P(80) pulgadas	2.28

Anexo 9: Extracción calculada 20%

DÍAS LIXIVIACIÓN	SOLUCIÓN RICA		FINOS EN SOLUCIÓN (mg)	FINOS ACUMULADOS (mg)	% EXTRACCIÓN CALCULADA
	Volumen (L)	Au (g/m ³)	Au	Au	Au
1					0
2			0,00	0,00	0,00
3	7,62	0,630	4,80	4,80	20,87
4	6,46	0,405	2,61	7,42	32,23
5	7,38	0,160	1,18	8,60	37,37
6	7,19	0,088	0,63	9,23	40,12
7	6,83	0,061	0,42	9,65	41,93
8	4,95	0,059	0,29	9,94	43,20
9	5,42	0,054	0,29	10,23	44,47
10	6,49	0,046	0,30	10,53	45,77
11	6,94	0,034	0,24	10,77	46,80
12	0,57	0,009	0,01	10,77	46,82
13	5,60	0,048	0,27	11,04	47,99
14	6,25	0,023	0,14	11,19	48,61
15	6,82	0,029	0,20	11,38	49,47
16	6,44	0,020	0,13	11,51	50,03
17	5,14	0,020	0,10	11,62	50,48
18	5,90	0,020	0,12	11,73	50,99
19	6,18	0,020	0,12	11,86	51,53
20	6,63	0,007	0,05	11,90	51,73
21	6,14	0,010	0,06	11,96	52,00
22	6,33	0,007	0,05	12,01	52,20
23	5,71	0,006	0,03	12,04	52,35
24	6,20	0,006	0,04	12,08	52,50
25	6,15	0,005	0,03	12,11	52,63
26	6,05	0,005	0,03	12,14	52,76
27	3,75	0,002	0,01	12,15	52,79
28	1,15	0,006	0,01	12,15	52,82

Anexo 10: Extracción calculada 18%-A

DIAS LIXIVIACIÓN	SOLUCIÓN RICA		FINOS EN SOLUCIÓN (mg)	FINOS ACUMULADOS (mg)	% EXTRACCIÓN CALCULADA
	Volumen (L)	Au (g/m ³)	Au	Au	Au
1					0
2	7,16	0,627	4,49	4,49	19,51
3	7,39	0,309	2,28	6,77	29,43
4	7,35	0,169	1,24	8,01	34,83
5	7,16	0,106	0,76	8,77	38,13
6	6,82	0,075	0,51	9,28	40,35
7	7,35	0,068	0,50	9,78	42,52
8	7,73	0,048	0,37	10,15	44,13
9	7,19	0,044	0,32	10,47	45,51
10	7,44	0,041	0,30	10,78	46,83
11	7,46	0,039	0,29	11,07	48,10
12	7,31	0,037	0,27	11,34	49,27
13	7,65	0,036	0,28	11,61	50,47
14	7,30	0,035	0,26	11,87	51,58
15	7,44	0,035	0,26	12,13	52,71
16	7,64	0,029	0,22	12,35	53,67
17	7,31	0,029	0,21	12,56	54,59
18	7,21	0,027	0,19	12,76	55,44
19	5,24	0,025	0,13	12,89	56,01
20	7,33	0,018	0,13	13,02	56,58
21	4,78	0,016	0,08	13,10	56,91
22	8,87	0,015	0,13	13,23	57,49
23	6,97	0,015	0,10	13,33	57,95
24	4,94	0,016	0,08	13,41	58,29
25	8,28	0,012	0,10	13,51	58,72
26	7,48	0,008	0,06	13,57	58,98
27	3,90	0,007	0,03	13,60	59,10
28	8,55	0,006	0,05	13,65	59,32
29	5,70	0,007	0,04	13,69	59,50
30	7,41	0,005	0,04	13,73	59,66
31	7,44	0,005	0,04	13,76	59,82
32	7,40	0,004	0,03	13,79	59,95
33	6,35	0,006	0,04	13,83	60,11
34	1,45	0,004	0,01	13,84	60,14
35	0,56	0,004	0,00	13,84	60,15

