

REVISTA O UNIVERSO OBSERVÁVEL

**OPTIMIZACIÓN MEDIANTE METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA
DE LOS PARÁMETROS DE FLOTACIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO
RESIDUAL DE RELAVES DE MESA GRAVIMÉTRICA EN MADRE DE DIOS**

**OPTIMIZATION BY RESPONSE SURFACE METHODOLOGY OF FLOTATION
PARAMETERS FOR THE RECOVERY OF RESIDUAL GOLD FROM
GRAVIMETRIC TABLE TAILINGS IN MADRE DE DIOS**

Marcelino Vargas Quea¹

Gloria Silva Laura²

Oswaldo Luzver Maynas Condori³

Yana Gerutza Silva⁴

Revista O Universo Observável

DOI: 10.69720/29660599.2025.000131

ISSN: 2966-0599

¹Ingeniero Metalurgista, Magister Scientiae en Tecnologías de Protección Ambiental, Doctor en Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.

Email: mvgas@epg.unap.edu.pe

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2670-495X>

²Licenciada en Topografía y Geodesia, Universidad Mayor de San Andrés Bolivia, Master en Tecnologías de la información Geográfica para ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, España.

Email: g2129laura@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6295-2300>

³Ingeniero Metalurgista, Magister Scientiae en Seguridad Industrial y Ambiental, Universidad Nacional del Altiplano Puno, Perú.

Email: oswaldoluzverma@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6900-7049>

⁴Ingeniero Ambiental de Universidad Amazónica de Pando, Bolivia.

Email: benjhoss1907902016@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3953-3230>



**OPTIMIZACIÓN MEDIANTE METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA DE
LOS PARÁMETROS DE FLOTACIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO RESIDUAL
DE RELAVES DE MESA GRAVIMÉTRICA EN MADRE DE DIOS**

Marcelino Vargas Quea, Gloria Silva Laura, Oswaldo Luzver Maynas Condori e Yana Gerutza Silva



PERIÓDICO CIENTÍFICO INDEXADO INTERNACIONALMENTE

ISSN
International Standard Serial Number
2966-0599

www.ouniversoobservavel.com.br

Editora e Revista
O Universo Observável
CNPJ: 57.199.688/0001-06
Naviraí – Mato Grosso do Sul
Rua: Botocudos, 365 – Centro
CEP: 79950-000

RESUMEN

La minería aurífera en Madre de Dios genera relaves gravimétricos con oro residual ($<75 \mu\text{m}$) no recuperado por métodos tradicionales. Este estudio optimizó mediante Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) los parámetros de flotación espumante selectiva para maximizar su recuperación. Se empleó un Diseño Compuesto Central (DCC) con 21 experimentos evaluando cuatro factores: tamaño de partícula (38-74 μm), dosificación de Dow Froth 250 (30-70 g/t), xantato amílico de potasio (26-150 g/t) y porcentaje de sólidos (20-38%). Las pruebas utilizaron 100 kg de relave de mesa gravimétrica de la unidad minera Paolita II, procesados en celda mecánica Serrana con agitación constante (460 rpm). Los concentrados y relaves se analizaron mediante ensayos al fuego. El modelo cuadrático de RSM ($R^2 = 0.941$; $p < 0.05$) identificó condiciones óptimas: tamaño de partícula natural (56 μm , sin molienda), 50 g/t de Dow Froth 250, 88 g/t de xantato amílico de potasio y 31% de sólidos, alcanzando 95.75% de recuperación. El análisis ANOVA reveló efectos significativos: el xantato mostró impacto negativo por sobredosificación (-8.4% por unidad; $p < 0.001$), mientras la interacción Dow Froth 250-xantato mejoró la adhesión (+6.39%; $p = 0.043$). La cinética, ajustada al modelo de García-Zúñiga ($R^2 = 0.9976$), confirmó que el 80% del oro residual se recupera en 5-12 minutos. Estos resultados validan la RSM para optimizar la flotación de oro residual, ofreciendo a la Minería Artesanal y de Pequeña Escala (MAPE) un protocolo escalable, libre de mercurio y de bajo costo, que revaloriza pasivos mineros con impacto ambiental reducido.

Palabras clave: Flotación, Recuperación, Relave, Optimización, Tamaño

ABSTRACT

Gold mining in Madre de Dios generates gravimetric tailings with residual gold ($<75 \mu\text{m}$) not recovered by traditional methods. this research optimized the selective foaming flotation parameters using Response Surface Methodology (RSM) to maximize their recovery. A Central Composite Design (CCD) was used with 21 experiments evaluating four factors: particle size (38-74 μm), dosage of Dow Froth 250 (30-70 g/t), potassium amyl xanthate (26-150 g/t) and percentage of solids (20-38%). The tests used 100 kg of gravimetric table tailings from the Paolita II mining unit, processed in a Serrana mechanical cell with constant agitation (460 rpm). The concentrates and tailings were analyzed by fire tests. The quadratic model of RSM ($R^2 = 0.941$; $p < 0.05$) identified optimal conditions: natural particle size (56 μm , without grinding), 50 g/t of Dow Froth 250, 88 g/t of potassium amyl xanthate and 31% of solids, reaching 95.75% recovery. The ANOVA analysis revealed significant effects: xanthate showed negative impact due to overdosage (-8.4% per unit; $p < 0.001$), while the Dow Froth 250-xanthate interaction improved adherence (+6.39%; $p = 0.043$). Kinetics, adjusted to the García-Zúñiga model ($R^2 = 0.9976$), confirmed that 80% of the residual gold is recovered in 5-12 minutes. These results validate the MSN to optimize the flotation of residual gold, offering Artisanal and Small-Scale Mining (ASM) a scalable, mercury-free and low-cost protocol that revalues mining liabilities with reduced environmental impact.

