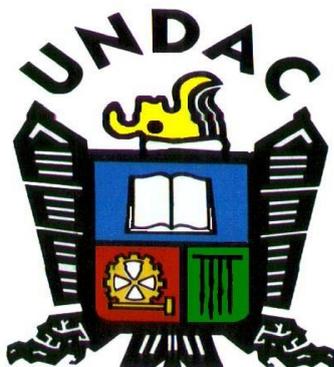


UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA
METALÚRGICA



T E S I S

**Evaluación metalúrgica del prospecto aurífero Sol Naciente en el
Sector Gloriapata – Damaso Beraun – Huánuco - 2019**

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Metalurgista

Autor:

Bach. Adan Cristian COLLAZOS APARI

Asesor:

Dr. Marco Antonio SURICHAQUI HIDALGO

Cerro de Pasco – Perú – 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA
METALÚRGICA



T E S I S

Evaluación metalúrgica del prospecto aurífero Sol Naciente en el
Sector Gloriapata – Damaso Beraun – Huánuco – 2019

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dr. Ramiro SIUCE BONIFACIO
PRESIDENTE

Dra. Rebeca Hilda PEREZ BONILLA
MIEMBRO

Mg. Manuel Antonio HUAMAN DE LA CRUZ
MIEMBRO



Universidad Nacional Daniel Alcides
Carrión Facultad de Ingeniería
Unidad de Investigación

INFORME DE ORIGINALIDAD N° 243-2024-UNDAC/UIFI

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Tesis:

**Evaluación metalúrgica del prospecto aurífero Sol
Naciente en el Sector Gloriapata – Damaso Beraun –
Huánuco - 2019**

Apellidos y nombres del tesista:

Bach. COLLAZOS APARI, Adan Cristian

Apellidos y nombres del Asesor:

Dr. SURICHAQUI HIDALGO, Marco Antonio

Escuela de Formación Profesional

Ingeniería Metalúrgica

Índice de Similitud

15 %

APROBADO

Se informa el Reporte de evaluación del software similitud para los fines pertinentes:

Cerro de Pasco, 23 de diciembre del 2024



Firmado digitalmente por MEJIA
CACERES Reynaldo FAU
20154605046 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 23.12.2024 04:35:04 -05:00

DEDICATORIA

*A mi madre, a mi padre y a mi abuela
quienes me enseñaron el valor del
esfuerzo y la perseverancia sin límites.*

*Sus sacrificios y amor incondicional
han sido la luz que guio mi camino
durante estos años de estudio.*

*Y a mi hijo que es el motor y motivo
para seguir adelante.*

AGRADECIMIENTO

A mi familia, gracias por ser mi pilar incondicional. Su amor, comprensión y apoyo constante han sido fundamentales en cada etapa de este camino. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

RESUMEN

Esta investigación tuvo como finalidad determinar el método de concentración gravimétrica adecuado que permitió obtener eficientes recuperaciones de oro; después de tener la certeza de las reservas cubiertas probables y sobre la formación geológica. Elaborar el sistema de extracción y procesamiento, este estudio se abordó desde el enfoque cuantitativo, se llevó a cabo un diseño de investigación experimental que constó de cuatro etapas. En la primera etapa, se realizó un muestreo aleatorio simple para obtener una muestra representativa del total de mineralización presente en la concesión, lo que permitió determinar el método de explotación. Las muestras muestran una notable cantidad de oro en las arcillas silíceas. Con base en esta información, se ha desarrollado un sistema para la caracterización mineralógica y la posterior concentración experimental. Se determinó que las pruebas de caracterización mineralógica y concentración experimental generan concentrados con una recuperación de oro que excede el 82%.

Palabras claves: Caracterización mineralógica, ratio de concentración, gravimetría.

ABSTRACT

The purpose of this research was to determine the most appropriate gravimetric concentration method to achieve efficient gold recovery. After confirming the probable cubic reserves and understanding the geological formation—firstly, through simple random sampling to obtain a representative sample of the total mineralized volume within the concession—the exploitation method was determined. The samples showed a significant amount of gold contained in siliceous clays. Based on this data, the mineralogical characterization system and subsequent experimental concentration procedures were designed. It was concluded that the mineralogical characterization and experimental concentration tests yielded concentrates with gold recovery rates exceeding 82%.

Keywords: Mineralogical characterization, concentration ratio, gravimetry.

INTRODUCCIÓN

Una de las funciones fundamentales de la universidad es la investigación. La creación de conocimiento es una preocupación central para las universidades, ya que es su propósito principal. A nivel global, todos los programas académicos proponen un modelo curricular basado en competencias, diseñado para formar a nuevos profesionales que puedan abordar problemas significativos de la sociedad y contribuir a la innovación del conocimiento.

La tesis se considera la prueba definitiva que valida las competencias necesarias para obtener un grado académico. Se espera que esta sea una evidencia clara de las habilidades de investigación adquiridas en la universidad y que se apliquen en el ámbito profesional.

El estudio, titulado “*Evaluación Metalúrgica del prospecto aurífero Sol Naciente en el sector de Gloriapata – Dámaso Beraun – Huánuco - 2019*”, es interesante porque se trata de un afloramiento interesante con valores de oro y que requiere una explotación ecológica y sostenible.

Los estudios desarrollados a través del muestreo y posterior tratamiento confirman que la concentración de oro por métodos gravimétricos obtiene altas recuperaciones, debido a presentarse libre en forma de charpas. Se encuentra dividido en cuatro capítulos; sigue una secuencia lógica propia de los proyectos de investigación, del siguiente modo:

CAPÍTULO I. Se determina la problemática, para formularlo en preguntas, sobre como caracterizar a las arcillas silíceas de oro, con las sub preguntas que consisten en el análisis microscópico y pruebas de concentración diversas. Su objetivo está referido a demostrar las características mineralógicas de material

en explotación, justificando la presente investigación, dada la importancia que significa llevarlo a explotar el yacimiento en forma sostenible.

CAPÍTULO II. Se expone cuatro antecedentes referidos al tema, dos

investigaciones nacionales y dos internacionales, plasmados en tesis, seguido de una descripción de las bases teóricas desde una perspectiva general a específica de los métodos de tratamiento gravimétrico; definir los términos básicos; se plantea las hipótesis y se define las variables de operación.

CAPÍTULO III. Comprende el método de investigación: experimental; nivel experimental y tipo aplicativo, desarrollando las pruebas experimentales preestablecidas en el diseño estadístico, sobre una población que corresponde toda el área donde aflora la mineralización; Cubicando el yacimiento y sobre ello diseñar el método de muestreo a seguir, continuando las etapas de investigación previamente establecidas.

CAPÍTULO IV. Los resultados obtenidos luego de ser procesados en el capítulo anterior se presentan en tablas y ecuaciones, para luego la contrastar la hipótesis, demostrándose el nivel de aceptación de los datos.

CONCLUSIONES. Se concluye que el yacimiento es prometedor; las leyes de oro existentes demostradas en el muestreo y la concentración gravimétrica a nivel laboratorio sugieren que la rentabilidad es mayor del proyecto.

El autor.

ÍNDICE

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN	
ÍNDICE	

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1. Identificación y determinación del problema	1
1.2. Delimitación de la investigación	2
1.2.1. Delimitación teórica	2
1.2.2. Delimitación espacial	2
1.2.3. Delimitación temporal	2
1.3. Formulación del problema.....	2
1.3.1. Problema general	2
1.3.2. Problemas específicos	2
1.4. Formulación de objetivos	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	3
1.5. Justificación de la investigación	3
1.6. Limitaciones de la investigación.....	3

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de estudio	4
2.2. Bases teóricas - científicas	7
2.2.1. Arcillas.....	7
2.2.2. Procesos de concentración gravimétrica de oro en placeres aluviales ..	21

2.2.3. Concentradores gravimétricos.....	24
2.3. Definición de términos básicos	30
2.4. Formulación de la hipótesis	30
2.4.1. Hipótesis general.....	30
2.4.2. Hipótesis específicas.....	30
2.5. Identificación de variables.....	30
2.5.1. Variable independiente.....	30
2.5.2. Variable dependiente.....	30
2.6. Definición operacional de variables e indicadores.....	31

CAPITULO III

METODOLOGIA Y TECNICAS DE INVESTIGACION

3.1. Tipo de Investigación	32
3.2. Nivel de investigación	32
3.3. Método de investigación	33
3.4. Diseño de investigación	33
3.5. Población y muestra	33
3.5.1. Población	33
3.5.2. Muestra	33
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	34
3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación	34
3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	35
3.9. Tratamiento estadístico de datos	35
3.10. Orientación ética filosófica y epistémica.....	36

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo.....	37
4.1.1. Cubicación de reservas.....	37
4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados.....	39

4.2.1. Caracterización mineralógica	39
4.2.2. Evaluar y comparar la eficiencia de diversas técnicas de procesamiento para la recuperación de oro	42
4.3. Prueba de hipótesis	55
4.3.1. Primera hipótesis específica	55
4.3.2. Segunda hipótesis específica	56
4.4. Discusión de resultados.....	57
CONCLUSIONES	
RECOMENDACIONES	
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Capacidad de intercambio iónico de algunas arcillas	12
Tabla 2. Amplitud del tamaño de partículas a separar y equipo sugerido	17
Tabla 3. Operacionalización de variables	31
Tabla 4. Técnicas e instrumentos	34
Tabla 5. Análisis granulométrico	39
Tabla 6. Etapas de lapeado para cada plaqueta.....	40
Tabla 7. Variables intervinientes de la concentración en jigs	43
Tabla 8. Resultados de concentración en Jigs.....	44
Tabla 9. Cálculo de los efectos de concentración en jigs.....	44
Tabla 10. <i>Corrección estadístico matemático de resultados</i>	45
Tabla 11. <i>Cálculo del desvío medio cuadrático de la recuperación de oro</i>	45
Tabla 12. <i>Variables intervinientes de la concentración en mesas vibratorias</i>	47
Tabla 13. <i>Resultados de concentración en mesas vibratorias</i>	47
Tabla 14. <i>Cálculo de los efectos de concentración en mesas vibratorias</i>	47
Tabla 15. <i>Corrección estadístico matemático de resultados de concentración en mesas vibratorias</i>	48
Tabla 16. <i>Cálculo del desvío medio cuadrático de la recuperación de oro en mesas vibratorias</i>	49
Tabla 17. <i>Condiciones de operación</i>	50
Tabla 18. <i>Concentración en el centrifugador Falcon</i>	50
Tabla 19. <i>Variables intervinientes de concentración en celdas cónicas</i>	51
Tabla 20. <i>Resultados de concentración en celdas cónicas</i>	52
Tabla 21. <i>Resultados del cálculo de los efectos de concentración en celdas cónicas</i>	52
Tabla 22. <i>Corrección estadístico matemático de resultados de concentración en celdas cónicas</i>	53
Tabla 23. <i>Cálculo del desvío medio cuadrático de la recuperación de oro concentrado en celdas cónicas</i>	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tamaño de partícula sobre la separación gravitacional.....	14
Figura 2. Concentración a diferentes diámetros de partículas.....	16
Figura 3. Esquema de separación en medios densos.....	17
Figura 4. Efecto de la densidad y diámetro de partícula sobre la velocidad de sedimentación.....	18
Figura 5. Efecto de las variables densidad y viscosidad sobre la velocidad final del fluido.....	19
Figura 6. Esquema de separación.....	19
Figura 7. Desplazamiento de la partícula a través de los rifles.....	22
Figura 8. Caída de aceleración diferencial.....	22
Figura 9. Inyección de pulsión y succión.....	23
Figura 10. Jig.....	24
Figura 11. Cama de Jig.....	25
Figura 12. Operatividad de la mesa Wilfley.....	26
Figura 13. Concentrador espiral.....	27
Figura 14. Operatividad del concentrador Falcon.....	28
Figura 15. Funcionamiento del tromel cilíndrico.....	28
Figura 16. Mesa concentradora Gemini.....	29
Figura 17. Diseño de redes.....	38
Figura 18. Plaquetas.....	41
Figura 19. Observación microscópica a 30 aumentos.....	41
Figura 20. Observación microscópica a 45 aumentos.....	42
Figura 21. Reconocimiento microscópico a 45 aumentos.....	42
Figura 22. Pruebas en Jigs.....	46
Figura 23. Pruebas en mesas vibratorias.....	49
Figura 24. Pruebas en concentradores cónicos.....	55

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1. Identificación y determinación del problema

Selva alta que aún no han sido explorados, de los cuales se puede obtener una cantidad significativa de este metal precioso. En ciertos lugares, los mineros informales y artesanales llevan a cabo la extracción. Su proceso consiste en remover las arenas, que luego son tratadas mediante diferentes métodos. El oro se recupera utilizando técnicas gravimétricas o mercurio, siendo este último el principal contaminante de las playas y ríos de la selva, lo que provoca la contaminación de la flora y fauna acuática.

Se tiene una concesión minera de seis cuadrículas (600 Ha.) en el sector Gloriapata, distrito de Dámaso Beraun, provincia de Leoncio Prado, región Huánuco. La formación geológica visible muestra un yacimiento montañoso con una formación silico arcillosa, muy deleznable con contenidos de oro; lo cual amerita desarrollar trabajos de prospección geológica y evaluación metalúrgica. Las primeras calicatas realizadas y el material procesado por el método de canaletas, muestran que el oro se encuentra libre y en forma de charpas.

A pesar de la presencia de mineralización aurífera, la falta de una evaluación metalúrgica integral limita el aprovechamiento de este recurso. La

ausencia de un estudio detallado sobre la recuperación de oro y la caracterización de los minerales asociados afecta negativamente las decisiones de inversión y explotación. Se requiere una evaluación metalúrgica completa para determinar las mejores técnicas de procesamiento y optimizar la recuperación de oro, asegurando así la viabilidad económica y la sostenibilidad ambiental del proyecto.

1.2. Delimitación de la investigación

1.2.1. Delimitación teórica

Los fundamentos teóricos plasmados en la investigación se limitan a ecuaciones debidamente comprobadas y expuestas en la bibliografía basta adjunta, como también en los trabajos considerados como antecedentes y fundamento teórico resumido secuencialmente.

1.2.2. Delimitación espacial

El estudio se desarrolló en la prospección minero Gloriapata de la provincia de Leoncio Prado de la región de Huánuco.

1.2.3. Delimitación temporal

La investigación se llevó a cabo durante un período de doce meses, desde enero hasta diciembre de 2019.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Cuál es el procedimiento para llevar a cabo la evaluación metalúrgica del yacimiento de oro Sol Naciente ubicado en el área de Gloriapata – Dámaso Beraun – Huánuco en el año 2019?