Anexo 11: Extracción calculada 18%-B

DIAS LIXIVIACIÓN	SOLUCIÓN RICA		FINOS EN SOLUCIÓN (mg)	FINOS ACUMULADOS (mg)	% EXTRACCIÓN CALCULADA
	Volumen (L)	Au (g/m ³)	Au	Au	Au
1					0
2	7,10	0,625	4,44	4,44	19,28
3	7,46	0,285	2,13	6,56	28,52
4	7,44	0,151	1,12	7,69	33,40
5	7,24	0,087	0,63	8,31	36,14
6	7,05	0,079	0,56	8,87	38,56
7	7,01	0,065	0,46	9,33	40,54
8	7,56	0,069	0,52	9,85	42,80
9	7,35	0,059	0,43	10,28	44,69
10	7,44	0,056	0,42	10,70	46,50
11	7,68	0,047	0,36	11,06	48,07
12	7,64	0,044	0,34	11,40	49,53
13	7,52	0,036	0,27	11,67	50,71
14	7,27	0,034	0,25	11,91	51,78
15	7,23	0,031	0,22	12,14	52,75
16	7,20	0,032	0,23	12,37	53,75
17	7,13	0,023	0,16	12,53	54,47
18	7,09	0,020	0,14	12,67	55,08
19	7,09	0,018	0,13	12,80	55,64
20	6,99	0,017	0,12	12,92	56,15
21	6,99	0,015	0,10	13,03	56,61
22	6,64	0,013	0,09	13,11	56,98
23	6,61	0,014	0,09	13,20	57,39
24	6,37	0,013	0,08	13,29	57,75
25	6,12	0,013	0,08	13,37	58,09
26	6,02	0,013	0,08	13,45	58,43
27	5,80	0,012	0,07	13,52	58,74
28	5,78	0,009	0,05	13,57	58,97
29	5,56	0,008	0,04	13,61	59,16
30	5,39	0,050	0,27	13,88	60,33
31	4,57	0,005	0,02	13,91	60,43
32	4,39	0,004	0,02	13,92	60,51
33	4,13	0,004	0,02	13,94	60,58
34	3,40	0,004	0,01	13,95	60,64
35	2,95	0,004	0,01	13,96	60,69
36	1,76	0,005	0,01	13,97	60,73

Anexo 12: Extracción calculada 16%-A

DIAS LIXIVIACIÓN	SOLUCIÓN RICA		FINOS EN SOLUCIÓN (mg)	FINOS ACUMULADOS (mg)	% EXTRACCIÓN CALCULADA
	Volumen (L)	Au (g/m ³)	Au	Au	Au
1					0
2	7,21	0,628	4,53	4,53	19,68
3	7,51	0,254	1,91	6,44	27,97
4	5,90	0,162	0,96	7,39	32,12
5	6,35	0,086	0,55	7,94	34,50
6	6,53	0,076	0,50	8,43	36,65
7	6,34	0,065	0,41	8,85	38,44
8	7,09	0,059	0,42	9,26	40,26
9	7,12	0,055	0,39	9,66	41,96
10	6,61	0,056	0,37	10,03	43,57
11	6,43	0,055	0,35	10,38	45,11
12	6,51	0,048	0,31	10,69	46,47
13	6,79	0,045	0,31	11,00	47,79
14	7,23	0,049	0,35	11,35	49,33
15	7,22	0,048	0,35	11,70	50,84
16	6,87	0,046	0,32	12,01	52,21
17	7,40	0,048	0,36	12,37	53,76
18	6,95	0,041	0,28	12,65	55,00
19	6,86	0,029	0,20	12,85	55,86
20	6,30	0,038	0,24	13,09	56,90
21	7,20	0,028	0,20	13,29	57,78
22	7,81	0,026	0,20	13,50	58,66
23	6,42	0,020	0,13	13,63	59,22
24	6,27	0,022	0,14	13,76	59,82
25	7,74	0,022	0,17	13,93	60,56
26	7,39	0,025	0,18	14,12	61,36
27	6,20	0,019	0,12	14,24	61,87
28	6,38	0,023	0,15	14,38	62,51
29	6,43	0,019	0,12	14,50	63,03
30	6,91	0,012	0,08	14,59	63,39
31	6,54	0,012	0,08	14,67	63,74
32	5,80	0,009	0,05	14,72	63,96
33	5,78	0,009	0,05	14,77	64,19
34	5,80	0,009	0,05	14,82	64,42
35	5,78	0,008	0,05	14,87	64,62
36	5,56	0,007	0,04	14,91	64,79
37	5,39	0,005	0,03	14,93	64,90
38	4,57	0,005	0,02	14,96	65,00
39	4,39	0,004	0,02	14,97	65,08
40	4,13	0,003	0,01	14,99	65,13
41	3,40	0,002	0,01	14,99	65,16
42	2,82	0,002	0,01	15,00	65,19
43	0,15	0,005	0,00	15,00	65,19