Keywords: Flotation, Recovery, tailings, Optimization, Size

INTRODUCCIÓN

La minería de oro aluvial ha sido históricamente una actividad extractiva de gran relevancia económica y social en países con abundantes recursos minerales (Mathioudakis et al. 2023). Estos depósitos se originan a partir de la erosión de rocas primarias, cuyo material aurífero es transportado por sistemas fluviales y depositado en llanuras aluviales (Nikiforova et al. 2018). El oro aluvial se caracteriza por presentarse en partículas finas (37–200 μm), cuya accesibilidad superficial lo hace más viable económicamente que el oro en vetas subterráneas o diseminadas (Nesterenko & Kolpakov, 2007). Sin embargo, el principal desafío técnico radica en la recuperación eficiente de partículas $<75 \mu\text{m}$, ya que su baja masa y alta susceptibilidad al

arrastre hidrodinámico limitan la efectividad de los métodos gravimétricos tradicionales (Peukert & Wadenpohl, 2001; Mulleneers et al. 2002).

Ante la limitación de los métodos gravimétricos para recuperar partículas finas ($<200 \mu\text{m}$) en relaves de mesa gravimétrica donde la similitud en arrastre hidrodinámico entre oro fino y minerales ligeros reduce la eficiencia y la flotación emerge como alternativa viable (Forrest et al., 2001). Las partículas de oro fino, por su naturaleza hidrófoba, se adhieren a burbujas de aire, mientras que los minerales de ganga, de naturaleza hidrófila, permanece suspendida (Norori-McCormac et al. 2017). El oro aluvial se presenta como partículas auríferas libres, sin asociación mineralógica con sulfuros, silicatos o materiales carbonáceos, a diferencia del oro

refractario encapsulado (Junge et al. 2023). Estas partículas, con tamaños entre 38 y 75 μm , son recuperables mediante flotación al inducir su hidrofobicidad con colectores, adhiriéndose a burbujas de aire, mientras la ganga hidrófila permanece en suspensión (Toktar et al. 2023). La eficiencia depende críticamente de propiedades físicas como morfología y distribución granulométrica (McGrath et al. 2013). Cabe destacar que, en materiales primarios aluviales, minerales densos (magnetita, hematita) dificultan la separación gravimétrica inicial; en sus relaves, la flotación supera estas limitaciones al operar sobre propiedades superficiales más que en densidad (Marcin, 2023; Alekseev & Banshchikova, 2018).

La flotación es un proceso fisicoquímico de separación selectiva fundamentado en la hidrofobicidad inducida del oro residual colectores y la hidrofiliidad de la ganga (Aksoy y Yazar, 1989; Kowalczyk et al. 2011). Este método supera las limitaciones de la concentración gravimétrica en relaves, mejorando la recuperación de partículas finas ($<75 \mu\text{m}$), responsables de hasta el 40 % de las pérdidas (Forrest et al. 2001; Fornasiero y Filippov, 2017; Miettinen et al. 2010). El método se fundamenta en la hidrofobicidad del oro libre y fino residual, que permite su selectiva adhesión a burbujas de aire durante la flotación en pulpa acuosa. Los minerales hidrofílicos, como silicatos y óxidos, no son capturados y permanecen en suspensión (Wang & Liu, 2021). En el caso del oro fino, su baja afinidad por el agua favorece su recuperación incluso sin modificadores químicos, aunque estos pueden optimizar la separación (Kenzhaliyev, Koizhanova, et al. 2024). La recuperación de oro residual mediante flotación requirió un balance entre el tamaño de partícula (38–75 μm) y los parámetros del proceso (tamaño de partícula, la concentración de colectores, espumantes y promotores, el tiempo de residencia, la velocidad de agitación). Mientras que la hidrofobicidad del oro permitió su captura, la ganga hidrofílica se eliminó eficientemente bajo condiciones controladas (Allan & Woodcock, 2001); (Ran et al. 2019). Contrario a lo esperado, partículas menores a 50 μm mostraron mayor recuperación a su baja densidad, que facilitó la adhesión a burbujas de aire. En cambio, partículas mayores a 150 μm presentaron menor flotabilidad ya que su alta densidad sobre el arrastre hidrodinámico (Tao, 2005; Moreno y Ata, 2016). Además del

tamaño, la eficiencia del proceso dependió de la liberación, la composición mineralógica de sulfuros, silicatos, óxidos, carbonáceos y la morfología de las partículas influyen críticamente en la selectividad del proceso (Farrokhpay et al. 2021). En depósitos aluviales, la asociación de oro a minerales pesados (pirita, magnetita, hematita y wüstita) complicó la selectividad, ya que sus propiedades superficiales similares y alta densidad incrementaron la masa del concentrado final (Özçelik y Ekmekçi, 2024).

La elevada hidrofobicidad de la pirita en comparación con el oro aluvial perjudica la selectividad del proceso, produciendo concentrados contaminados con especies no valiosas (Toktar et al. 2023). Esto hizo necesario el uso de colectores de acción selectiva, como derivados de xantatos de cadena corta, que se adsorben preferencialmente sobre el oro mediante enlaces químicos (Au-S), mejorando su recuperación sin promover la flotación de ganga (McGrath et al. 2013).

Los reactivos de flotación son compuestos químicos diseñados para modificar selectivamente las propiedades superficiales de las partículas, facilitando la adhesión preferencial del oro a las burbujas de aire durante la formación de espumas (Toktar et al. 2023). Entre estos, el colector desempeña un papel fundamental al adsorberse específicamente sobre la superficie del oro mediante interacciones químicas, lo que incrementa su hidrofobicidad y optimiza su recuperación selectiva en la espuma mineralizada (Kenzhaliyev et al. 2024).