1.3.2. Problemas específicos

- a. ¿Cuál es la caracterización mineralógica de las arcillas silíceas en el prospecto Sol Naciente – Dámaso Beraun – Huánuco en el año 2019?
- b. ¿Cómo afectan la densidad de la pulpa, el tamaño de las partículas

de oro y la velocidad de rotación influye en la recuperación de oro en el proyecto Sol Naciente – Dámaso Beraun – Huánuco – 2019?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo general

Realizar la evaluación metalúrgica del prospecto minero aurífero Sol Naciente en el sector Gloriapata – Dámaso Beraun – Huánuco – 2019.

1.4.2. Objetivos específicos

- a. Realizar la caracterización mineralógica de las arcillas silíceas en el prospecto minero aurífero Sol Naciente – Dámaso Beraun – Huánuco - 2019.
- b. Evaluar las variables: densidad de pulpa, dimensiones del grano de oro y velocidad de rotación en la recuperación de oro en el prospecto Sol Naciente – Dámaso Beraun – Huánuco – 2019.

1.5. Justificación de la investigación

Se justifica porque contando con una concesión minera, tributando anualmente, el oro que aflora y sin un diagnóstico de las reservas del yacimiento, menos el proceso industrial a seguir, para la recuperación de oro; resulta indispensable realizar dichos trabajos experimentales para llevarlo a escala industrial responsablemente.

1.6. Limitaciones de la investigación

La mayor limitación es la falta de laboratorios abiertos a los egresados para analizar profundamente y con la precisión que requiere toda investigación.

El tiempo que se tuvo en la realización de las pruebas experimentales es muy corto, esto debido a que nos limita a dar una confiabilidad más precisa de los resultados.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de estudio

Antecedentes internacionales

Manuel (2015) en la tesis “**Recuperación gravimétrica de oro en el proceso de flotación de sulfuros masivos**”, Instituto Politécnico Nacional de México; tiene como objetivo: concentrar oro gravimétrico utilizando muestras del proceso, y fomentar la instalación de más concentradores gravimétricos para aumentar la recuperación de oro, asegurando que no se perjudique la flotación selectiva.

Concluye: Los resultados de estas pruebas indican que todavía se puede concentrar oro mediante métodos gravimétricos. Se observa una buena relación entre la concentración y la recuperación en las muestras de las colas de los concentrados XD-20, a pesar de su baja eficiencia (solo un 30% en la recuperación de Au). Además, en la carga recirculante de los molinos de bolas se detecta el mayor contenido de oro gravimétrico, acompañado de un alto flujo volumétrico.

Al aumentar la alimentación al concentrador con las muestras de gruesos de remolienda de zinc y las colas de columna de plomo, se observa que tanto la concentración como la recuperación tienden a aumentar. Sin embargo, hay un

punto máximo en esta relación, y después de alcanzarlo, la recuperación comienza a disminuir, principalmente porque se supera la capacidad del equipo.

En el proceso de concentración de partículas finas, un aumento en las G's (rpm) mejora la gravimetría de las partículas más pesadas. En las pruebas realizadas con material grueso de remolienda de Zn, se observó que al incrementar de 60 a 70 G's, la relación entre concentración y recuperación mejora notablemente. Sin embargo, después de este aumento, la recuperación se mantiene constante y el aumento en la concentración es menos significativo. Esto se debe a que, bajo la misma fuerza centrífuga, las partículas más ligeras tienden a adherirse a las paredes del cono, lo que reduce la capacidad para concentrar partículas valiosas.

En su tesis titulada ***“Diseño de explotación de la grava aurífera existente en el área minera ‘Durán’ (código 300050), Santa Rosa - El Oro”***, Santos (2015) se propone diseñar un método para la extracción de la grava aurífera presente en la concesión minera “Durán”, utilizando parámetros técnicos que faciliten el desarrollo del proyecto.

Concluye: El depósito de oro que se está analizando es del tipo placer y está compuesto por un estrato de gravas auríferas con una potencia de aproximadamente 4 a 5 metros. Este estrato se asienta sobre el Grupo Tahuín (PzT2), que está formado por filitas y esquistos que funcionan como roca madre. Además, el depósito está cubierto por una capa de material orgánico que varía entre 0,1 y 0,5 metros de grosor.

A través de los cálculos de reservas, se determinó un volumen comprobado de 468,157.64 m³ de grava aurífera, así como 160,775.67 m³ de reservas probables y 122,148 m³ de reservas posibles. También se determinó en los ensayos de laboratorio que la ley promedio de oro en este depósito es de 0,226 g Au/m³.

Antecedentes nacionales

Hinojosa (2016) en la tesis “**Concentración gravimétrica de menas auríferas**”, El proceso de extracción de menas auríferas y metales preciosos en general requiere cumplir con ciertos requisitos específicos en la práctica de concentración, debido a las propiedades físico-químicas y mineralógicas del oro. Estas propiedades incluyen la granulometría y la forma de las partículas de oro, el grado de liberación y su asociación con otros minerales.

Los minerales que componen la mena determinan el método de procesamiento a seguir. La caracterización mineralógica, química y metalúrgica es un paso previo crucial antes de realizar el estudio de concentración, ya que es fundamental para maximizar la recuperación de oro.

Este artículo presenta un análisis de los aspectos más relevantes que se consideran en las diversas técnicas de beneficio, que incluyen la concentración gravimétrica, la amalgamación, la concentración centrífuga y la flotación. Estas consideraciones se basan en la experiencia adquirida al tratar menas auríferas con diferentes características mineralógicas y técnicas.

Además, se incluyen algunos flujogramas representativos para el tratamiento de menas auríferas de origen primario y aluvial, así como varios casos de estudio.

En la tesis titulada “**Concentración de magnetita y oro libre en los suelos aluviales de Inguro (Bellavista, Jaén, Cajamarca) mediante el método gravimétrico como una opción ambiental**”, Lobe (2018) destaca que Perú cuenta con abundantes recursos no renovables, especialmente en el sector que se está investigando, donde se utilizan sustancias tóxicas para su concentración.

La formación de estos recursos es el resultado de procesos naturales a lo largo del tiempo geológico, como la creación de embalses y la ruptura de la cordillera oriental, que dieron lugar al río Chinchipe y dejaron expuestas playas

en forma de laderas de arenas aluviales ricas en magnetita y oro libre. La investigación tiene como objetivo evaluar la concentración de magnetita y oro libre a través de la recuperación gravimétrica, utilizando equipos de concentración centrífuga. Esto permite obtener un concentrado de arenas negras que contiene oro fino y magnetita, los cuales tienen un valor económico y pueden ser extraídos mediante tecnologías limpias, evitando el uso de productos tóxicos típicos de la minería convencional.

La metodología se basa en el muestreo de arenas aluviales, que se analizan mediante un método combinado (Fire Assay y absorción atómica a la flama) para determinar los valores de oro libre y magnetita. Este estudio es descriptivo, explicativo y experimental. Los resultados muestran leyes de entrada de 0,40 g/m³ para el oro libre y 15,00 mg/kg para la magnetita, logrando una recuperación gravimétrica del 76,36% para el oro libre y del 72,58% para la magnetita, donde la granulometría juega un papel crucial en la recuperación de los metales. Se encontró una fuerte relación positiva entre el mineral de entrada y el concentrado para el oro libre, así como relaciones positivas entre el mineral de entrada, relave, concentrado y recuperación para la magnetita. En conclusión, este método gravimétrico se presenta como una alternativa ambiental para la extracción de oro libre y magnetita

2.2. Bases teóricas - científicas

2.2.1. Arcillas

Según García Romero, (S.f) menciona que la roca sedimentaria poco consolidada está compuesta principalmente por partículas de tamaño inferior a 4 micras. Desde el punto de vista mineralógico, las arcillas están mayormente formadas por lo que se conoce como minerales de arcilla, que son filosilicatos de aluminio, magnesio y hierro. Entre estos minerales destacan la caolinita, montmorillonita, illita, vermiculita y hallysita, entre otros. Estos minerales se generan a través de procesos de meteorización y de procesos petrogenéticos

relacionados con feldespatos y feldespatoides (Michaelis, Von: 1985). La arcilla, desde un punto de vista técnico, se refiere a una mezcla de minerales que suelen presentarse en forma de laminillas, incluyendo silicatos de aluminio e hidratados de micas. Este tipo de sedimento geológico es uno de los más comunes, y su composición mineralógica se aproxima a Al_2O_3 (0,3 – 8), SiO_2 (0,5 – 19) y H_2O . Además, la arcilla contiene otros minerales como sílice, que generalmente se encuentra en forma coloidal, así como carbonato de calcio, compuestos de hierro y materia orgánica.

Las arcillas son coloides que se disuelven en agua (liófilos) y los fenómenos que se producen al interactuar con el agua se pueden describir de la siguiente forma:

- Las partículas de arcilla tienen una carga eléctrica negativa que les facilita la absorción de agua.
- La estructura laminar de las partículas permite que se deslicen unas sobre otras.
- Los líquidos polares crean capas de solvatación más gruesas que los líquidos no polares, lo que significa que la arcilla solo puede volverse plástica en presencia de los primeros.
- Presentan una alta tensión superficial.

Las rocas ígneas originales que se transformaron en arcillas a través del proceso de envejecimiento incluyen granitos, gneis, feldespatos, pegmatitas, entre otros.

Propiedades fisicoquímicas de las arcillas

Las aplicaciones industriales más relevantes de este grupo de minerales se deben a sus propiedades fisicoquímicas. Estas propiedades se originan principalmente en:

- Partículas de tamaño inferior a 2 μm .
- Estructura laminar (filosilicatos).

- Sustituciones isomórficas, que generan carga en las láminas y permiten la presencia de cationes débilmente unidos en el espacio entre las capas.

Como resultado de estos aspectos, estos minerales poseen un área superficial considerable y una gran cantidad de superficie activa con enlaces no saturados. Esto les permite interactuar con una amplia variedad de sustancias, especialmente compuestos polares, lo que les confiere un comportamiento plástico en mezclas de arcilla y agua con una alta proporción de sólido a líquido. En algunos casos, también pueden hincharse, desarrollando propiedades reológicas en suspensiones acuosas.

- Superficie específica

La superficie específica, o área superficial, de una arcilla se refiere al área de la superficie externa más el área de la superficie interna (si existe) de las partículas que la componen, medida por unidad de masa y expresada en m^2/g . Las arcillas tienen una superficie específica alta, lo cual es crucial para ciertos usos industriales donde la interacción entre sólidos y fluidos depende de esta característica. A continuación, se presentan algunos ejemplos de superficies específicas de diferentes tipos de arcillas: caolinita de alta cristalinidad hasta $15 \text{ m}^2/\text{g}$, caolinita de baja cristalinidad hasta $50 \text{ m}^2/\text{g}$, halloisita hasta $60 \text{ m}^2/\text{g}$, illita hasta $50 \text{ m}^2/\text{g}$, montmorillonita entre 80 y $300 \text{ m}^2/\text{g}$, sepiolita entre 100 y $240 \text{ m}^2/\text{g}$, y paligorskita entre 100 y $200 \text{ m}^2/\text{g}$.

- Capacidad de intercambio catiónico

Esta es una propiedad esencial de las esmectitas. Tienen la capacidad de intercambiar fácilmente los iones que están fijados en la superficie externa de sus cristales, así como en los espacios interlaminares o en otras áreas internas de sus estructuras, gracias a su presencia en las soluciones acuosas circundantes. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se

define como la cantidad total de cationes que un mineral puede adsorber a un pH específico. Esto es equivalente a la medida total de las cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden generarse de tres maneras diferentes:

- ✓ A través de sustituciones isomórficas en la estructura.
- ✓ Por enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- ✓ Y mediante la disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

- Capacidad de absorción

Algunas arcillas se utilizan principalmente en el ámbito de los absorbentes debido a su habilidad para captar agua u otras moléculas en los espacios interlaminares (como las esmectitas) o en los canales estructurales (como la sepiolita y la paligorkita). La capacidad de absorción está estrechamente vinculada a las propiedades texturales, como la superficie específica y la porosidad. Se pueden distinguir dos tipos de procesos que rara vez ocurren de manera independiente: la absorción, que se refiere a procesos físicos como la retención por capilaridad, y la adsorción, que implica una interacción química entre el adsorbente (la arcilla) y el líquido o gas que se adsorbe, conocido como adsorbato. La capacidad de adsorción se mide como un porcentaje del adsorbato en relación con la masa y varía según la sustancia en cuestión, incluso para la misma arcilla. En el caso de las arcillas absorbentes, la absorción de agua puede superar el 100% en relación con su peso.

- Hidratación e hinchamiento

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminares son características clave de las esmectitas, y su relevancia es fundamental en diversas aplicaciones industriales. Aunque estos procesos ocurren sin depender del tipo de catión de intercambio presente, el nivel de hidratación sí está

relacionado con la naturaleza del catión interlaminar y la carga de la lámina. La absorción de agua en el espacio interlaminar provoca la separación de las láminas, lo que resulta en un hinchamiento. Este fenómeno se basa en el equilibrio entre la atracción electrostática entre el catión y la lámina, y la energía de hidratación del catión. A medida que se introducen capas de agua y aumenta la separación entre las láminas, las fuerzas de repulsión electrostática entre ellas se vuelven predominantes, lo que puede llevar a una disociación completa de las láminas. Cuando el catión interlaminar es sodio, las esmectitas muestran una gran capacidad de hinchamiento, lo que puede resultar en la disociación total de cristales individuales de esmectita, generando un alto grado de dispersión y un óptimo desarrollo de propiedades coloidales. En cambio, si los cationes de intercambio son calcio o magnesio, su capacidad de hinchamiento será considerablemente menor.

- **Plasticidad**

Las arcillas poseen una gran plasticidad. Esta característica se origina en el hecho de que el agua crea una capa alrededor de las partículas laminares, lo que genera un efecto lubricante que permite que unas partículas se deslicen sobre otras al aplicarles una fuerza. La notable plasticidad de las arcillas se debe, una vez más, a su estructura laminar, al tamaño muy pequeño de sus partículas (lo que les confiere una alta área superficial) y a su capacidad de hinchamiento.

Reacciones en las arcillas

Los silicatos aluminicos hidratados presentes en las arcillas tienen superficies que, en su mayoría, poseen cargas negativas, las cuales pueden ser equilibradas por cationes que se adsorben en ellas. Estos cationes, a su vez, pueden ser reemplazados por otros que ya están en el ecosistema. Esto permite

que los metales pesados sean eliminados de la solución, aunque de manera temporal, lo que afecta su bioasimilación y toxicidad. Además, los óxidos hidratados de hierro, los dióxidos de manganeso y los óxidos de aluminio ($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$; $MnO_2 \cdot nH_2O$; $Al_2O_3 \cdot nH_2O$) tienen una capacidad de intercambio catiónico similar (Enzweiler et al., 1991). La capacidad de intercambio iónico (C.I.C.) es un aspecto clave que se mide por cada 100 gramos de arcilla. Este valor se determina a partir de la C.I.C. por 100 gramos de suelo, considerando el porcentaje de arcilla y restando 2 me por cada uno por ciento de materia orgánica, como una forma de generalización para ajustar los resultados exclusivamente a la arcilla. Según Enzweiler et al., se puede afirmar que la C.I.C. en me/100 gr de arcilla para los principales minerales arcillosos es aproximadamente:

Tabla 1. Capacidad de intercambio iónico de algunas arcillas

Arcilla	CIC (me/100 g arcilla)
Caolinita	3 - 15
Illita	10 - 40
Vermiculita	100 - 150
Montmorillonita	80 - 150

Nota. Adaptado de Enzweiler, (1991).