Anexo 13: Extracción calculada 16%-B

DÍAS LIXIVIACIÓN	SOLUCIÓN RICA		FINOS EN SOLUCIÓN (mg)	FINOS ACUMULADOS (mg)	% EXTRACCIÓN CALCULADA
	Volumen (L)	Au (g/m ³)	Au	Au	Au
1					0
2	7,40	0,632	4,68	4,68	20,33
3	7,39	0,257	1,90	6,58	28,58
4	7,02	0,172	1,21	7,78	33,83
5	6,13	0,095	0,58	8,37	36,36
6	7,14	0,087	0,62	8,99	39,06
7	7,03	0,069	0,49	9,47	41,17
8	6,57	0,054	0,35	9,83	42,71
9	6,43	0,055	0,35	10,18	44,24
10	6,40	0,056	0,36	10,54	45,80
11	6,61	0,055	0,36	10,90	47,38
12	7,33	0,048	0,35	11,25	48,91
13	6,81	0,045	0,31	11,56	50,24
14	8,67	0,049	0,42	11,99	52,09
15	6,92	0,048	0,33	12,32	53,53
16	6,97	0,036	0,25	12,57	54,62
17	7,10	0,028	0,20	12,77	55,49
18	6,75	0,024	0,16	12,93	56,19
19	6,37	0,023	0,15	13,08	56,83
20	8,20	0,021	0,18	13,25	57,59
21	6,86	0,022	0,15	13,40	58,25
22	6,99	0,022	0,15	13,56	58,91
23	7,31	0,023	0,17	13,72	59,64
24	7,23	0,019	0,14	13,86	60,24
25	7,11	0,018	0,13	13,99	60,80
26	6,73	0,013	0,09	14,08	61,18
27	6,34	0,016	0,10	14,18	61,62
28	6,79	0,014	0,10	14,27	62,03
29	7,18	0,011	0,08	14,35	62,38
30	7,26	0,012	0,09	14,44	62,75
31	7,46	0,009	0,07	14,51	63,05
32	7,27	0,008	0,06	14,57	63,30
33	7,18	0,007	0,05	14,62	63,52
34	6,42	0,005	0,03	14,65	63,66
35	6,59	0,004	0,03	14,67	63,77
36	6,42	0,004	0,03	14,70	63,88
37	5,97	0,005	0,03	14,73	64,01
38	5,41	0,006	0,03	14,76	64,15
39	5,20	0,005	0,03	14,79	64,27
40	4,80	0,006	0,03	14,82	64,39
41	4,54	0,003	0,01	14,83	64,45
42	4,13	0,002	0,01	14,84	64,49
43	1,55	0,002	0,00	14,84	64,50
43	0,18	0,004	0,00	14,84	64,50