Los espumantes desempeñan un rol clave en la flotación al estabilizar las burbujas de aire y regular la tensión superficial de la pulpa, que favorece la adhesión selectiva de partículas hidrófobas de oro aluvial a la fase espumosa, mientras los minerales hidrofílicos permanecen en la suspensión acuosa (Teague et al. 1999). Según (Farrokhpay et al. 2021), estos reactivos modulan la tensión interfacial en la pulpa, promoviendo la formación de burbujas homogéneas (0.5–2 mm) y mejorando la estabilidad de la espuma. Este control cinético genera una fase espumosa uniforme que concentra selectivamente las partículas de oro, facilitando su separación mecánica de la ganga. Adicionalmente, surfactantes iónicos actúan como modificadores reológicos, alterando propiedades como la viscosidad, elasticidad y velocidad de drenaje del líquido, que influye

directamente en la movilidad y persistencia de la espuma (Jera et al. 2021). Los modificadores basados en polímeros funcionales como poliacrilamidas con grupos carboxilo o sulfonato, optimizan la flotación en medios alcalinos (pH 8-10) mediante la adsorción selectiva en superficies minerales. Este mecanismo incrementa la hidrofiliidad de la ganga (óxidos de hierro, silicatos), mejorando la selectividad hacia partículas de oro fino ($< 50 \mu\text{m}$) y elevando la eficiencia de extracción en un 15-20% bajo condiciones controladas (Albijan et al. 2010). Las condiciones operativas críticas como el pH, granulometría y densidad de la pulpa (25 a 40%), el tiempo de residencia, la dosificación de reactivos (colectores, espumantes y promotores), requieren un control preciso para maximizar la eficiencia del proceso (Klimpel, 1999). En particular, el pH óptimo (56.5 a 8.5) potencia la acción de los colectores al favorecer la ionización de grupos funcionales en la superficie del oro, incrementando su hidrofobicidad y la recuperación de partículas libres (Liang et al. 2024).

La agitación mecánica (460 rpm) mantiene una suspensión homogénea, logrando eficiencias de colisión partícula-burbuja superiores al 70%. Junto con una densidad de pulpa adecuada (25-40%), este parámetro optimiza la viscosidad del medio y la movilidad de las burbujas, mejorando la cinética de adhesión y minimizando el arrastre de ganga (Allan & Woodcock, 2001; Norori-McCormac et al. 2017).

Esta sinergia entre parámetros fisicoquímicos y mecánicos permite alcanzar recuperaciones superiores al 85 % en yacimientos aluviales con predominancia de oro fino ($< 75 \mu\text{m}$). La dosificación óptima de reactivos (100 g/t), es crítica para modular la hidrofobicidad del oro mediante adsorción selectiva, formando monocapas que incrementan el ángulo de contacto ($> 80^\circ$) y favorecen una adhesión eficiente a las burbujas (Agorhom et al. 2013). Sin embargo, dosificaciones excesivas reducen la recuperación al saturar la superficie y generar agregados no selectivos.

Adicionalmente, minerales de ganga como magnetita (Fe_3O_4) y hematita (Fe_2O_3) con propiedades superficiales análogas al oro compiten por los sitios de adsorción de los reactivos. Este efecto de enmascaramiento disminuye tanto la selectividad como la eficiencia global del proceso (Monte et al. 1997).

Para optimizar los experimentos de flotación de oro residual en relaves gravimétricos, se emplea la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) y Diseño Compuesto Central (DCC), evaluando efectos no lineales de variables operativas (Bai et al. 2018). A partir de los datos experimentales, se construyen modelos de regresión cuadrática multivariable que relacionan factores operativos con la respuesta metalúrgica. Posteriormente, se aplica un enfoque estocástico para optimizar los parámetros, reduciendo significativamente el número de ensayos. Simultáneamente, el modelo cinético de García-Zúñiga caracteriza la recuperación del oro durante el proceso (García-Zúñiga, 1935). Ambas metodologías se integran mediante RStudio v4.3.2 para optimizar parámetros y validar el modelo cinético.

El objetivo general de esta investigación fue optimizar mediante la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) los parámetros operativos de flotación espumante selectiva para maximizar la recuperación de oro residual ($< 75 \mu\text{m}$) en relaves de mesa gravimétrica de Madre de Dios, evaluando variables críticas (tamaño de partícula, pH, dosificación de colectores/espumantes/promotores, velocidad de agitación y densidad de pulpa). Con ello, se busca incrementar la eficiencia metalúrgica del proceso, mitigar pérdidas de oro fino y promover su aplicabilidad en la Minería Artesanal y de Pequeña Escala (MAPE), contribuyendo a prácticas extractivas sostenibles con reducido impacto ambiental.

MÉTODOS

Ámbito o lugar de estudio

La investigación se desarrolló en la Unidad Minera Paolita II, ubicada en el distrito de Laberinto, provincia de Tambopata, departamento de Madre de Dios (Perú). Geográficamente, el área de muestreo se localiza entre las coordenadas $12^\circ 40' 29.39''$ S de latitud y $69^\circ 37' 45.12''$ O de longitud, zona representativa de la minería aluvial en la Amazonía peruana. El material de estudio consistió en relaves provenientes de una mesa gravimétrica, específicamente del concentrado de canalones (denominado localmente "arenilla negra"), generado durante el proceso de beneficio del oro aluvial.

DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS

a) Periodo de estudio o frecuencia de muestreo.