Se relacionó la mineralogía investigada con las capacidades de intercambio catiónico de esas arcillas minerales.

Capacidad de intercambio catiónico

Los cationes que se encuentran en las arcillas pueden ser sustituidos por otros cationes, lo que indica que son intercambiables. Por ejemplo, el ion Ca^{+2} puede ser reemplazado por H^{+1} y/o K^{+1} , y viceversa. La cantidad total de cationes intercambiables que una arcilla puede almacenar, determinada por su carga negativa, se conoce como capacidad de intercambio iónico (CIC). Cuanto mayor sea la CIC, más cationes podrá retener la arcilla.

Las diferentes arcillas tienen distintas capacidades para retener cationes intercambiables. La CIC está influenciada por la cantidad y el tipo de arcillas, así como por el contenido de materia orgánica en las rocas mineralizadas. Este valor se expresa en miliequivalentes por 1,000 gramos de mineral de suelo, y se representa como meq/100 g. Generalmente, la CIC de los minerales arcillosos oscila entre 10 y 150 meq/100 g, mientras que la materia orgánica presenta valores que van de 200 a 400 meq/100 g.

Por lo tanto, el tipo y la cantidad de arcillas y materia orgánica tienen un impacto significativo en la CIC de las rocas mineralizadas. Los suelos arcillosos con una CIC alta son capaces de retener una gran cantidad de cationes, lo que ayuda a prevenir su pérdida por lixiviación. En contraste, los suelos arenosos, que tienen una CIC baja, retienen cantidades menores de cationes.

Permeabilidad

La "permeabilidad", también conocida como "conductividad hidráulica", se refiere a la habilidad de una roca para permitir que el agua fluya a través de ella. Esta permeabilidad está influenciada por los diferentes tipos de poros y las características particulares de estos

Concentración gravimétrica

Para Bustamante (2008) "La concentración gravimétrica se refiere al método de separar dos o más sustancias que poseen diferentes densidades o pesos específicos. Este proceso sucede gracias al movimiento relativo en un medio acuoso o en el aire. En esencia, se basa en la forma en que los sólidos responden a las fuerzas de gravedad, arrastre y empuje." (p. 32).

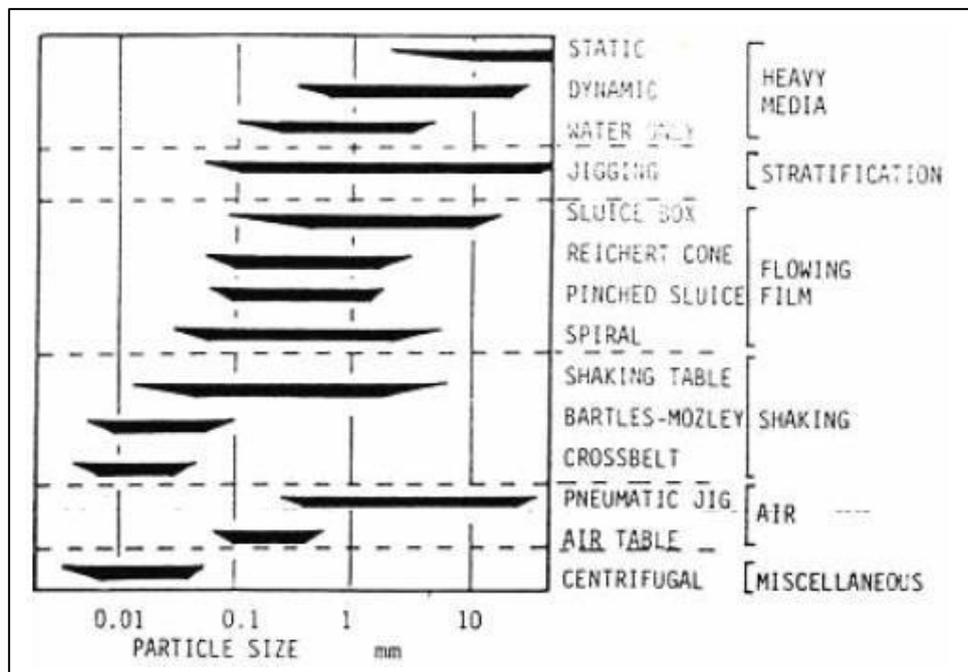
Requisitos para una eficiente concentración gravitacional

Para lograr una separación efectiva, es importante considerar lo siguiente:

- Es fundamental asegurar una adecuada liberación de partículas, ya que si están mezcladas, no se podrá lograr una separación nítida.

- También es crucial tener en cuenta la distribución de tamaños en la alimentación. Aunque una partícula sea pesada, si tiene un diámetro muy pequeño, se comportará como una partícula ligera en el medio hidráulico, lo que dificultará la separación. Por lo tanto, siempre que sea posible, se recomienda evitar alimentar los equipos de concentración con distribuciones granulométricas muy amplias, es decir, que incluyan desde partículas muy finas hasta muy gruesas. Ver figura 1.

Figura 1. *Tamaño de partícula sobre la separación gravitacional*



Nota. Gravity Concentration Technology - Burt (1984).

La velocidad de sedimentación está influenciada tanto por la densidad como por el tamaño de las partículas; cuando el diámetro es pequeño, la velocidad de sedimentación tiende a ser bastante baja.

- ✓ *Forma de las partículas:* Las partículas que tienen una forma laminar o en hojas se comportan de manera hidrodinámica muy distinta a las que son esféricas, incluso si ambas poseen la misma densidad.
- ✓ *Diferencia de densidades:* Para aplicar la concentración gravimétrica, es necesario que haya una diferencia de densidad entre los sólidos. Si

las densidades son muy parecidas, la reacción de los sólidos ante las fuerzas del fluido será similar, lo que dificulta considerablemente la separación. Por esta razón, se establece el criterio de concentración (C – C); así:

$$C - C = \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_l - \rho_f} \dots (1)$$

Donde:

ρ_p = Densidad de partículas pesadas.

ρ_l = Densidad de partículas livianas

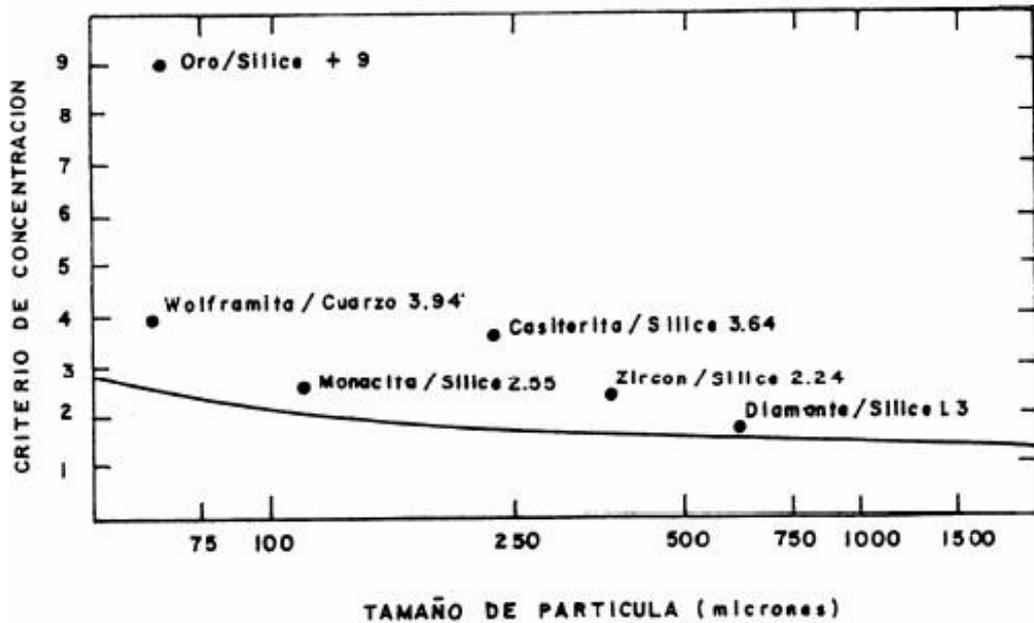
ρ_f = Densidad del fluido

En la práctica, para una eficiente separación el valor de (CC) deber ser mayor o igual a 2,50 para valores de CC < 2,50 se presentan generalmente problemas, del siguiente modo:

- ✓ $C \geq 2,50$ la separación es fácil en todo tamaño.
- ✓ $C \geq 1,65$ la separación es fácil debajo de 65 mallas.
- ✓ $C \geq 1,25$ la separación es posible a tamaño de gravas o gruesos.
- ✓ $C < 1,25$ las separaciones gravimétricas no son posibles, a menos que se aplique una segunda fuerza de gravedad.

No obstante, como se indicó previamente, el tamaño de las partículas es un factor crucial. El siguiente gráfico presenta una curva normalizada del criterio de concentración (CC). En este gráfico, se observa que el oro puede separarse de la ganga silíceo en un rango de tamaños bastante amplio (mayor a 75 μ). Lo mismo sucede con la galena (PbS); sin embargo, la esfalerita solo puede ser separada de la ganga silíceo mediante concentración gravitacional en un medio acuoso si el tamaño de partícula supera los 500 micrones (0,5 mm).

Figura 2. Concentración a diferentes diámetros de partículas



Nota. Gravity Concentration Technology - Burt (1984).

La concentración gravimétrica se efectúa en medios acuosos, siendo el agua el fluido principal, por eso la importancia de disponer de suficiente cantidad de agua en el proceso donde sea factible instalar una planta.

Métodos de concentración gravitacional

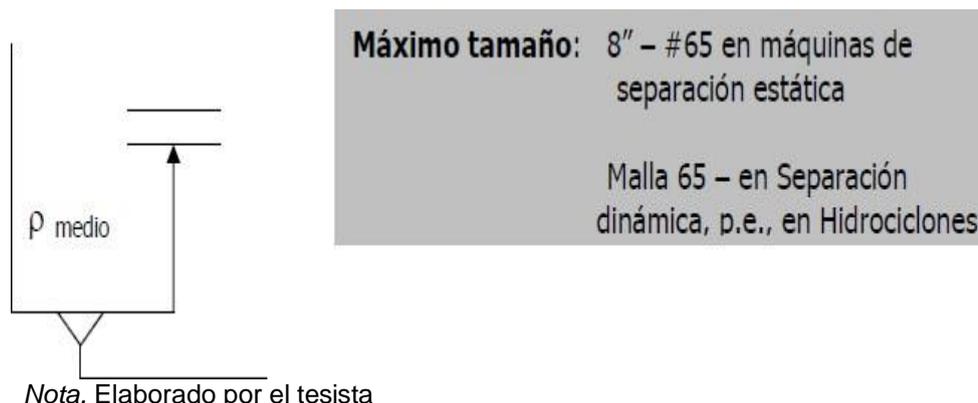
- a. Métodos que dependen de la diferencia de empuje de dos partículas en medio de fluido de densidad intermedia.
- b. Métodos que dependen de la inercia generada tanto por densidad como por tamaño.

La separación gravitacional depende altamente de la razón de sedimentación libre.

Separación en medios densos

Cuando la densidad del fluido es mayor que la densidad de las partículas livianas, se produce la separación por medios densos.

Figura 3. Esquema de separación en medios densos



Según el tamaño de las partículas, se recomiendan distintos equipos, tal como se detalla en la tabla siguiente.

Tabla 2. Amplitud del tamaño de partículas a separar y equipo sugerido

Intervalo de tamaño		Equipo
8"	1/4"	Cono separador
20 cm	6 mm	
1/4"	malla 65	Hidrociclón de medio denso
6 mm	208 μm	

Nota. Concentración gravimétrica – Bustamante (1984).

Condiciones de medios densos

Las condiciones para los medios densos deben cumplir con los siguientes criterios:

- ✓ La densidad del fluido debe situarse en un valor intermedio entre los sólidos que se desean separar.
- ✓ La viscosidad del medio denso debe ser lo más baja posible para reducir las fuerzas de interacción entre el sólido y el fluido (lo que disminuye la fuerza de arrastre F_d) y así facilitar velocidades adecuadas de sedimentación de las partículas.
- ✓ El material que se utiliza para ajustar la densidad del fluido debe tener una gravedad específica más alta, de modo que se requiera un volumen mínimo de sólido para aumentar la densidad del medio denso, sin elevar innecesariamente la viscosidad.

- ✓ Es necesario que produzca un fluido de baja viscosidad.
- ✓ Además, debe generar un fluido denso muy estable, que se mantenga con una agitación mínima.

Hidrodinámica de la separación en medios densos

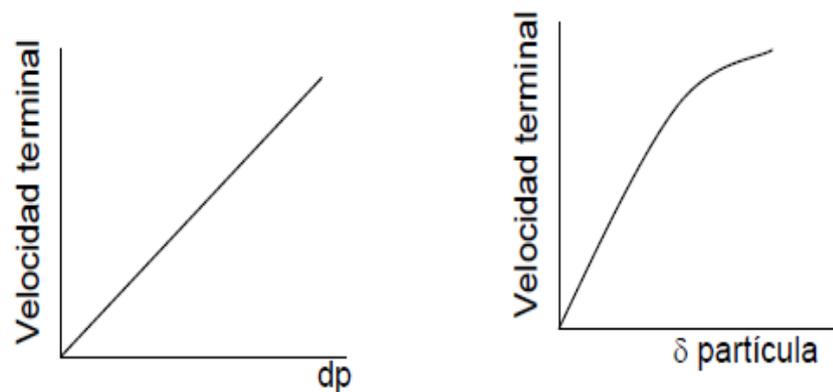
La velocidad de sedimentación en fluidos V_t :

$$V^2 = \frac{4}{3} g d^2 (\delta - \rho) \quad \text{Ley de Newton ... (2)}$$

$$t = \frac{h}{V_t}$$

$$V_t = \frac{g d^2 (\delta - \rho)}{18 \mu} \quad \text{Ley de Stokes (3)}$$

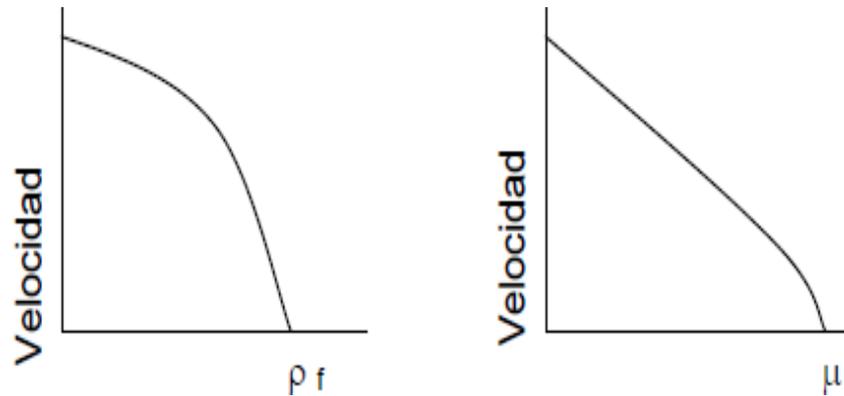
Figura 4. Efecto de la densidad y diámetro de partícula sobre la velocidad de sedimentación



Nota. Concentración gravimétrica – Bustamante (1984).