Anexo 14: Extracción calculada 14%-A

DÍAS LIXIVIACIÓN	SOLUCIÓN RICA		FINOS EN SOLUCIÓN (mg)	FINOS ACUMULADOS (mg)	% EXTRACCIÓN CALCULADA
	Volumen (L)	Au (g/m ³)	Au	Au	Au
1					0
2	7,40	0,642	4,75	4,75	20,65
3	6,79	0,271	1,84	6,59	28,64
4	6,57	0,196	1,29	7,88	34,24
5	5,61	0,135	0,76	8,64	37,53
6	7,72	0,103	0,80	9,43	40,99
7	6,83	0,096	0,66	10,09	43,84
8	6,88	0,085	0,58	10,67	46,38
9	6,36	0,071	0,45	11,12	48,34
10	6,22	0,059	0,37	11,49	49,94
11	6,32	0,052	0,33	11,82	51,36
12	6,57	0,046	0,30	12,12	52,68
13	6,44	0,041	0,26	12,39	53,82
14	6,78	0,039	0,26	12,65	54,97
15	6,82	0,037	0,25	12,90	56,07
16	6,64	0,037	0,25	13,15	57,14
17	8,97	0,036	0,32	13,47	58,54
18	5,53	0,031	0,17	13,64	59,29
19	7,80	0,028	0,22	13,86	60,24
20	7,72	0,023	0,18	14,04	61,01
21	6,01	0,021	0,13	14,16	61,56
22	7,09	0,024	0,17	14,33	62,30
23	7,06	0,021	0,15	14,48	62,94
24	6,74	0,027	0,18	14,66	63,73
25	6,67	0,026	0,17	14,84	64,48
26	7,36	0,021	0,15	14,99	65,16
27	6,45	0,020	0,13	15,12	65,72
28	6,35	0,019	0,12	15,24	66,24
29	6,71	0,018	0,12	15,36	66,77
30	7,16	0,020	0,14	15,51	67,39
31	7,26	0,016	0,12	15,62	67,89
32	7,58	0,015	0,11	15,74	68,39
33	7,54	0,014	0,11	15,84	68,85
34	7,57	0,012	0,09	15,93	69,24
35	6,62	0,011	0,07	16,01	69,56
36	6,22	0,011	0,07	16,07	69,85
37	7,66	0,009	0,07	16,14	70,15
38	7,14	0,008	0,06	16,20	70,40
39	5,20	0,005	0,03	16,23	70,52
40	4,80	0,006	0,03	16,25	70,64
41	4,54	0,003	0,01	16,27	70,70
42	4,35	0,002	0,01	16,28	70,74
43	4,23	0,002	0,01	16,29	70,77
44	4,15	0,004	0,02	16,30	70,85
45	4,05	0,002	0,01	16,31	70,88
46	4,02	0,002	0,01	16,32	70,92
47	1,55	0,002	0,00	16,32	70,93
48	0,18	0,004	0,00	16,32	70,93