La investigación se realizó entre septiembre y noviembre de 2024, periodo durante el cual se recolectó una muestra representativa de 100 kg de relaves provenientes de una mesa gravimétrica. Este material correspondía específicamente a los residuos generados en la etapa posterior al beneficio de oro aluvial, obtenidos del concentrado de canalones - conocido localmente como arenilla negra.

b) Descripción detallada de los materiales, insumos e instrumentos utilizados en la ejecución de la investigación. Se debe considerar marca, modelo de los equipos o materiales

Se extrajo una muestra representativa de 100 kg de relave de mesa gravimétrica durante los meses de setiembre a noviembre de 2024 de la unidad minera Paolita II. Posteriormente, se procedió a trasladar la muestra a laboratorio en donde se procedió al secado, homogeneizado y partición de la muestra con un divisor tipo Jones hasta obtener una muestra representativa de 20 muestras de 5 kg cada una, 250 gramos para análisis de contenido oro en alimento a flotación. Esta muestra fue sometida a ensayos al fuego para determinar el contenido de oro, realizándose tres mediciones por triplicado.

Se midió el agua requerida con una probeta de 1000 cm³ y se vertió 10.15 litros de agua a la celda mecánica tipo Serrana 1pie x 1.2 pies. Se añadieron 5 kg de relave proveniente de mesa gravimétrica a la celda mecánica tipo serrana. Los reactivos se dosificaron secuencialmente: primero el xantato amílico de potasio (7.50 ml de solución al 10%) y posteriormente el espumante Dow Froth 250 (8 ml de solución al 50%).

El tiempo de acondicionamiento fue de 5 minutos para el colector y 4 minutos para el espumante, sumando un total de 9 minutos de acondicionamiento. El impulsor de la celda captó aire, iniciando el proceso de oxigenación que se incrementó hasta lograr la formación de burbujas estables.

El proceso de flotación se desarrolló en tres intervalos consecutivos de 4, 5, 7, 9, 12 y 20 minutos respectivamente. Las espumas mineralizadas que se generaron se recolectaron mediante autodepuración, se depositaron cuidadosamente en bandejas metálicas y posteriormente se sometieron a secado.

Se analizó por ensayos al fuego por oro la muestra de concentrado y relave, fundiéndolo

a una temperatura de 1064 °C en un horno de fundición y copelación obteniendo el doré de oro y plata, se separó la plata del oro con ácido nítrico al 20%, finalmente el peso el oro fino en una ultramicrobalanza RPR2U, de capacidad 2.1 g, legibilidad 0.1 µg, repetibilidad 0.15 µg. Finalmente, la realización del balance metalúrgico correspondiente.

c) Variables analizadas, indicar que variables intervinieron en el objetivo.

Las variables que intervinieron en el objetivo son: Las variables independientes son tamaño de partícula de oro de 38 a 74 µm, Dow Froath 250 30g/t a 70 g/t, xantato amílico de potasio 26g/t a 150 g/t, porcentaje de sólidos 20 % a 38% y la variable dependiente es la recuperación de oro en (%).

d) Prueba estadística aplicada, solo colocar la probabilidad (p) o nivel de significancia estadística.

Para optimizar los parámetros de flotación de oro residual, se implementó un diseño central compuesto (DCC) de cuatro factores, integrando técnicas de regresión lineal y ANOVA con un 95% de confianza ($\alpha = 0.05$). Este enfoque permitió evaluar sistemáticamente: efectos individuales (tamaño de partícula: 38-74 µm; dosificación de reactivos: Dow Froath 250 30-70 g/t y xantato amílico 26-150 g/t; porcentaje de sólidos: 20-38%); interacciones binarias; y efectos cuadráticos. Mediante RStudio v4.3.2, se desarrolló un modelo matemático predictivo que vinculó estas variables con la recuperación de oro residual, identificando condiciones óptimas mediante metodología de superficie de respuesta (RSM). El DCC facilitó la exploración sistemática del espacio experimental, mientras que el ANOVA identificó los efectos principales e interacciones más relevantes. La RSM generó un modelo predictivo que determinó las condiciones óptimas del proceso, y los resultados se validaron mediante pruebas experimentales.

Se optimizó mediante modelo de superficie de respuesta (RSM), el cual permitió evaluar el efecto de variables en la recuperación de oro residual.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq k} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a) Resultados

Se presenta los resultados de la evaluación de eficiencia del proceso de flotación en la recuperación de oro aluvial a partir de relaves de mesa gravimétrica que fue ensayada en laboratorio.