La figura 4 muestra el efecto de las variables diámetro de partícula y densidad de partícula.

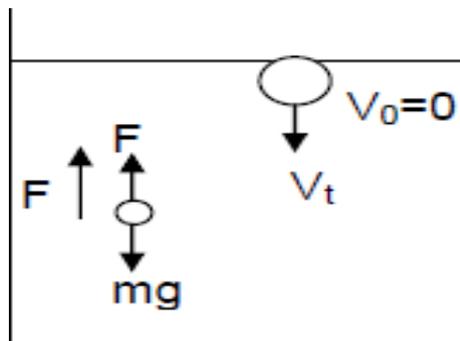
Figura 5. Efecto de las variables densidad y viscosidad sobre la velocidad final del fluido



Nota. Concentración gravimétrica – Bustamante (1984).

Para entender la concentración de sólidos, es fundamental el concepto de velocidad terminal, ya que, si las partículas alcanzan diferentes valores de V_t , se separan y se concentran.

Figura 6. Esquema de separación



Nota. Concentración gravimétrica – Bustamante (1984).

La velocidad terminal de sedimentación es la velocidad constante que adquiere un cuerpo cuando:

$$F_H + F_g + F_e = 0 \dots (4)$$

$$F_g = mg \dots (5)$$

$$F_e = m f g \dots (6)$$

Donde:

F_H = Fuerza hidrodinámica

F_g = Fuerza de gravedad

F_e = Fuerza de empuje.

Para valores extremos del número de Reynolds.

$$R_e = \frac{d \cdot v}{\nu} = \frac{d \cdot v}{\mu} \rho_{fluido} \dots \dots (7)$$

Para el régimen turbulento (alto número de R_e) o régimen de Newton (>1000), equivale a casos en que la viscosidad de fluido μ tiende a cero.

Para el régimen laminar (bajo $R_e < 1$) o régimen de Stokes y equivale a casos en que la viscosidad $\mu \rightarrow \square$.

Para R_e en régimen de stokes

Laminar $\mu \rightarrow \square$ líquidos viscosos

$$F_H = -\mu K \cdot v_t \dots \dots (8)$$

Donde:

K = Coeficiente de arrastre.

Reemplazando, se puede calcular la velocidad terminal o de sedimentación, esferas de diámetro d , cuyo coeficiente de arrastre es

$$K = \frac{6\pi d}{2}, \text{ como:}$$

$$v_t = g \frac{d^2 \Delta\rho}{18\mu} \dots \dots (9)$$

Cuando no es una esfera $K = 6\pi R_e f(\varphi)$

Donde:

d_e = Diámetro equivalente.

$f(\varphi)$ = Función de esfericidad.

$$v_t = \frac{g d_e^2 \Delta\rho}{18\mu f(\varphi)} \dots \dots (10)$$

2.2.2. Procesos de concentración gravimétrica de oro en placeres aluviales

Según Azcona (2007), "La notable diferencia de densidad entre el oro y el material estéril que lo rodea hace que los métodos de lavado que dependen de la gravedad sean los más comunes. Estos métodos aprovechan la interacción de la masa, el volumen y la forma de las partículas de oro en relación con su comportamiento físico dentro de un fluido, el cual puede estar en reposo o en movimiento." (p. 63).

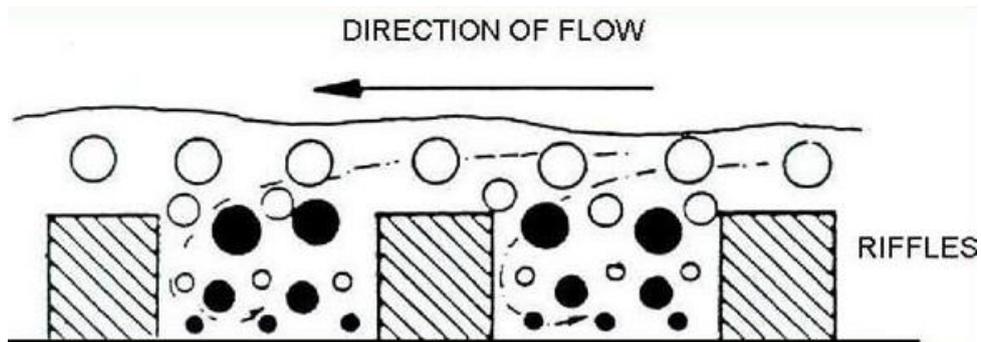
- Medios densos

La separación en un medio denso implica clasificar sólidos según sus densidades, utilizando un fluido de densidad intermedia. En este proceso, los sólidos de menor densidad flotan, mientras que aquellos de mayor densidad se hunden. Los fluidos densos que se emplean incluyen líquidos orgánicos, soluciones salinas en agua y, más frecuentemente, suspensiones de sólidos finos en agua.

- Método del manto pelicular fluente

Este proceso se basa en crear una delgada capa de agua que se desliza por un canal inclinado, permitiendo que las partículas se sedimenten según su velocidad de caída y su resistencia al movimiento del agua. Actualmente, uno de los dispositivos más utilizados para este método son las espirales. Otro ejemplo son las canaletas o "slides", que consisten en un canal inclinado que se estrecha en la dirección del flujo. A medida que el flujo desciende, se genera un gradiente de velocidad, lo que provoca que las partículas más finas y pesadas se acumulen en los niveles inferiores debido a una combinación de caída retardada y consolidación intersticial.

Figura 7. Desplazamiento de la partícula a través de los rifles

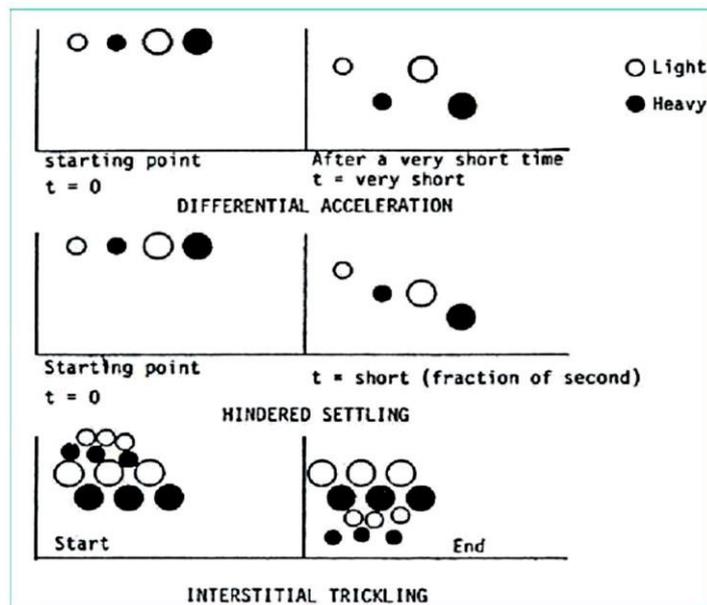


Nota. Apuntes de Mineralogía – Osvaldo Paves

- **Método de la aceleración diferencial**

En este sistema, las partículas experimentan oscilaciones regulares debido al fluido, lo que genera una sedimentación diferente según la densidad de las partículas. Los dispositivos que aplican este principio se conocen como cajas de pulsación, que pueden ser hidráulicas si utilizan agua como fluido, o neumáticas si el fluido de separación es aire.

Figura 8. Caída de aceleración diferencial



Nota. Azcona, 2007

Cada partícula tendrá al inicio de la caída un determinado valor de aceleración, que puede ser determinado por la ecuación:

$$m \frac{dv}{dt} = mg - m^n g - R(v) \dots (11)$$

Dónde:

m = masa de la partícula.

m^n = masa del líquido

desplazado. g =

aceleración de gravedad.

$R(v)$ = resistencia del medio al movimiento de la partícula.

En el inicio del movimiento $R(v) = 0$, luego:

$\frac{dv}{dt} (m - m^n/m) g$ debido a que la partícula y el fluido desplazado tienen

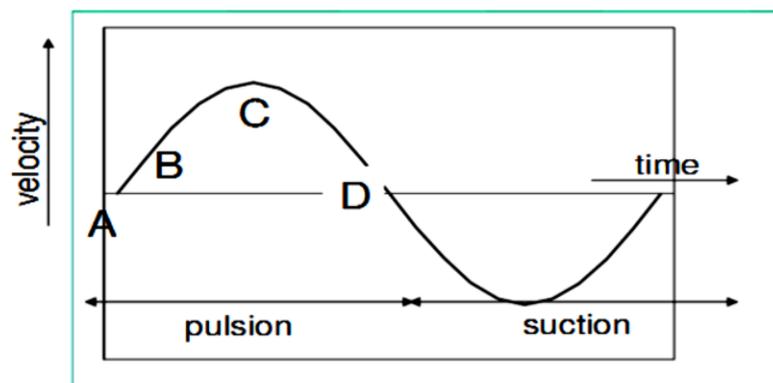
igual volumen:

$$\frac{dv}{dt} = \left(1 - \frac{D_f}{D_s}\right) g \dots (12)$$

D_s y D_f son las densidades del sólido y del fluido, respectivamente.

Se observa que la aceleración inicial está influenciada por las densidades de ambos. En un equipo Jig, la distancia que recorren las partículas está más relacionada con las aceleraciones iniciales (o velocidades iniciales) que con las velocidades finales. Esto indica que las partículas son más impactadas por la aceleración inicial que por su velocidad terminal.

Figura 9. Inyección de pulsión y succión



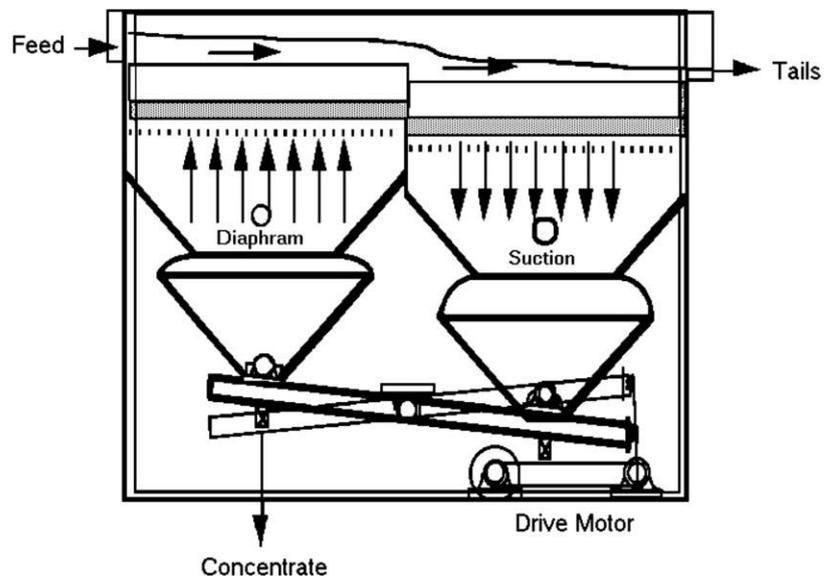
Nota. Azcona, 2007

2.2.3. Concentradores gravimétricos

- Concentrador Jigs

Según Ávila (2017), el Jig es un dispositivo que logra mejores resultados al trabajar con menas que tienen un rango granulométrico específico. Este equipo se utiliza para menas con tamaños que varían entre 5 pulgadas y 1 mm, logrando rendimientos más altos en las fracciones más gruesas. El método de separación mediante Jig es considerado uno de los más complejos en la concentración gravitacional, debido a las constantes variaciones en las condiciones hidrodinámicas. En este proceso, los minerales de diferentes densidades se separan en un lecho que se expande gracias a una corriente de agua pulsante, lo que resulta en la estratificación de los minerales.

Figura 10. Jig



Nota. Apuntes de Mineralogía II – Osvaldo Paves (2010)

Figura 11. Cama de Jig



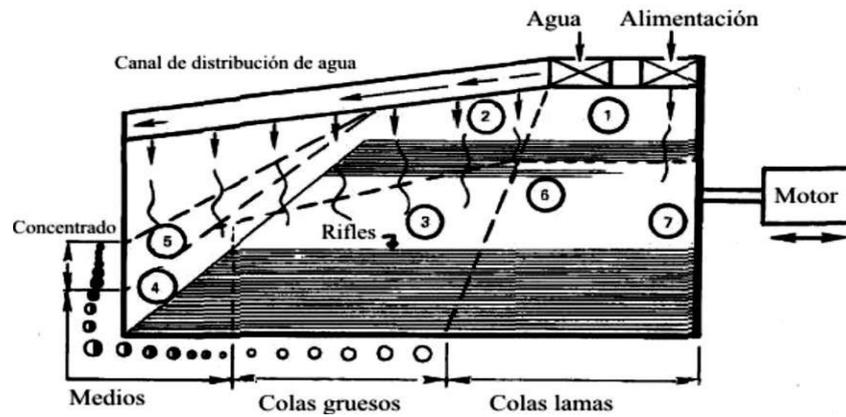
Nota. Apuntes de Mineralogía II – Osvaldo Paves (2010)

- **Mesas vibratorias Wilfley**

Grady (2005) manifiesta: Estos dispositivos utilizan la fuerza de gravedad para su funcionamiento, que se basa en la concentración a través de un fluido laminar que se mueve sobre una superficie inclinada. Además, incorporan un movimiento horizontal recíproco que actúa en ángulo recto con respecto al flujo del líquido. Este movimiento de la mesa presenta una aceleración asimétrica, lo que provoca un transporte intermitente de las partículas a lo largo de la superficie de la mesa.

La mesa Wilfley fue presentada hace un siglo y sigue siendo utilizada en procesos de concentración gravimétrica. Otras opciones comerciales incluyen las mesas Holman y Deister. Debido a su capacidad limitada (menos de 2 t/h), las mesas vibratorias se emplean comúnmente como limpiadoras para recuperar productos generados por concentradores centrífugos, Jigs y espirales

Figura 12. Operatividad de la mesa Wilfley



Nota. Curie, 1973.