Anexo 15: Extracción calculada 14%-B

DIAS LIXIVIACIÓN	SOLUCIÓN RICA		FINOS EN SOLUCIÓN (mg)	FINOS ACUMULADOS (mg)	% EXTRACCIÓN CALCULADA
	Volumen (L)	Au (g/m)	Au	Au	Au
1					0
2	7,35	0,622	4,57	4,57	19,87
3	6,28	0,286	1,80	6,37	27,67
4	6,79	0,177	1,20	7,57	32,90
5	7,12	0,125	0,89	8,46	36,76
6	7,29	0,105	0,77	9,23	40,09
7	6,49	0,102	0,66	9,89	42,97
8	6,47	0,089	0,58	10,46	45,47
9	6,32	0,075	0,47	10,94	47,53
10	6,24	0,061	0,38	11,32	49,19
11	7,05	0,049	0,35	11,66	50,69
12	6,83	0,045	0,31	11,97	52,02
13	7,01	0,042	0,29	12,26	53,30
14	7,14	0,041	0,29	12,56	54,57
15	6,92	0,038	0,26	12,82	55,72
16	7,03	0,036	0,25	13,07	56,82
17	6,59	0,032	0,21	13,28	57,73
18	7,88	0,031	0,24	13,53	58,79
19	7,07	0,029	0,21	13,73	59,69
20	7,08	0,028	0,20	13,93	60,55
21	7,10	0,026	0,18	14,12	61,35
22	7,15	0,025	0,18	14,30	62,13
23	6,98	0,024	0,17	14,46	62,85
24	7,04	0,024	0,17	14,63	63,59
25	6,58	0,023	0,15	14,78	64,25
26	7,24	0,022	0,16	14,94	64,94
27	7,16	0,022	0,16	15,10	65,63
28	6,53	0,023	0,15	15,25	66,28
29	7,56	0,021	0,16	15,41	66,97
30	7,15	0,022	0,16	15,57	67,65
31	7,28	0,018	0,13	15,70	68,22
32	6,99	0,016	0,11	15,81	68,71
33	7,35	0,015	0,11	15,92	69,19
34	7,31	0,013	0,10	16,02	69,60
35	7,73	0,012	0,09	16,11	70,00
36	7,41	0,011	0,08	16,19	70,36
37	7,83	0,002	0,01	16,20	70,42
38	7,38	0,006	0,04	16,25	70,61
39	5,73	0,005	0,03	16,28	70,74
40	5,35	0,004	0,02	16,30	70,83
41	4,83	0,004	0,02	16,32	70,92
42	4,31	0,005	0,02	16,34	71,01
43	4,73	0,005	0,02	16,36	71,11
44	1,41	0,003	0,00	16,37	71,13
45	4,83	0,003	0,01	16,38	71,19
46	4,31	0,002	0,01	16,39	71,23
47	1,41	0,003	0,00	16,39	71,25
48	0,36	0,003	0,00	16,40	71,25

Anexo 16: Extracción calculada 12%-A

DÍAS LIXIVIACIÓN	SOLUCIÓN RICA		FINOS EN SOLUCIÓN (mg)	FINOS ACUMULADOS (mg)	% EXTRACCIÓN CALCULADA
	Volumen (L)	Au (g/mi)	Au	Au	Au
1					0
2	7,35	0,638	4,69	4,69	20,38
3	6,12	0,315	1,93	6,62	28,76
4	7,22	0,166	1,20	7,82	33,97
5	5,68	0,125	0,71	8,53	37,05
6	7,08	0,107	0,76	9,28	40,34
7	7,56	0,098	0,74	10,02	43,56
8	7,40	0,085	0,63	10,65	46,30
9	7,84	0,081	0,64	11,29	49,06
10	7,80	0,078	0,61	11,90	51,70
11	6,92	0,076	0,53	12,42	53,99
12	6,64	0,064	0,43	12,85	55,83
13	6,98	0,055	0,38	13,23	57,50
14	6,69	0,041	0,27	13,51	58,69
15	6,76	0,036	0,24	13,75	59,75
16	7,21	0,033	0,24	13,99	60,79
17	7,52	0,028	0,21	14,20	61,70
18	7,41	0,028	0,21	14,41	62,60
19	7,50	0,026	0,20	14,60	63,45
20	6,47	0,024	0,16	14,76	64,13
21	7,28	0,023	0,17	14,92	64,85
22	6,68	0,020	0,13	15,06	65,43
23	7,00	0,019	0,13	15,19	66,01
24	7,17	0,020	0,14	15,33	66,64
25	7,40	0,018	0,13	15,47	67,21
26	6,95	0,018	0,13	15,59	67,76
27	6,99	0,019	0,13	15,72	68,33
28	7,40	0,020	0,15	15,87	68,98
29	6,74	0,021	0,14	16,01	69,59
30	7,24	0,019	0,14	16,15	70,19
31	7,52	0,018	0,14	16,29	70,78
32	6,96	0,016	0,11	16,40	71,26
33	7,76	0,017	0,13	16,53	71,84
34	7,48	0,015	0,11	16,64	72,32
35	7,06	0,014	0,10	16,74	72,75
36	7,74	0,012	0,09	16,83	73,16
37	7,39	0,011	0,08	16,91	73,51
38	7,04	0,009	0,06	16,98	73,78
39	5,69	0,005	0,03	17,01	73,91
40	5,42	0,004	0,02	17,03	74,00
41	4,63	0,004	0,02	17,05	74,08
42	4,58	0,005	0,02	17,07	74,18
43	4,18	0,005	0,02	17,09	74,27
44	4,21	0,003	0,01	17,10	74,33
45	4,16	0,003	0,01	17,12	74,38
46	4,31	0,002	0,01	17,12	74,42
47	3,86	0,003	0,01	17,14	74,47
48	4,11	0,003	0,01	17,15	74,52
49	3,95	0,002	0,01	17,16	74,56
50	3,85	0,002	0,01	17,16	74,59
51	0,55	0,001	0,00	17,16	74,59
52	0,15	0,003	0,00	17,16	74,60