- Cinética de flotación de oro aluvial

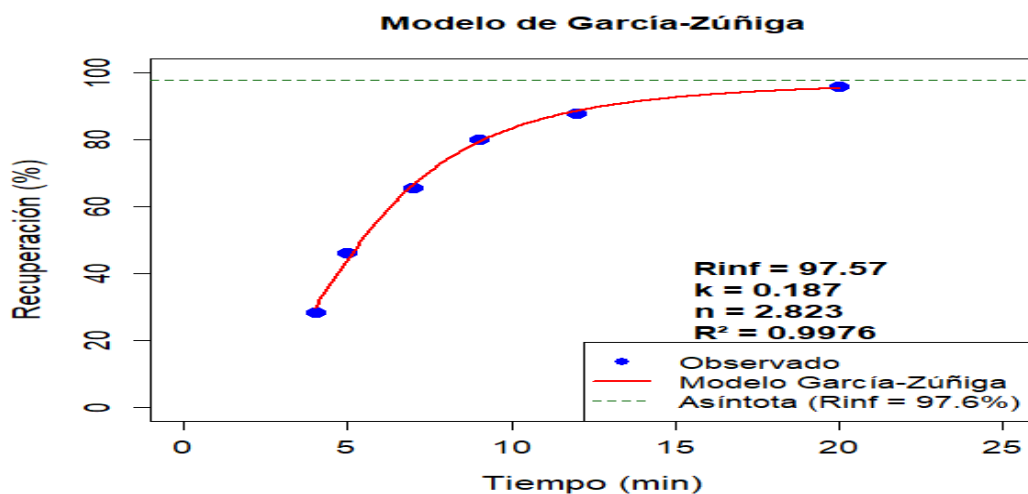
La tabla 1 revela la relación directamente proporcional entre el tiempo de flotación y la recuperación de oro aluvial, con un crecimiento asintótico en la eficiencia. En la etapa inicial (4 min), la recuperación alcanza solo 28.39%, reflejando una adhesión incipiente de partículas a las burbujas. Entre 5 y 7 minutos, se produce un punto de inflexión con un incremento del 37.04%, asociado a la captura acelerada de partículas de oro ($<45 \mu\text{m}$). Posteriormente, a los 12 minutos se estabiliza en 87.80%, indicando el inicio de rendimientos decrecientes. La recuperación máxima (95.75%) se obtiene a los 20 minutos, evidenciando la saturación del sistema. Estos resultados demuestran que el tiempo de flotación es un parámetro crítico para optimizar la recuperación aurífera bajo condiciones controladas, con ventanas operativas óptimas entre 7 y 12 minutos.

Tabla 1 Cinética de flotación de oro aluvial

Tiempo de flotación (min)	Recuperación (%)
4	28,39
5	46,16
7	65,43
9	79,83
12	87,80
20	95,75

La figura 1 muestra el ajuste modelo de García-Zúñiga a los datos experimentales de recuperación de oro residual en función del tiempo, con parámetros estadísticamente significativos ($p < 0.05$): recuperación asintótica (R_{∞}) = 97.57%, constante cinética $k = 0.187 \text{ min}^{-1}$ y parámetro de curvatura $n = 2.823$. El coeficiente $R^2 = 0.9976$ valida la robustez del modelo para describir la cinética de flotación. Se identifican tres fases diferenciadas. Fase de inducción ($t \rightarrow 0$), la recuperación lenta, asociada al mojado inicial de partículas y formación de complejos burbuja-partícula; en la fase de aceleración, Crecimiento rápido impulsado por adhesión colectiva de partículas con hidrofobicidad inducida por reactivos; y en la fase de saturación, estabilización progresiva al agotarse las partículas flotables de oro residual ($<75 \mu\text{m}$).

Figura1 Cinética de flotación de oro aluvial



- Parámetros y resultados de las pruebas diseñadas

Para modelar y optimizar la flotación de oro residual se presenta en la tabla 2 mediante metodología de superficie de respuesta (RSM), se seleccionaron como variables independientes:

Tabla 2 Parámetros y niveles relevantes

Nombre de factores	Mínimo	Codificado bajo	Medio	Codificado alto	Alto
Tamaño (µm)	38	47	56	65	74
DF 250 (g/tm)	30	40	50	60	70
Xantato amílico de potasio (g/tm)	4	57	88	119	150
Porcentaje de sólidos (%)	20	24,5	29	33,5	38

Las variables tiempo de flotación (20 min) y velocidad de la celda (460 rpm) se mantuvieron constantes, según pruebas preliminares que demostraron su menor influencia relativa en la recuperación de oro residual.

La Tabla 3 resume los 21 experimentos del diseño central compuesto (DCC) aplicado para optimizar la flotación de oro residual. Se evaluaron cuatro factores como tamaño de partícula (38–74 µm), dosificación de Dow Froath 250 (30–70 g/t), xantato amílico de potasio (26–150 g/t) y porcentaje de sólidos (20–38%). La recuperación de oro residual varió significativamente entre experimentos, registrando su valor mínimo (67.53% en la prueba 14 con alta dosificación de xantato

amílico de potasio) y máximo (93.32% en la prueba 13 con dosis mínima de este reactivo (26 g/t), evidenciando la influencia crítica del colector en la eficiencia del proceso. Paralelamente, las réplicas del centro (pruebas 17-21) realizadas en condiciones estándar (56 µm, 50 g/t Dow Froath 250, 88 g/t xantato, 29% sólidos) mostraron alta repetibilidad con recuperaciones entre 81.97% y 83.68%, validando la robustez metodológica del diseño experimental.

Tabla 3 Resultados y condiciones de las pruebas diseñadas

Número	Tamaño (µm)	Dow Froath 250 (g/tm)	Xantato amílico de potasio (g/tm)	Porcentaje de sólido (%)	Recuperación (%)
1	47	40	57	24,5	84,94
2	65	40	57	33,5	83,76
3	47	60	57	33,5	89,18
4	65	60	57	24,5	84,54
5	47	40	119	24,5	68,67
6	65	40	119	24,5	70,74
7	47	60	119	33,5	88,94
8	65	60	119	33,5	79,71
9	38	50	88	29	86,14
10	74	50	88	29	74,42
11	56	30	88	29	74,48
12	56	70	88	29	87,84
13	56	50	26	29	93,32
14	56	50	150	29	67,53
15	56	50	88	20	68,91
16	56	50	88	38	81,75
17	56	50	88	29	82,64
18	56	50	88	29	82,24
19	56	50	88	29	81,97
20	56	50	88	29	82,75
21	56	50	88	29	83,68

- Análisis de varianza (ANOVA)

La Tabla 4 muestra el análisis de varianza (ANOVA) del modelo cuadrático para flotación de oro residual. Todos los factores fueron significativos ($p < 0.05$), destacando: Dow Froth 250 ($F = 30,427$; $p < 0,001$), xantato amílico de potasio ($F = 60,4331$; $p < 0,001$), porcentaje de sólidos ($F = 16,2395$; $p < 0,01$) y tamaño de partícula ($F = 10,8533$; $p < 0,05$), siendo los reactivos los de mayor impacto. La interacción Dow Froth/Xantato ($F = 6.11$; $p < 0.05$) optimiza la adhesión partícula-burbuja. Solo % sólidos mostró curvatura significativa ($p < 0.05$), indicando óptimo en 25-35 %. El modelo exhibe alta capacidad predictiva ($R^2 = 0.941$; CME = 53.47 explica $< 5\%$ de variabilidad), validándolo para escalamiento industrial.