- **Concentrador espiral**

Pavez (2010) expone: La espiral está formada por un canal cilíndrico en forma de hélice, con una sección transversal semicircular adaptada. En la parte superior, hay una caja diseñada para recibir la alimentación en forma de pulpa. A medida que la pulpa fluye, las partículas más pesadas se acumulan en una franja a lo largo del lado interno del flujo y son extraídas a través de aberturas situadas en la parte inferior de su sección transversal. (p. 54).

El principio de funcionamiento de la espiral es una combinación de escurrimiento laminar y acción centrífuga.

- **Concentrador centrífugo Falcon**

El concentrador Falcon está compuesto por un bolo cónico y cilíndrico que gira a alta velocidad dentro de una camisa fija, diseñada para recolectar el relave. La pulpa se introduce en la parte inferior del cono, donde se acelera y se estratifica a medida que sube por el rotor. Según el modelo específico del concentrador (Serie SB o Serie C), las partículas experimentarán fuerzas de 200 g o 300 g, y el proceso de concentración en el bolo se llevará a cabo mediante un método que puede ser discontinuo o continuo.

Figura 13. Concentrador espiral

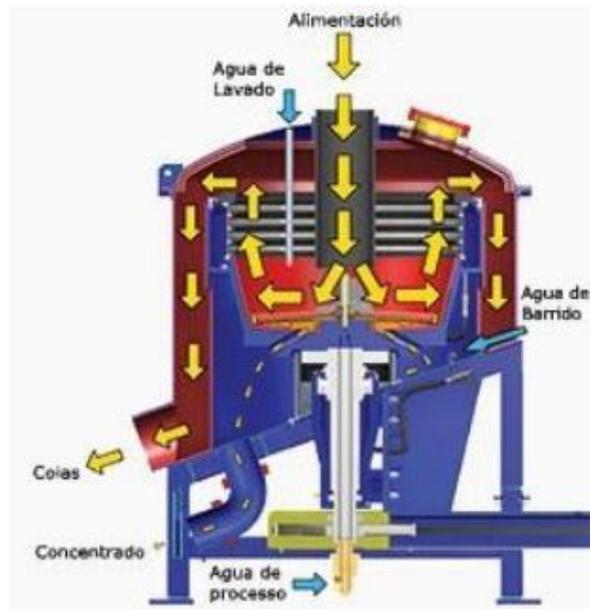


Nota. www.Cotecno.com (2010)

El concentrador Falcon, al igual que el Knelson, proviene de Canadá. Sin embargo, este equipo tiene diferencias con respecto al Knelson, especialmente en cuanto a la velocidad de rotación. En el concentrador Falcon, el campo centrífugo es aproximadamente cinco veces más intenso que el del concentrador Knelson.

Mientras estos concentradores están en funcionamiento, todas las partículas experimentan una fuerza equivalente a 60 g, lo que permite que el concentrador Knelson recupere partículas finas.

Figura 14. Operatividad del concentrador Falcon

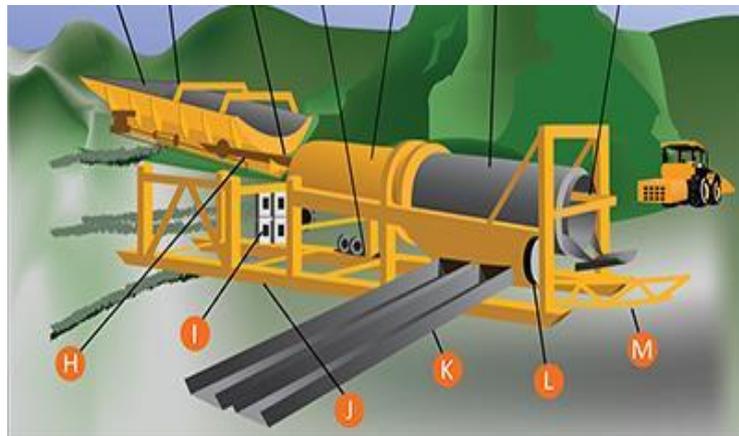


Fuente: [www. Concentrador Falcon.net](http://www.ConcentradorFalcon.net)

- **Tromel disgregador**

Aritema (2010), expone: El tromel o cilindro lavador es un dispositivo diseñado principalmente para limpiar material grueso con tamaños de partículas que van de 0 a 250/300 mm. En su interior, cuenta con componentes que facilitan el volteo y el desplazamiento del material desde la entrada hasta la salida. (p. 72).

Figura 15. Funcionamiento del tromel cilíndrico



Nota. www.winner.com

- **Zaranda vibratoria**

Se trata de una serie de tamices o cribas que tienen diferentes tamaños de abertura y que pueden encajarse unas sobre otras. Se organizan apilando la criba más fina en la parte inferior y, sobre ella, las que tienen aberturas progresivamente más grandes, dejando la de mayor abertura en la parte superior. Este conjunto se coloca en un dispositivo mecánico con un motor que genera un movimiento de desplazamiento y vaivén horizontal, permitiendo que el material de la criba superior pase a las inferiores, separando así las partículas por tamaño. Al final, se pesan los materiales retenidos en cada criba y, con base en el peso total de la muestra, se elabora un gráfico que muestra la relación entre el tamaño de grano y el porcentaje de material retenido.

- **Mesas concentradoras Gemini**

Villas (2006), expone: En los procesos de tratamiento de minerales que utilizan concentradores Knelson y Falcon, es habitual que la última etapa de limpieza se lleve a cabo con una mesa vibratoria Gemini, debido a las particularidades de esta mesa. (p. 27).

Figura 16. Mesa concentradora Gemini



Nota. [www.mining track.com](http://www.miningtrack.com)

2.3. Definición de términos básicos

Explotación sostenible: Método de obtención de un material que se va a procesar de manera económicamente rentable.

Placeres auríferos: Incluye las orillas de los ríos, especialmente en los meandros, donde se acumula el oro que proviene de las áreas elevadas.

Procesamiento ecológico: Es la obtención de oro utilizando procesos físicos, sin la necesidad de reactivos, y cuidando el medio ambiente de la área de extracción.

Prospección aluvional: Es un enfoque de exploración minera que se centra directamente en identificar y evaluar depósitos de tipo placer o residual, y de manera indirecta, en detectar anomalías mineralométricas.

2.4. Formulación de la hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

Con la evaluación metalúrgica del prospecto aurífero Sol Naciente se recupera oro en el sector Gloriapata - Dámaso Beraun – Huánuco – 2019.

2.4.2. Hipótesis específicas

- a. Si establecemos el modelo de caracterización mineralógica de las arcillas silíceas, esto tendrá un impacto en la recuperación de oro en el prospecto Sol Naciente – Dámaso Beraun – Huánuco – 2019.
- b. Al establecer el rango óptimo de operación para las variables de densidad de pulpa, tamaño del grano de oro y velocidad de rotación, esto afecta la recuperación de oro en el prospecto Sol Naciente – Dámaso Beraun – Huánuco – 2019.

2.5. Identificación de variables

2.5.1. Variable independiente

- Evaluación metalúrgica del prospecto minero aurífero

2.5.2. Variable dependiente

- Recuperación de oro

2.6. Definición operacional de variables e indicadores

Tabla 3. Operacionalización de variables

Variables	Definición	Dimensiones	Indicadores
Independiente: Evaluación metalúrgica del prospecto minero aurífero	Conceptual: Serie de actividades desarrolladas para analizar y concentrar el elemento de interés a recuperar Operacional: Diagnóstico realizado a los minerales extraídos de la mina, para determinar sus elementos, asociaciones y reacciones a su procesamiento	Caracterización mineralógica	Análisis microscópico del mineral
		Densidad de pulpa	Medición volumétrica
		Velocidad de agitación	RPM
Dependiente: Recuperación de oro	Conceptual: Proceso físico secuencial que permite obtener los elementos o minerales valiosos de los yacimientos Operacional: Proceso por el cual un mineral extraído de la mina es sometido a procesos de concentración para obtener elementos valiosos	Elemento valioso recuperable	Au (g/T)
		Volumen de concentrado	Au (g/T)

CAPITULO III

METODOLOGIA Y TECNICAS DE INVESTIGACION

3.1. Tipo de Investigación

Para Barriga (1974) “La investigación aplicada, que también se conoce como investigación constructiva o utilitaria, se distingue por su enfoque en la utilización de conocimientos teóricos en situaciones específicas y en las implicaciones prácticas que surgen de ello. Su objetivo es entender para poder actuar, construir y modificar; prioriza la aplicación inmediata en contextos particulares en lugar de centrarse en el desarrollo de un conocimiento de carácter universal” (p. 114).

Por lo que la investigación es **aplicada**, porque se basa en la puesta en práctica del saber científico. Es decir, transformar los conocimientos científicos en tecnología.

3.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación en función a la profundidad del estudio es descriptivo y explicativa. Descriptiva debido a que se realiza la caracterización del mineral aurífero y explicativa por que se busca explicar las causas de la recuperación de oro.

3.3. Método de investigación

En el trabajo de investigación se utilizó el método **Científico**, porque se está aplicando los conocimientos existentes en la solución de problemas. (Hernández et al, 2015).

Se utilizó el método científico que validará los resultados obtenidos mediante un proceso.

3.4. Diseño de investigación

El diseño de investigación se entiende como el enfoque que el investigador elige para abordar el problema, desafío o inconveniente que se presenta en el estudio. Con fines educativos, se pueden clasificar en diseño experimental, diseño no experimental y diseño bibliográfico. En este caso, se utilizó el diseño experimental. (Filiberto Martins – 2010).

El diseño de la investigación es lograr el método de concentración gravimétrica adecuado que permita obtener eficientes recuperaciones de oro; para elaborar un sistema de extracción y procesamiento.

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

La población se define como el grupo de personas que tienen al menos una característica en común, ya sea una ciudadanía compartida, la pertenencia a una asociación voluntaria, una raza, la inscripción en la misma universidad, entre otros aspectos similares. (wikipedia, 2021)

La población está representada por el mineral existente que aflora en un área de 5 hectáreas con las mismas características y que en la parte baja se tiene el río Huallaga, que corta al yacimiento.

3.5.2. Muestra

Para determinar la muestra representativa de 50 kilos aproximadamente se procedió a realizar el muestreo aleatorio simple, donde cada muestra tiene

una probabilidad de inclusión igual y conocida de n/N y que representa a las muestras obtenidas de las calicatas realizadas y cuya planificación de muestreo se ha realizado bajo el sistema de redes, habiéndose realizado un total de 50 puntos y con todo el material obtenido se procedió a realizar un composito obteniéndose 5 toneladas con los cuales se desarrolló las pruebas experimentales.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se implementaron las siguientes técnicas e instrumentos para la recopilación de información.

Tabla 4. Técnicas e instrumentos

No	ACTIVIDAD	TÉCNICA	INSTRUMENTO
1	Cubicación de reservas	Diseño de redes	Tablas
2	Recolección de muestras	Cono y cuarteado	Tablas
3	Determinación del peso específico	Método del picnómetro	Tablas
4	Análisis granulométrico	Tamizado	Tablas
5	Análisis químico	Vía seca	Tablas
6	Reconocimiento mineralógico	Análisis mineralógico	Fotografías
7	Concentración en Jigs	Movimiento oscilatorio	Tablas
8	Concentración en mesas vibratorias	Movimiento concéntrico	Tablas
9	Concentración en equipos Falcon	Separación concéntrica rápida	Tablas
10	Concentración en celdas cónicas	Separación concéntrica lenta	Tablas

Nota. Elaboración propia

3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación

La elección de los instrumentos de investigación se llevó a cabo siguiendo los procesos tradicionales para cada fase y utilizando las técnicas adquiridas en los entornos universitarios. En la presente investigación, existe tres etapas; la primera en la toma de muestras, se realizó, con el mayor cuidado de

manera que tengan un volumen aproximado de material a investigar y el instrumento de investigación fue el diseño de una tabla debidamente estructurada para la toma de datos de los pesos después de obtener las muestras, la técnica muestreo aleatorio simple. La segunda etapa, el análisis químico, realizado con las pesadas cuidadosas al material extraído, concentrado y relave o remanente, al igual que la preparación de plaquetas y observación al microscopio de vistas opacas y la tercera etapa, para el desarrollo de cada tratamiento gravimétrico, se diseñó tablas para la obtención de datos en base a las variables que más influyen en la recuperación de oro, y complementado con las tablas diseñadas para realizar los tratamientos estadísticos aplicando los diseños factoriales.

La confiabilidad de los instrumentos de investigación, se basa al diseño de tablas que se exponen en la presente investigación, resultado de muchos años de consultoría del ingeniero Jorge Ayala Mina y plasmado en su libro *Diseño de Experimentos Metalúrgicos*, del mismo modo se puede obtener de diversas fuentes que propone Humberto Gutiérrez Pulido en su libro *Análisis y diseño de experimentos*.

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Los datos obtenidos de las pruebas serán procesados con el Microsoft Excel, de igual manera se generarán tablas y gráficos para su posterior análisis.

3.9. Tratamiento estadístico de datos

Los datos se sometieron a análisis de efectos por cada factor en estudio, después se determinó el análisis de varianza determinando la influencia significativa del factor influyente que se comparó estadísticamente con el F de Fisher.

3.10. Orientación ética filosófica y epistémica

La decisión de aprobar o desaprobar se fundamenta en la ética de la investigación, considerando su valor tecnológico y su validez científica. Se evalúa un balance aceptable entre los beneficios potenciales y los riesgos de daño, así como la reducción de estos riesgos. También se toman en cuenta los procedimientos adecuados de consentimiento informado, que deben ser culturalmente apropiados y garantizar la voluntariedad. Además, se deben seguir criterios justos para la selección de variables y considerar el impacto de la investigación en la empresa de origen del mineral, tanto durante el estudio como después de su conclusión. La revisión también considera estudios científicos previos y las normativas pertinentes.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo

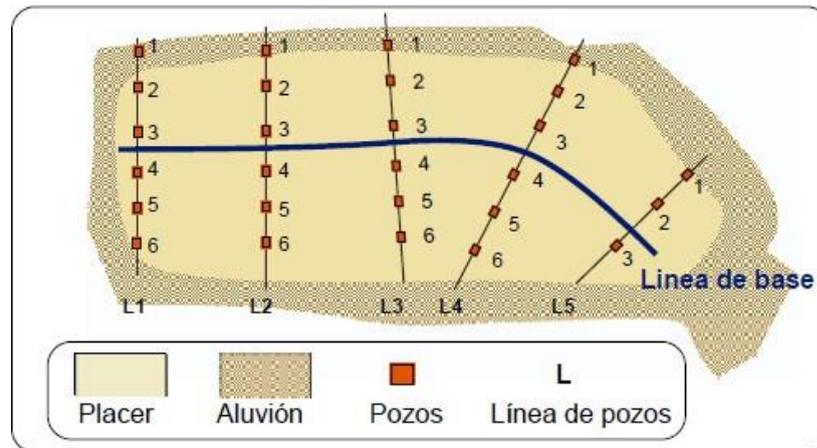
El trabajo de campo llevado a cabo facilitó la recolección de muestras, utilizando la técnica de redes o mallas de 20 metros de lado cuadrado. En cada ubicación, se realizaron excavaciones con una sección cuadrada de 1,00 m x 1,00 m y una profundidad que oscila entre 1,50 y 2,00 metros.