Anexo 17: Extracción calculada 12%-B

DÍAS LIXIVIACIÓN	SOLUCIÓN RICA		FINOS EN SOLUCIÓN (mg)	FINOS ACUMULADOS (mg)	% EXTRACCIÓN CALCULADA
	Volumen (L)	Au (g/m ³)	Au	Au	Au
1					0
2	6,97	0,636	4,43	4,43	19,27
3	7,86	0,325	2,55	6,99	30,37
4	6,61	0,185	1,22	8,21	35,68
5	6,97	0,115	0,80	9,01	39,16
6	6,23	0,092	0,57	9,58	41,66
7	6,31	0,096	0,61	10,19	44,29
8	6,47	0,087	0,56	10,75	46,73
9	6,76	0,077	0,52	11,27	49,00
10	6,62	0,071	0,47	11,74	51,04
11	6,74	0,074	0,50	12,24	53,21
12	6,34	0,066	0,42	12,66	55,03
13	7,01	0,061	0,43	13,09	56,88
14	6,93	0,051	0,35	13,44	58,42
15	7,11	0,049	0,35	13,79	59,93
16	7,01	0,041	0,29	14,08	61,18
17	5,98	0,033	0,20	14,28	62,04
18	7,78	0,032	0,25	14,52	63,12
19	7,54	0,027	0,20	14,73	64,01
20	7,34	0,026	0,19	14,92	64,84
21	6,63	0,023	0,15	15,07	65,50
22	7,03	0,021	0,15	15,22	66,14
23	7,05	0,019	0,13	15,35	66,72
24	5,38	0,018	0,10	15,45	67,14
25	6,99	0,018	0,13	15,58	67,69
26	6,33	0,016	0,10	15,68	68,13
27	6,72	0,018	0,12	15,80	68,66
28	6,51	0,019	0,12	15,92	69,19
29	7,52	0,017	0,13	16,05	69,75
30	6,85	0,015	0,10	16,15	70,20
31	6,93	0,014	0,10	16,25	70,62
32	7,06	0,013	0,09	16,34	71,02
33	7,10	0,014	0,10	16,44	71,45
34	6,55	0,014	0,09	16,53	71,85
35	7,62	0,014	0,11	16,64	72,31
36	7,57	0,012	0,09	16,73	72,70
37	7,38	0,011	0,08	16,81	73,06
38	5,96	0,009	0,05	16,86	73,29
39	5,78	0,008	0,05	16,91	73,49
40	4,98	0,006	0,03	16,94	73,62
41	4,78	0,004	0,02	16,96	73,70
42	4,95	0,005	0,02	16,98	73,81
43	4,58	0,005	0,02	17,01	73,91
44	4,87	0,003	0,01	17,02	73,98
45	4,77	0,003	0,01	17,04	74,04
46	3,89	0,002	0,01	17,04	74,07
47	3,91	0,003	0,01	17,06	74,12
48	3,45	0,001	0,00	17,06	74,14
49	3,55	0,002	0,01	17,07	74,17
50	3,61	0,002	0,01	17,07	74,20
51	0,78	0,001	0,00	17,07	74,20
52	0,35	0,002	0,00	17,07	74,21