Tabla 4 Análisis de varianza de flotación de oro aluvial (ANOVA)

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tamaño (um)	1	82,9	82,9	10,8533	0,01132214*
Dow Froth 250	1	232,41	232,41	30,427	0,0008913***
Xantato amílico de potasio	1	461,61	461,61	60,4331	0,0001094***
Porcentaje de sólidos (%)	1	124,04	124,04	16,2395	0,0049969**
I(Tamaño)^2	1	0,04	0,04	0,0058	0,9414979
I(Dow Froth 250)^2	1	1,22	1,22	0,1601	0,7010263
I(Xantato amílico de potasio)^2	1	0,03	0,03	0,0041	0,9507809
I(Porcentaje de sólido)^2	1	62,66	62,66	8,2037	0,0241915*
Tamaño (um):Dow Froth 250	1	1,53	1,53	0,2003	0,6679631
Tamaño (um):Xantato amílico de potasio	1	0,22	0,22	0,0294	0,8687436
Tamaño (um):Porcentaje de sólido (%)	1	0,88	0,88	0,1151	0,7443509
Dow Froth 250: Xantato amílico de potasio	1	46,68	46,68	6,1118	0,0426951*
Dow Froth 250:Porcentaje de sólido (%)	1	10,88	10,88	1,4241	0,2716043
Residuals	7	53,47	7,64		

La Tabla 5 presenta el modelo matemático de optimización de oro residual, desarrollado en RStudio v4.3.2 mediante factores codificados, identificando tres predictores estadísticamente significativos. Destacándose el efecto lineal negativo del xantato amílico de potasio (coeficiente: -8.4038; $p = 0.000356$), indicando un efecto supresor donde cada unidad adicional reduce la recuperación en 8.4038 unidades. Igualmente, relevante, el término cuadrático del porcentaje de sólidos (-1.6991; $p = 0.019093$) revela una relación cóncava en la curva de respuesta, sugiriendo que concentraciones elevadas en la pulpa deterioran la eficiencia por sobre-saturaciones. En tercer

orden jerárquico, la interacción Dow Froth 250-xantato amílico de potasio (6.3913; $p = 0.043$) demuestra sinergia en la adsorción superficial, potenciando significativamente la cinética de recuperación aurífera. Cabe resaltar el intercepto robusto (80.4789; $p < 0.001$), que establece una recuperación teórica base confiable. Contrastantemente, los demás términos - efectos lineales de tamaño de partícula, Dow Froth 250 ($p = 0.050$, marginal), porcentaje de sólidos; términos cuadráticos e interacciones (tamaño:Dow Froth 250) - mostraron irrelevancia estadística ($p > 0.05$), evidenciando su impacto negligible en el proceso metalúrgico bajo el diseño experimental aplicado.

Tabla 5 Modelo de regresión lineal

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
Intercept	80.4789	1.2751	63.117	6.58x10 ⁻¹¹ ***
Tamaño	-2.3772	1.3633	-1.744	0.124713
DF 250	5.8294	2.4663	2.364	0.0500074
Z-6	-8.4038	1.3061	-6.434	0,000356**
Solido	0.8748	1.5315	0.571	0.585736
I(Tamaño)^2	-0,4616	0.5606	-0.823	0.437432

I(DF 250)^2	-0,9664	2.2424	-0.431	0.679453
I(Z 6)^2	-0,4254	0.5606	-0.759	0.472780
I(Solido)^2	-1.6991	0.5606	-3.031	0,019093*
Tamaño:DF 250	1.4425	2.7637	0.522	0.617818
Tamaño:Z 6	-1.1196	1.2615	-0.888	0.404260
Tamaño:Solido	-2.7344	1.6204	-1.687	0.135369
DF 250:Z 6	6.3913	2.5852	2.472	0,042695*
DF 250:Solido	3.8083	3.1913	1.163	0.271604

Finalmente, el modelo matemático para la recuperación de oro aluvial que fue calculado por software RStudio v4.3.2 a partir de los factores codificados es el siguiente:

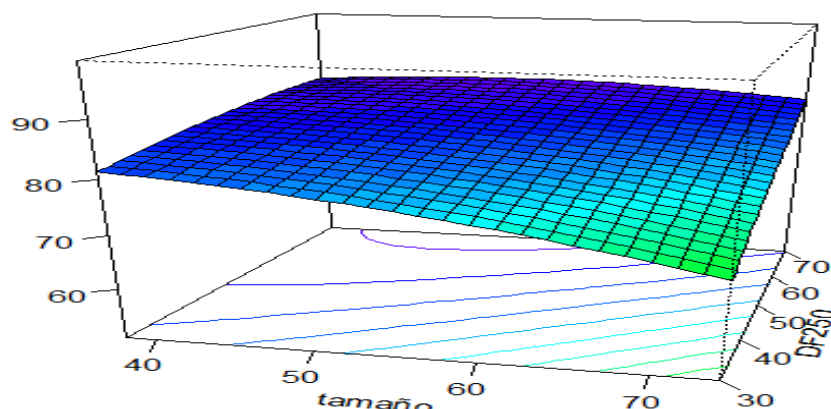
$$Y_{Rec} = 78.43816 - 8.51802 * \text{Tamaño} + 3.43185 * DF250 - 5.09414 * Z - 6 - 11.21975 * \text{Solido} + 0.64912 * \text{Tamaño} * DF250 - 0.48756 * \text{Tamaño} * Z - 3.03819 * \text{Tamaño} * \text{Solido} + 1.25248 * DF250 * Z - 6 + 1.90417 * DF250 * \text{Solido} - 0.4516 * \text{Tamaño}^2 - 0.1957 * DF250^2 - 0.08067 * Z^2 - 2.09766 * \text{Solido}^2$$