Obtenido el material de cada calicata o punto de muestreo, se procedió depositar en una ruma, con un volumen aproximado de 5 toneladas; luego fue homogenizado por sucesivas etapas de volteo a lampa, de tal manera que la muestra tenga las mismas características en cualquier punto de la ruma.

4.1.1. Cubicación de reservas

Para la obtención de datos se empleó el diseño de redes, tal como se observa en la figura 17.

Figura 17. Diseño de redes



Nota. Elaboración propia.

Reemplazando datos obtenidos de campo (Ver anexo):

$$\sum_1^{50} P = \frac{2,27 + 2,23 + 2,42 + \dots}{50}$$

Profundidad = 2,31

Reemplazando datos experimentales obtenidos (Anexo 1):

$$\sum_1^{50} Pe = \frac{2,58 + 2,56 + 2,47}{50}$$

Pe = 2,53

Reemplazando los datos experimentales obtenidos en la ecuación (13), calculamos las toneladas de arenas aluviales.

$$V = (250 \text{ m} \times 200 \text{ m}) \times 2,31 \text{ m} \times 2,53$$

V = 292 215 m³ de arenas aluviales

Para determinar las reservas probables de oro contenido en la concesión se realizó los siguientes cálculos:

Contenido de oro promedio en la concesión será (Datos Anexo 1):

$$\sum_1^{50} Gr Au_{promedio} = \frac{4,14 + 4,22 + 6,56 + \dots}{50}$$

$$Gr Au_{promedio} = 4,97$$

Reemplazando en la ecuación (6) tenemos:

$$Reservas Probables = 292\,215\,m^3 \times \frac{4,97\,Gr\,Au}{m^3}$$

$$Reservas Probables = 1\,235\,045\,gramos\,de\,oro = 1\,235,045$$

toneladas de oro

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

4.2.1. Caracterización mineralógica

La muestra obtenida se redujo por el método de cono y cuarteo, en etapas sucesivas hasta obtener un composito de 500 kilos aproximadamente, a partir del volumen total de material obtenido de las calicatas realizadas.

- **Análisis granulométrico**

Tabla 5. Análisis granulométrico

Malla	Gramos	% Peso	Acumulado (+)	Acumulado (-)
4"	176.80	17.68	17.68	82.32
3"	90.60	9.06	26.74	73.26
2"	127.00	12.70	39.44	60.56
1"	147.60	14.76	54.20	45.80
3/4"	43.80	4.38	58.58	41.42
1/2"	48.60	4.86	63.44	36.56
1/4"	33.60	3.36	66.80	33.20
6	57.80	5.78	72.58	27.42
10	25.40	2.54	75.12	24.88
14	27.80	2.78	77.90	22.10
20	34.40	3.44	81.34	18.66
28	25.60	2.56	83.90	16.10
35	36.40	3.64	87.54	12.46
48	22.80	2.28	89.82	10.18
65	26.00	2.60	92.42	7.58
100	15.40	1.54	93.96	6.04
150	15.20	1.52	95.48	4.52
200	18.80	1.88	97.36	2.64
-200	26.40	2.64	100.00	0.00
TOTAL	1000.00	100.00		

- **Análisis químico**

Del análisis realizado de las 50 calicatas se tiene el promedio de ley de oro asciende a **4,97 g/TM**, obtenidos directamente por el lavado de las arenas en plato de lavador y se presenta en forma de charpas (ver anexo).

- **Reconocimiento mineralógico**

El análisis microscópico de las muestras obtenidas se procedió a preparar las plaquetas del siguiente modo:

a) Preparación de plaquetas

Se requirió de 3 a 5 gramos de muestra de material pulverizado.

Se aplicó esmalte sintético a las plaquetas para la adherencia del material pulverizado.

b) Desbaste o lapeado

Seco el esmalte y adherido la muestra, se procedió al lapeado de la muestra con lijas números 400, 600 y 1000 secuencialmente, se disminuye el espesor del mineral, eliminando cualquier elemento que pueda interferir con sus propiedades naturales, y se logra una superficie lisa con leve rugosidad, hasta alcanzar un espesor óptimo de 30 micras.

Tabla 6. *Etapas de lapeado para cada plaqueta*

Abrasivo (SiC) Malla (micras)	Cantidad (g)	Tiempo (min)	Lado	Espesor (micras)
400	5	7	Cara	100
600	10	10	Cara	40
1000	7	5	Cara	30

Nota. Elaboración propia.

c) Montaje del cubre objeto

Cuando la plaqueta alcanza un espesor cercano a 30 micras, se coloca la lámina de cobertura o cubre objeto con resina. Se presiona suavemente el vidrio de cobertura con una pinza para eliminar las

burbujas de aire y el exceso de esmalte. Para asegurar la fijación, se calienta en una plancha a 40°C, siguiendo las recomendaciones de los expertos.

d) Rotulado y codificación

La limpieza de las plaquetas se realizó mediante la aplicación de alcohol, como disolvente.

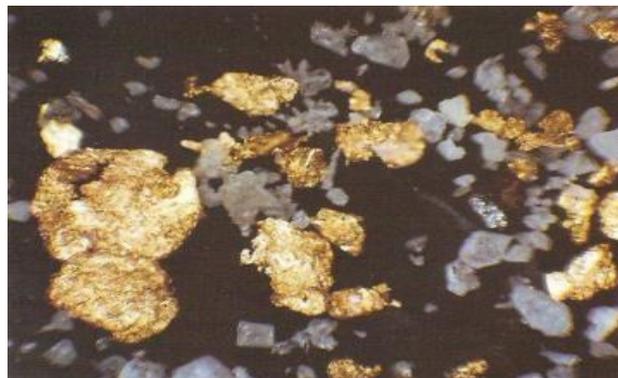
Figura 18. Plaquetas



Nota. Elaboración propia.

Para el reconocimiento microscópico se utilizó el microscopio petrográfico Karl Zeiss de 15, 30 y 45 aumentos.

Figura 19. Observación microscópica a 30 aumentos



Nota. Elaboración propia.

Comentario: Después de sucesivas etapas de lavado en el plato se puede observar oro grueso libre y cuarzo.

Figura 20. Observación microscópica a 45 aumentos



Nota. Elaboración propia.

En la muestra de la figura 20 se observa oro impregnado en una matriz de cuarzo, hematita granular y cuarzo gris.

Figura 21. Reconocimiento microscópico a 45 aumentos



Nota. Elaboración propia.

En la figura 21 se observa la presencia de oro grueso en una matriz de cuarzo blanco.

Al contorno del oro se observa alteración de la hematita.

4.2.2. Evaluar y comparar la eficiencia de diversas técnicas de procesamiento para la recuperación de oro

A continuación, se presenta las diversas pruebas realizadas aplicando las diversas técnicas de concentración del oro.

A. Prueba de concentración en Jigs

Esta prueba consistió en preparar el material a malla -1/4", alimentando de forma constante a la cama de billas de acero (ge 8), que se encuentra en la tolva de los jigs complementando con la corriente de agua.

En esta prueba se aplicó el diseño factorial que a continuación se presenta.

$$N = 2^k$$

Dónde:

k = Estados de la variable (menor y mayor)

N = Número de corridas experimentales

Las variables en estudio son las siguientes:

Tabla 7. Variables intervinientes de la concentración en jigs

Variables	Estados	
	Máximo	Mínimo
Abertura de la excéntrica (embolo)	3/8"	1/8"
Flujo de agua (l/hr)	54	18

Nota. Elaboración propia.

Aplicando el diseño factorial entonces tenemos:

$$N=2^2= 4 \text{ pruebas}$$

El concentrado obtenido, que consiste en arena y oro, fue sometido a varias etapas de lavado, lo que permitió obtener oro libre para su posterior pesaje.

Las arenas de cabeza y relave fueron analizadas en seco en la empresa Oro Andino en Lima, y esta información fue fundamental para elaborar el balance metalúrgico. Es importante destacar que en cada prueba se utilizó todo el material recolectado como muestra.

Tabla 8. Resultados de concentración en Jigs

Prueba No	Efecto	A Flujo de agua (l/Hr)	B Abertura excéntrica	% recuperación
1	1	18	1/8"	78.24
2	a	54	1/8"	83.00
3	b	18	3/8"	78.00
4	ab	54	3/8"	75.00

Nota. Elaboración propia.

Cálculo de los efectos

Tabla 9. Cálculo de los efectos de concentración en jigs

Efecto	% Recup.	II	II	Efecto
1	78.24	161.24	314.24	78.56
A	83.00	153.00	1.76	0.88
B	78.00	4.76	-8.24	-4.12
AB	75.00	-3	-7.76	-1.5
	314.24			

Nota. Elaboración propia

Cálculo de los coeficientes

$$B_0 = \text{promedio} = \frac{314,24}{4} = 78,56$$

$$B_1 = \text{efecto } \frac{A}{2} = \frac{1,76}{2} = 0,88$$

$$B \quad - 8,24$$

$$B_2 = \text{efecto } \frac{B}{2} = \frac{-8,24}{2} = -4,12$$

Reemplazando en la ecuación (19):

$$Y = 78,56 + 0,88 X_1 - 4,12 X_2$$

Sustituyendo en la ecuación (9):

$$\% \text{ Recup} = 78,56 + 0,88 \left(\frac{\text{Flujo de agua} - 36}{0, B} \right) - 4,12 \left(\frac{\text{Abertura} - 0,25}{18} \right)$$

Corrección estadístico matemático de los resultados

Reemplazando las variables en la ecuación (21) tenemos el % de recuperación de oro calculado. Se observa en la tabla siguiente:

Tabla 10. Corrección estadístico matemático de resultados

Efecto	A	B	RECUPERACIÓN	
	Flujo Agua	Abertura Excéntrica	% Actual	% Calc.
1	18	0.125	78.24	81.80
a	54	0.125	83.00	83.66
b	18	0.375	76.00	73.56
ab	54	0.375	72.00	75.42

Nota. Elaboración propia.

Desvío medio cuadrático

Tabla 11. Cálculo del desvío medio cuadrático de la recuperación de oro

A	B	RECUPERACIÓN		A	A ²
		Flujo Agua	Abertura Excéntrica		
18	0.125	78.24	81.80	3.56	12.67
54	0.125	83.00	83.66	0.66	0.44
18	0.375	76.00	73.56	-2.44	5.95
54	0.375	72.00	75.42	3.42	11.72
					30.79

$$DMC = \frac{\sum A^2}{2^n} = \frac{30,79}{4} = 7,70$$

Error medio cuadrático

$$ECM = \frac{DMC}{2} = \frac{7,70}{2} = 3,85$$

El error cuadrático medio de 3,85 % respecto al valor calculado nos muestra como EXCELENTE el modelo matemático propuesto.

Variables y recuperación óptima

Figura 22. Pruebas en Jigs



Nota. Elaboración propia

Comentario: La mejor recuperación se obtiene en la prueba 2, con un flujo de agua de 54 litros/hora y la abertura de la excéntrica de 1/8"

Error medio cuadrático

El error cuadrático medio calculado es 3,85%; esta relación entre los resultados obtenidos a nivel experimental y el valor teórico calculado nos muestra una variación que no excede del 5%, demostrando que las pruebas desarrolladas y el modelo matemático propuesto no tienen variación significativa por lo tanto es EXCELENTE.

A. Prueba de concentración en mesas

El mineral que se iba a procesar fue tamizado a través de mallas de menos de 1/8", y se alimentó de manera continua la pulpa a las mesas, junto con un flujo de agua de 60 litros por hora.

En esta prueba también se aplica el diseño factorial para dos factores Se ha considerado el diseño factorial 2^k , con 2 niveles y 2 variables.

$$N = 2^2 = 4 \text{ pruebas}$$

A continuación, presentamos los factores en estudio en la tabla.

Tabla 12. Variables intervinientes de la concentración en mesas vibratorias Estados

Variables	Estados	
	Máximo	Mínimo
Amplitud del stroke	1/2"	1/8"
Ángulo de inclinación	6°	3°

Nota. Elaboración propia.

Realizadas las pruebas experimentales en las mesas vibratorias tenemos las siguientes recuperaciones.

Tabla 13. Resultados de concentración en mesas vibratorias

Efecto	A	B	RECUPERACIÓN
	Ángulo Inclín.	Amplitud Stroke	% Actual
1	3	0,125	94,15
a	6	0,125	96,85
b	3	0,500	96,88
ab	6	0,500	98,52

Nota. Elaboración propia

Cálculo de los efectos

En seguida presentamos los cálculos de los efectos con Microsoft Excel.

Tabla 14. Cálculo de los efectos de concentración en mesas vibratorias

Experimento	Efecto	% Recup.	II	II	Efecto
1	1	94.15	191	386.4	96.60
2	a	96.85	195.40	4.34	2.17
3	b	96.88	2.7	4.4	2.2
4	ab	98.52	1.64	-1.06	0.82
		386.4			

Nota. Elaboración propia.

De la tabla podemos deducir que los factores ángulo de inclinación y amplitud de Stokes influyen en la recuperación de oro.

Cálculo de los coeficientes

$$B_0 = \text{promedio} = \frac{386,4}{4} = 96,6$$

$$B_1 = \text{efecto } \frac{A}{2} = \frac{4,34}{2} = 2,17$$

$$B_2 = \text{efecto } \frac{B}{2} = \frac{4,4}{2} = 2,2$$

Reemplazando en la ecuación tenemos el modelo matemático.

$$Y = 96,6 + 2,17 X_1 + 2,2 X_2$$

Sustituyendo en la ecuación (9):

$$\% \text{Recup} = 96,6 + 2,17 \left(\frac{\text{Ángulo de inclin.} - 4,5}{1,5} \right) + 2,2 \left(\frac{\text{Amplitud stroke} - 7/16''}{5/16''} \right)$$

Corrección estadístico matemática de los resultados

Tabla 15. Corrección estadístico matemático de resultados de concentración en mesas vibratorias

Efecto	A	B	RECUPERACIÓN	
	Angulo Inclín.	Amplitud Stroke	% Actual	% Calc.
1	3	0.125	94.15	92.23
a	6	0.125	96.85	96.57
b	3	0.500	96.88	96.64
ab	6	0.500	98.52	100.98

Desvío medio cuadrático

Tabla 16. Cálculo del desvío medio cuadrático de la recuperación de oro en mesas vibratorias

Efecto	A		B		RECUPERACIÓN	
	Angulo Inclín.	Amplitud Stroke	% Actual	% Calc.	A	A ²
1	3	0.125	94.15	92.23	-1.92	3.69
a	6	0.125	96.85	96.57	-0.28	0.08
b	3	0.500	96.88	96.64	-0.24	0.06
ab	6	0.500	98.52	100.98	2.46	6.06
						9.88

$$DMC = \frac{\sum A^2}{2^n} = \frac{9,88}{4} = 2,47$$

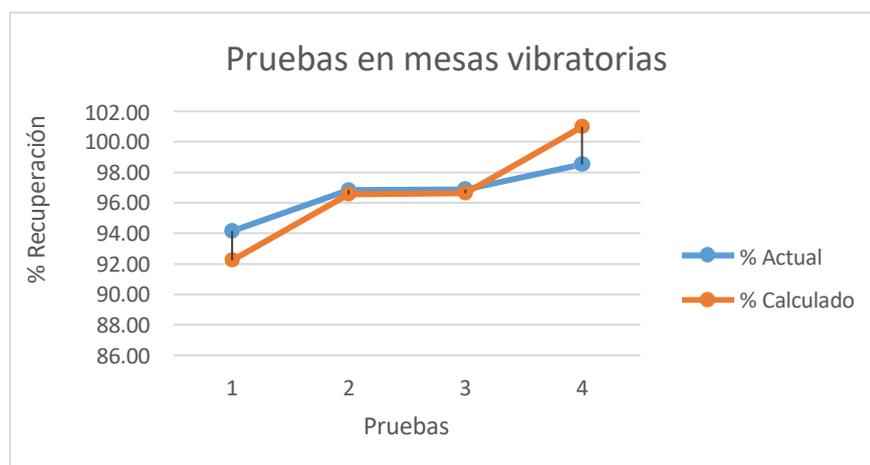
Error medio cuadrático

$$ECM = \frac{DMC}{2} = \frac{2,47}{2} = 1,235 \%$$

El error cuadrático medio de **1,235 %** respecto al valor calculado nos muestra como EXCELENTE el modelo matemático propuesto.

Variables y recuperación óptima

Figura 23. Pruebas en mesas vibratorias



Nota. Elaboración propia

Comentario: La mejor recuperación se obtiene en la prueba 4, con un ángulo de inclinación de 6° y ½" de amplitud del stroke.

Error medio cuadrático

El error cuadrático medio calculado es 1,235%; esta relación entre los resultados obtenidos a nivel experimental y el valor teórico calculado nos muestra una variación muy confiable, demostrando que las pruebas desarrolladas y el modelo matemático propuesto no tienen variación significativa por lo tanto es EXCELENTE.

A. Prueba de concentración gravimétrica con Falcon

De manera similar a las pruebas experimentales anteriores, todo el mineral fue triturado y tamizado completamente a mallas de -10. Luego, se preparó la pulpa en una proporción de 2/1 (agua/mineral), utilizando 5 kg de material para asegurar que hubiera suficiente muestra en el concentrador.

Para que el concentrador funcione de manera óptima, es fundamental mantener una alimentación continua al tanque separador.

Las condiciones de operación bajo las cuales se trabajó fueron:

Tabla 17. Condiciones de operación

Etapa	Dilución	Densidad de pulpa	Presión	Gravedad	Autopac	pH
Falcon	02:01	1350	2,5 psi	200 G	68 Hz	7,5

Nota. Elaboración propia

Esta prueba consistió en alimentar la pulpa al concentrador falcón a una densidad de 1450 g/l.

Tabla 18. Concentración en el centrifugador Falcon

Producto	peso (g)	% Peso	Leyes Au (g/t)	Contenido Au	% Recuperación Au
Concentrado	168,89	3,38	0,96	3,24	90,56
Relave	4831,11	96,62	0,10	9,66	9,44
Cabeza calculada	5000,00	100,00	1,06	12,90	100,00
Cabeza ensayada			1,05		
				Ratio concentración	28,58

A nivel experimental se obtuvieron los siguientes resultados: Recuperación del 90,56% de Au. Peso del concentrado: 3,38% Ratio de concentración: 28,58

Con este equipo se obtiene la mayor recuperación, debido a la captura de partículas finas de oro y gruesos, siempre que la alimentación tenga una granulometría homogénea, alimentación constante y especial cuidado en la recuperación del concentrado.

B. Prueba de concentración en celdas cónicas

La concentración en celdas cónicas es un proceso físico que puede ser desarrollado adecuadamente a través de un modelo matemático empírico definido por:

$$Y = f(x, u, z, h) \quad (20)$$

En el diseño factorial 2^k , se analizan los efectos de los niveles de los factores que se están considerando en el estudio.

En la etapa preliminar, se ha optado por utilizar diseños factoriales de 2 niveles con las 3 variables más relevantes para la concentración, teniendo en cuenta lo siguiente:

$$N = 2^3 = 8$$

El total de pruebas experimentales son 8 que corresponde a los vértices de un cubo.

Tabla 19. Variables intervinientes de concentración en celdas cónicas

Variables	Estados	
	Mínimo	Máximo
Densidad de pulpa (g/l)	1150	1250
Caudal (l/minuto)	20	30
Agitación (RPM)	90	120

Nota. Elaboración propia.

Se trabajó con una sola ley de cabeza que es: 4,95 g/ton de oro. Los resultados de las pruebas, se detalla en la siguiente tabla.

Aplicación de las combinaciones experimentales

Tabla 20. Resultados de concentración en celdas cónicas

Prueba No	Efecto	A Densidad de pulpa (g/l)	B Caudal (l/min)	C Agitación (RPM)	% Recuperación Au
1	1	1150	20	90	86.89
2	a	1250	20	90	87.56
3	b	1150	30	90	87.83
4	ab	1250	30	90	88.01
5	c	1150	20	120	86.97
6	ac	1250	20	120	87.84
7	bc	1150	30	120	88.05
8	abc	1250	30	120	88.63

Cálculo de los efectos

Tabla 21. Resultados del cálculo de los efectos de concentración en celdas cónicas

Prueba No	Efecto	% Recup.	I	II	III	Efecto
1	1	86.89	174.45	350.29	701.78	87.72
2	a	87.56	175.84	351.49	2.3	0.575
3	b	87.83	174.81	0.85	3.26	0.815
4	ab	88.01	176.68	1.45	-0.78	-0.195
5	c	86.97	0.67	1.39	1.2	0.3
6	ac	87.84	0.18	1.87	0.6	0.15
7	bc	88.05	0.87	-0.49	0.48	0.12
8	abc	88.63	0.58	-0.29	0.2	0.05
		701.78				

Cálculo de los coeficientes

A continuación, se presenta los cálculos de los coeficientes del modelo matemático.

$$B_0 = \text{promedio} = \frac{701,78}{8} = 87,72$$

$$B_1 = \text{efecto } \frac{A}{2} = \frac{2,30}{4} = 0,575$$

$$B_2 = \text{efecto } \frac{B}{2} = \frac{3,26}{4} = 0,815$$

$$B_3 = \text{efecto } \frac{C}{2} = \frac{1,2}{4} = 0,3$$

$$B_3 = \text{efecto} \quad \frac{\bar{C}}{2} = \frac{1,20}{4} = 0,30$$

Reemplazando en la ecuación para el modelo matemático tenemos la siguiente ecuación.

$$Y = 87,72 + 0,575X_1 + 0,815X_2 + 0,30X_3 + \text{error} \quad (24)$$

Sustituyendo en la ecuación (9):

$$\% \text{Recup} = 87,72 + 0,575 \left(\frac{\text{Densidad de pulpa} - 1200}{50} \right) + 0,815 \left(\frac{\text{Caudal} - 5}{5} \right) + 0,30 \left(\frac{\text{Agitación} - 105}{15} \right)$$

Corrección estadístico matemática de los resultados

Tabla 22. Corrección estadístico matemático de resultados de concentración en celdas cónicas

Prueba No	Efecto				Recuperación	
		A Densidad de pulpa (g/l)	B Caudal (l/min)	C Agitación (RPM)	% Recuperación	% Calculado
1	1	1150	20	90	86.89	86.03
2	a	1250	20	90	87.56	87.18
3	b	1150	30	90	87.83	87.66
4	ab	1250	30	90	88.01	88.81
5	c	1150	20	120	86.97	86.63
6	ac	1250	20	120	87.84	87.78
7	bc	1150	30	120	88.05	88.26
8	abc	1250	30	120	88.63	89.41

Desvío medio cuadrático

Tabla 23. Cálculo del desvío medio cuadrático de la recuperación de oro concentrado en celdas cónicas

Prueba No	Efecto	A	B	C	Recuperación %		A	A ²
		Densidad de pulpa (g/l)	Caudal (l/min)	Agitación (RPM)	Recuperación %	Calculado		
1	1	1150	20	90	86.89	86.03	-0.86	0.74
2	a	1250	20	90	87.56	87.18	-0.38	0.14
3	b	1150	30	90	87.83	87.66	-0.17	0.03
4	ab	1250	30	90	88.01	88.81	0.80	0.64
5	c	1150	20	120	86.97	86.63	-0.34	0.12
6	ac	1250	20	120	87.84	87.78	-0.06	0.00
7	bc	1150	30	120	88.05	88.26	0.21	0.04
8	abc	1250	30	120	88.63	89.41	0.78	0.61
								2.32

$$DMC = \frac{\sum A^2}{2^n} = \frac{2,32}{8} = 0,29$$

Error medio cuadrático

$$\checkmark ECM = \frac{DMC}{2} = \frac{0,29}{2} = 0,145 \%$$

El error cuadrático medio de **0,145 %** respecto al valor calculado nos muestra como EXCELENTE el modelo matemático propuesto.

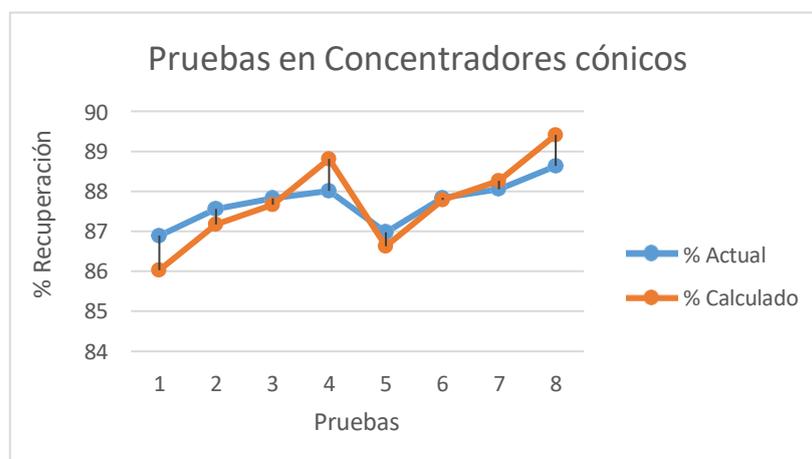
Reemplazando en la ecuación (21):

$$Y = 87,72 + 0,575X_1 + 0,815X_2 + 0,30X_3 + error \quad (24)$$

Si se visualiza la constante notamos que es positivo, lo cual nos indica que está en su mínimo valor y puede maximizarse.

Variables y recuperación óptima

Figura 24. Pruebas en concentradores cónicos



Nota. Elaboración propia

En la figura 24 se observa la mejor recuperación se obtiene en la prueba 8, con una densidad de pulpa de 1 250 g/l, caudal de 30 l/min y 120 rpm de agitación. Reemplazando los datos de las variables en el modelo matemático propuesto, se observa que el resultado obtenido se incrementa.

Error medio cuadrático

El error cuadrático medio calculado es 0,145%; esta relación entre los resultados obtenidos a nivel experimental y el valor teórico calculado nos muestra una variación muy confiable, demostrando que las pruebas desarrolladas y el modelo matemático propuesto no tienen variación significativa por lo tanto es EXCELENTE.

4.3. Prueba de hipótesis

4.3.1. Primera hipótesis específica

La primera hipótesis sugiere que, al establecer el modelo de caracterización mineralógica de las arcillas silíceas, esto tendrá un impacto en la recuperación de oro en el prospecto Sol Naciente – Dámaso Beraun – Huánuco – 2019.

La primera hipótesis específica es cualitativa, por lo tanto, no es operacional; el reconocimiento mineralógico se determina por la observación y obedece a la experiencia del investigador su caracterización.

4.3.2. Segunda hipótesis específica

La segunda hipótesis establece que identificar el rango óptimo de operación para las variables de densidad de pulpa, tamaño del grano de oro y velocidad de rotación del agitador tiene un impacto considerable en la recuperación de oro en el prospecto Sol Naciente – Dámaso Beraun – Huánuco – 2019.

Formular la hipótesis de investigación

H_0 : Establecer el rango óptimo de operación para las variables de densidad de pulpa, tamaño del grano de oro y velocidad de rotación del agitador tiene un impacto importante en la recuperación de oro en el prospecto Sol Naciente – Dámaso Beraun – Huánuco – 2019. **(Hipótesis nula)**

H_a : Establecer el rango óptimo de operación para las variables de densidad de pulpa, tamaño del grano de oro y velocidad de rotación del agitador no tiene un impacto significativo en la recuperación de oro en el prospecto Sol Naciente – Dámaso Beraun – Huánuco – 2019. **(Hipótesis alterna)**

$$H_0: \mu = 2,53$$

$$H_a: \mu \neq 2,53 \text{ Fijar el nivel de significación}$$

$$(\alpha): \alpha = 0,05 \text{ Estadístico de prueba: T de Student al } 5\% = 1,96.$$

Cálculo del valor crítico, valor de prueba y definición de las zonas de aceptación

$$V_c \rightarrow Z_c \rightarrow n \geq 30$$

$$n = 50 \text{ muestras}$$

$$V_p = \text{Valor de prueba}$$

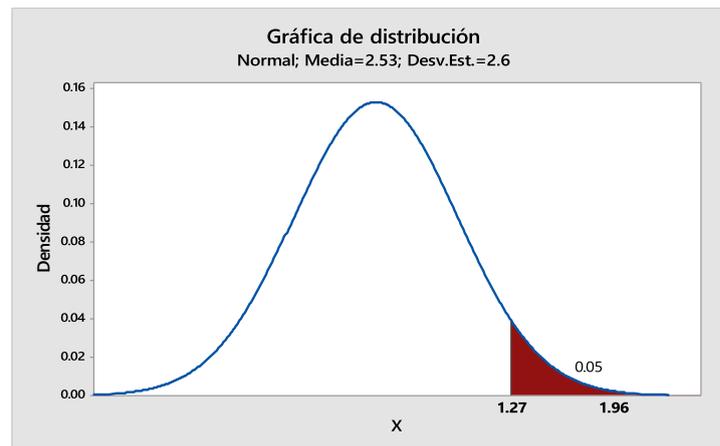
$$\mu = 2,53$$

$$\bar{X} = 3,0$$

$$\sigma = 2,6$$

$$V_p = Z_\epsilon = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} = \frac{3,0 - 2,53}{\frac{2,6}{\sqrt{50}}} = \mathbf{1,27}$$

Decisión:



$Z_c = 1,27 < 1,96$, por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna.