- Interacciones de parámetros

En las Figuras 2 a 6 evidenciaron que la recuperación de oro residual por flotación disminuyó al incrementar el porcentaje de sólidos, atribuible a efectos de dilución en la pulpa. Metalúrgicamente, este comportamiento se explica porque la reducción de sólidos incrementó la disponibilidad superficial de reactivos por partícula, favoreciendo la hidrofobicidad selectiva del oro. Optimizaron la reología del sistema (menor viscosidad), facilitando la suspensión de partículas (<75 µm) evitando la sedimentación, transferencia de masa en la interfase líquido-gas, que facilitó la adhesión burbuja-partícula y el transporte de espuma. Sinérgicamente, estos efectos maximizaron la cinética de colección, elevando la eficiencia de recuperación acorde al modelo de García-Zúñiga integrado en la investigación. En la Figura 2, se muestra que la recuperación de oro residual aumenta con la concentración del espumante Dow Froth 250, en el rango de 40 µm y 60 µm (Allan y Woodcock, 2001; Tao, 2005).

Bajo condiciones constantes de xantato amílico de potasio (88 g/t) y porcentaje de sólidos (29 %), se alcanza una recuperación superior al 90 % (Klimpel, 1999; Kenzhaliyev, Koizhanova, et al. 2024). Esta sinergia tamaño-espumante optimiza la adhesión y estabilidad de agregados burbuja-partícula (Teague et al., 1999). Sin embargo, para partículas mayores a 60 µm, se observa una leve disminución en la recuperación (Farrokhpay et al., 2021). Estos resultados confirman que la eficiencia máxima requiere control simultáneo de la dosificación de espumante (50 a 60 g/t), distribución granulométrica (40 a 60 µm) validando la estrategia RSM para optimizar parámetros interdependientes (Ran et al., 2019; Toktar et al., 2023).

Figura 2 Superficie de respuesta 3D que relaciona la recuperación de oro residual con la dosificación de Dow Froth 250 y el tamaño de partícula, manteniendo constantes el xantato amílico de potasio (88 g/t) y el porcentaje de sólidos (29%).



Slice at Xant6 = 88, solido = 29

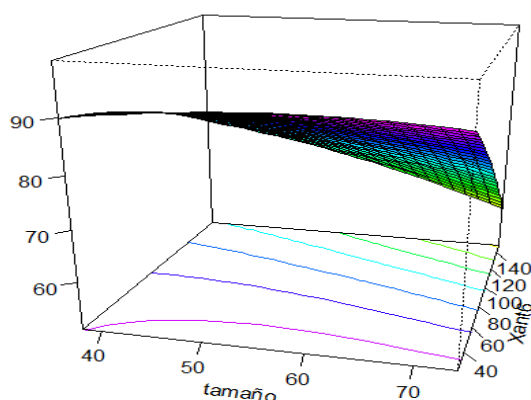
En la Figura 3, bajo dosificación constante del espumante Dow Froth 250 en

(50 g/t) y el porcentaje de sólidos en 29 %, se observa que la recuperación de oro residual

disminuye al incrementar la concentración de xantato amílico de potasio en partículas menores a $60\ \mu\text{m}$ (Agorhom et al., 2015; McGrath et al., 2013). Esta tendencia confirma que una sobredosificación del colector mayor a $80\ \text{g/t}$ reduce drásticamente la recuperación por formación de capas hidrofóbicas excesivas que perjudican la adhesión partícula-burbuja (Agorhom et al., 2015; Monte et al., 1997). Asimismo, el incremento en el tamaño de

partícula mayor a $60\ \mu\text{m}$ presentan menor área superficial específica y mayor masa inercial, dificultando su captura por burbujas (Tao, 2005; Moreno & Ata, 2016). La interacción negativa tamaño-xantato subraya que optimizar la flotación requiere del control estricto de dosificación de colector ($<60\ \text{g/t}$ óptimo) y la preclasificación granulométrica ($<60\ \mu\text{m}$) que valida el modelado RSM para manejar efectos antagonistas (Klimpel, 1999; Ran et al., 2019).

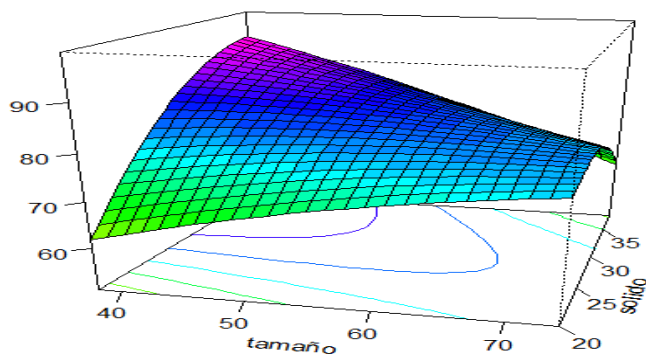
Figura 3 Superficie de respuesta 3D que relaciona la recuperación de oro residual con la dosificación de xantato amílico de potasio y el tamaño de partícula, manteniendo constantes Dow Froath ($50\ \text{g/t}$) y el porcentaje de sólidos (29%).