Conclusión

Con un nivel de significancia del 0,05, se cuenta con evidencia estadística que respalda la hipótesis alternativa, lo que permite concluir que establecer el rango óptimo de las variables de densidad de pulpa, tamaño del grano de oro y velocidad de rotación del agitador tiene un impacto significativo en la recuperación de oro.

4.4. Discusión de resultados

Las mejores recuperaciones se obtienen en los concentradores cónicos, con valores que superan el 88% de recuperación de oro; debido a su naturaleza, donde el oro se encuentra al estado nativo y los minerales accesorios son areniscas cuarcíferas y arcillas caolinizadas y que, al ingresar en contacto con el agua, se desintegran dejando libre al oro, que se presenta en forma de charpas

que van de 0,5 a 3 mm y por su peso específico desciende al cono para luego ser retirado.

Santos (2015), en sus trabajos de investigación, expone: El depósito de oro que se está analizando es del tipo placer y está compuesto por un conjunto de gravas auríferas con una potencia de aproximadamente 4 a 5 metros. Este conjunto se asienta sobre el Grupo Tahuín (PzT2), que está formado por filitas y esquistos que funcionan como roca madre. Además, el depósito está cubierto por una capa de material orgánico que varía entre 0,1 y 0,5 metros de espesor.

Según las condiciones geológico-mecánicas y las características minero-técnicas del depósito, el método de extracción más apropiado es el sistema a cielo abierto con extracción en seco utilizando excavadoras.

La recuperación del oro aluvial se llevará a cabo mediante métodos gravimétricos a través de una planta de lavado, que cuenta con jigs, canalones primarios y secundarios, y un tromel, logrando una recuperación del 90%.

CONCLUSIONES

De la evaluación metalúrgica del prospecto minero aurífero se determinó que presenta un depósito tipo placer, conformado por un manto mineralizado de arenas silíceas aglutinadas con arcilla caolinizadas, con una ley promedio de 2,53 g/T de oro y 1 235,045 toneladas de oro de reserva probadas.

Según el objetivo específico 1, de la caracterización mineralógica de las arcillas silíceas del prospecto minero aurífero Sol Naciente se observó que el mineral está compuesto de cuarzo, arcillas caolinizadas y oro libre, de las cuales el 80% de las partículas del mineral se encuentran por encima de la malla 14 y el 20% se encuentra por debajo de la malla 14.

Según el objetivo específico 2, de la evaluación de las variables se determinó que la densidad de pulpa, la dimensión del grano de oro y velocidad de rotación son factores importantes para el desplazamiento de oro a la parte baja del cono, aprovechando su peso específico alto ($19,3 \text{ g/cm}^3$) y el resto de minerales accesorios a la muestra fueron evacuados por la parte superior debido a su peso específico promedio de 2,3, baja densidad de pulpa y agitación constante. La mejor recuperación se obtuvo en la celda cónica en la que alcanzo 88,63% recuperación de oro, y en las pruebas de concentración en jigs, mesas vibratorias y concentrador falco las recuperaciones fueron bajas.

RECOMENDACIONES

Desarrollar mayor prospección al contorno de la zona identificado, para identificar el posible yacimiento primario que dio origen al depósito en estudio.

Analizar los relaves del proceso de recuperación de oro, porque en la prueba ICP realizada, se observa la presencia de tierras raras.

En un proceso de extracción del yacimiento, realizar preferentemente en la época de verano, porque en la estación de invierno llueve permanentemente afectando las operaciones y el plan de manejo ambiental y de cierre se verían afectados.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Addison, R. (1986). *Gold and Silver Extraction from Sulfides ores*. Mining Congress Journal (págs. 47 - 54). Melbourne: Congress.
- Addison, R. (1986). *Gold and Silver Extraction from Sulfides Ores*. Mining Congress Journal. Utha.
- Argall, G. (1984). *Precious Metals Extraction*. International Mining (págs. 32 - 44). Utha: Congress.
- Argall, G. (1984). *Preciuos Metals Extraction*. Intenational Mining, 32 - 44.
- Avila P. (2017). *Parámetros de operación del Separador Jig para material tomado de mun placer aurífero*. [Tesis de titulación- Universidad de Azuay, Ecuador]. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/7450/1/13358.pdf>
- Bergamashi, G. (1987). *Oro*. Madrid - España: Mondadori. Cánepa, C. (1992). *Mineralogía del Oro y su significación en Metalurgia*. Lima: Tecsup. Dana, J. (1992). *Mineralogía de Dana*. Madrid - España: Reverte.
- Deschenes, G. (1987). *Investigation on the Potential Techniques to Recover Gold from Thiourea Solutions*. Proceedings of the International Symposium on Gold Metallurgy (págs. 359 - 377). New York: Salter, R. E., Wyslouzill, D. M., Pergamon Press.
- Dorr, J. (1956). *Cyanidation and Concentration of Gold and Silver Ores*. New York: McGraw-Hill.
- Dorr, J. (1986). *Cyanidation and Concentration of Gold and Silver Ores*. New York and London: McGraw-Hill.
- Electrochemical. *Methods Fundamentals and Applications*. (1980). En A. Bard, & L. Faulkner. México: John Willey and Sons.
- Filmer, A. (1982). *The Dissolution of Gold from roasted Pyrite Concentrates*. Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy (págs. 90 - 94). Johanesbrugo: Journal Institute.

- Filmer, A. (1992). *The Dissolution of Gold from Roasted Pyrite Concentrates*. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 90-94.
- Finkelstein, N. P. (1972). *The Chemistry of the Extraction of Gold from its Ores*. Johannesburg, Africa: Adamson, R. Finkelstein, N. P. (1972). *The Chemistry of the Extraction of Gold from its Ores*. Johannesburg - Africa: Adamson, R.
- Fleischmann, M. S. (1986). *An SERS Study of Silver Electrodeposition from Thiourea and Cyanide Containing Solutions*. Electrochimica Acta (págs. 907 - 916). Uta: M&ME.
- Fleischmann, M., Sunholm, G., & Tian, Z. (1986). *An SERS Study of Silver Electrodeposition from Thiourea and Cyanide containing solutions*. Electrochimica Acta (págs. 907 - 916). Uta: Univ. Uta.
- García, J. O. (1988). *Recuperación de Metales Preciosos a partir de una Solución Tiourea, vía Cementación con Aluminio*. Memorias del 1er Congreso, Asociación Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, (págs. 327 - 343). Rio de Janeiro - Brasil.
- GRAF, G. (2002). *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim, Germany: Wiley - VCH Verlag GmbH.
- Guay, W. (1991). *The Treatment of Refractory Gold Ores Containing Carbonaceous Material and Sulfides*. Gold and Silver Leaching, Recovery and Economics . Montana: Universidad Montana.
- Gutierrez Pulido, H. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. México D. F.: Mc Graw Hill.
- Hiskey, J. B. (1981). *Thiourea as Lixiviant for Gold and Silver*. Littleton: Society of Mining Engineers.
- Hurtado, H. (2003). *Oro oculto en el Perú*. Lima: UNAS.
- Jha, M. (1984). *Recovery of Gold and Silver from Cyanide Solutions: a comparative*

- study of various processes*. The First International Symposium of Precious Metals Recovery. New York.
- Jha, M. C. (1985). *Recovery of Gold and Silver from Cyanide Solutions*. International Symposium of Precious Metals Recovery. Nevada - U.S.A.
- Juarez, C. &. (2000). *Gold Electrowinning from Thiourea Solutions*. Elsevier Science Ltd., 1083 - 1096.
- Lawson, F. (1985). *Cementation Kinetics*. Thermodynamics and Kinetics of Metallurgical Processes (págs. 207 - 225). Nevada: Mohan, M., Rao, K.
- MAJA, M. &. (1988). Electrochemistry. *Society Electrochemistry*, 129, 12, 2695.
- Melo, O. e. (2020). *Diseño de experimentos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Misari, F. (1987). *Experiencias en una operación de lixiviación en pilas para minerales de oro a 4600 msnm*. IV Simposio de Ingeniería Metalúrgica. Arequipa.
- Misari, F. (1990). *Técnicas de Tratamiento de Minerales Refractarios de Oro*. Metalurgia: Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Nacional. Cerro de Pasco.
- Misari, F. (2010). *Metalurgia del Oro*. Lima: CEPETEC.
- Montgomery, D. (2005). *Design and Analysis of Experiments*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Nical, M. J., Schalch, E., & Balestra, P. (1989). *A Modern Study of The Kinetics and Mechanism of the Cementation of Gold*. Journal of the South African (págs. 191 - 198). South African: Institute of Mining and Metallurgy.
- PARADA, F. &. (2009). *JOM*, 54. Potter, G. (1981). *Design Factors for Heap Leaching Operations*. Mining Engineering, 277 - 281.
- Salas, A. (2018). *Métodos Estadísticos para la investigación científica*. Guayaquil: Compas.
- Simpson, W. P. (1994). *Gold and Silver Recovery from Thiourea Leach Solutions*. Pacific

- Northwest Metals and Minerals Conference, (págs. 1 - 10). Oregon.
- Smith, K. (2005). *Manual del Falcon Concentrator*. Australia: Falcon.
- Strickland, P. H. (1973). *The Measurement and Interpretation of Cementation Rate Data*. International Symposium on Hydrometallurgy (págs. 293 - 330). New York: Evans, D. and Shoemaker, R.
- Torres, E. (2013). *Métodos estadísticos para la investigación experimental*. Amazonas: Compugraf.
- Van, M. (2006). *Nuevas Aplicaciones de Concentración Centrífuga*. VI Simposio Internacional de Mineralurgia. Lima: Tecsup.
- Varios. (2008). *Compañías mineras productoras de Oro en el Mundo y el Perú*. Mundo Minero, págs. 70 - 72.
- Varios. (2008). Conferencias. *VIII Simposium Internacional del Oro* (pág. 257). Lima: SNMP.
- Wikipedia. (2021). https://es.wikipedia.org/wiki/Poblaci%C3%B3n_estad%C3%ADstica. Wills, B. A. (1991). *Mineral Processing Technology*. México: Pergamon Press.
- Zadra, J.; Engel, A.; Heinen, H. (1972). *Process for Recovery Gold and Silver Activated Carbon by Leaching and Electrolysis. Report of Investigations 4845 - Bureau of Mines*, 13 - 17.
- ZHANG, Q. &. (2009). *Hydrometallurgy*. Tokio: Univ. Tokio.

ANEXOS

Instrumentos de Recolección de Datos

Tabla de Análisis granulométrico

Malla	Gramos	% Peso	Acumulado (+)	Acumulado (-)
4"	176.80	17.68	17.68	82.32
3"	90.60	9.06	26.74	73.26
2"	127.00	12.70	39.44	60.56
1"	147.60	14.76	54.20	45.80
3/4"	43.80	4.38	58.58	41.42
1/2"	48.60	4.86	63.44	36.56
1/4"	33.60	3.36	66.80	33.20
6	57.80	5.78	72.58	27.42
10	25.40	2.54	75.12	24.88
14	27.80	2.78	77.90	22.10
20	34.40	3.44	81.34	18.66
28	25.60	2.56	83.90	16.10
35	36.40	3.64	87.54	12.46
48	22.80	2.28	89.82	10.18
65	26.00	2.60	92.42	7.58
100	15.40	1.54	93.96	6.04
150	15.20	1.52	95.48	4.52
200	18.80	1.88	97.36	2.64
-200	26.40	2.64	100.00	0.00
TOTAL	1000.00	100.00		

Figura de Diseño de redes

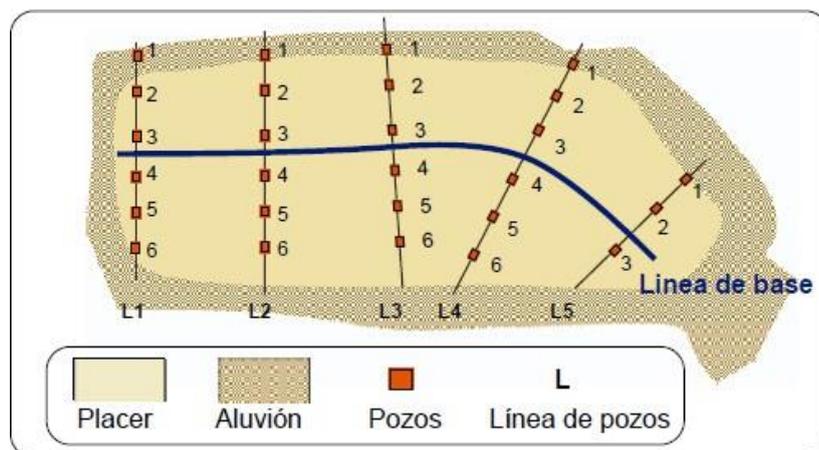


Tabla de Técnicas e instrumentos

No	ACTIVIDAD	TÉCNICA	INSTRUMENTO
1	Cubicación de reservas	Diseño de redes	Tablas
2	Recolección de muestras	Cono y cuarteado	Tablas
3	Determinación del peso específico	Método del picnómetro	Tablas
4	Análisis granulométrico	Tamizado	Tablas
5	Análisis químico	Vía seca	Tablas
6	Reconocimiento mineralógico	Análisis mineralógico	Fotografías
7	Concentración en Jigs	Movimiento oscilatorio	Tablas
8	Concentración en mesas vibratorias	Movimiento concéntrico	Tablas
9	Concentración en equipos Falcon	Separación concéntrica rápida	Tablas
10	Concentración en celdas cónicas	Separación concéntrica lenta	Tablas

ANEXO 2: FOTOGRAFÍAS



Fotografía 1. Superficie del yacimiento



Fotografía 2. Acopio de muestra



Fotografía 2. Homogenizado de la muestra



Fotografía 3. Tamizado de la muestra



Fotografía 4. Contra muestra



Fotografía 5. Preparación de muestra



Fotografía 6. Muestra de oro



Fotografía 7. Horno a gas para la fundición



Fotografía 8. Laboratorio metalúrgico



Fotografía 9. Concentración en mesa vibratoria



Fotografía 10. Concentrador cónico