Slice at DF250 = 50, solido = 29

La Figura 4, muestra que, con dosificaciones constantes de Dow Froth 250 ($50\ \text{g/t}$) y de xantato amílico de potasio ($88\ \text{g/t}$), la recuperación de oro residual disminuye al incrementar el porcentaje de sólidos, especialmente en partículas mayores a $60\ \mu\text{m}$ (Allan & Woodcock, 2001; Norori-McCormac et al. 2017). Este comportamiento se explica por el aumento de viscosidad de la pulpa que reduce la movilidad del partícula y limita la frecuencia de las colisiones burbuja-partícula (Allan & Woodcock, 2001; Norori-McCormac et al. 2017). Sin embargo, se identifica una zona

óptima operativa con tamaño de partícula entre $50\ \mu\text{m}$ – $60\ \mu\text{m}$ y porcentajes de sólidos entre 27% a 30% , donde la recuperación de oro residual alcanza valores máximos superiores al 90% (Klimpel, 1999; Allan & Woodcock, 2001). Estos resultados validan el modelado mediante superficie de respuesta (RSM) para optimizar parámetros interdependientes en sistemas complejos de flotación (Ran et al. 2019; Toktar et al. 2023).



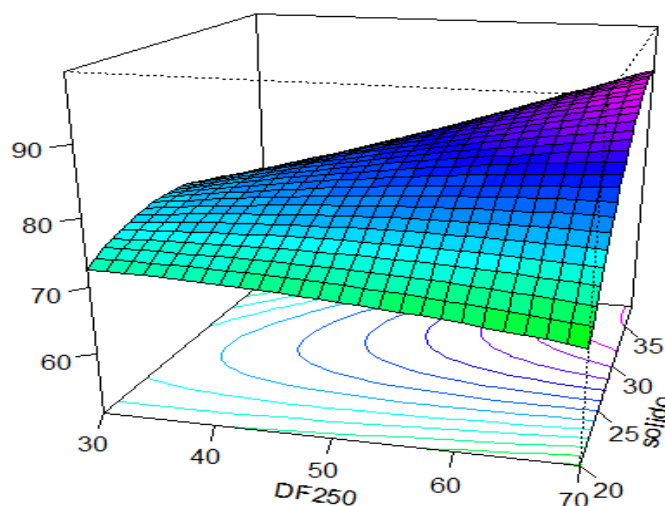
Slice at DF250 = 50, Xant6 = 88

Figura 4 Superficie de respuesta 3D que relaciona la recuperación de oro residual con el tamaño de partícula y el porcentaje de sólidos, manteniendo constantes Dow Froath (50 g/t) y xantato amilico de potasio (88 g/t)).

La Figura 5 demuestra que, con tamaño de partícula constante (56 μm) y xantato amilico de potasio (88 g/t), la recuperación de oro residual aumenta con mayores dosis de Dow Froth 250 y porcentaje de sólidos dentro de los rangos evaluados (Teague et al., 1999; Allan y Woodcock, 2001; Farrokhpay et al., 2021; Norori-McCormac et al. 2017). Se evidencia una sinergia crítica mediante la cual el espumante favorece la formación-estabilidad de burbujas, y

los sólidos moderados ($\leq 35\%$) facilitan el transporte de partícula de oro residual, coadyuvando a la maximización de la recuperación de oro residual en sistemas de flotación optimizados (Klimpel, 1999; Kenzhaliyev, Mukhanova, et al. 2024). Se identifica una zona de máxima eficiencia con recuperaciones superiores al 90%, alcanzada mediante dosificación de Dow Froath 250 entre 60-70 g/t y porcentaje de sólidos en el rango 33-35%, validando la capacidad del modelado mediante superficie de respuesta (RSM) para controlar efectos interactivos complejos en la flotación de relaves auríferos (Allan & Woodcock, 2001; Forrest et al. 2001).

Figura 5 Superficie de respuesta 3D que relaciona la recuperación de oro residual con el Dow Froath 250 y el porcentaje de sólidos, manteniendo constantes tamaño de partícula (56 μm) y xantato amilico de potasio (88 g/t)).

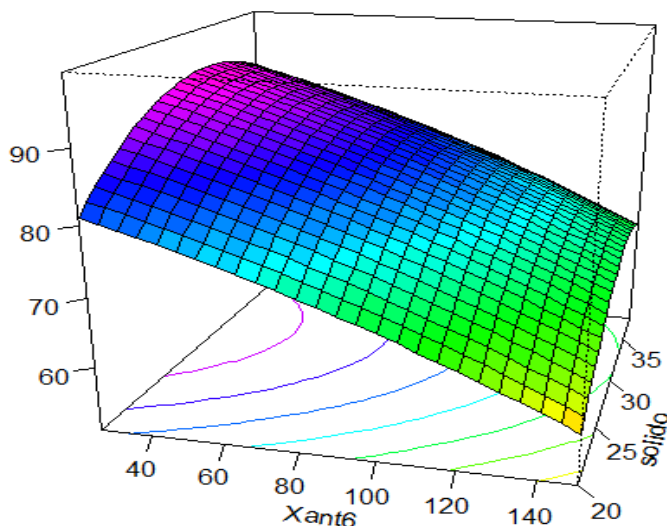


Slice at tamaño = 56, Xant6 = 88

La Figura 6 evidencia que, con tamaño de partícula (56 μm) y Dow Froth 250 (50 g/t) constantes, la recuperación de oro residual disminuye al incrementar simultáneamente % sólidos y xantato amilico de potasio (Agorhom et al., 2015; Monte et al., 1997; Allan y Woodcock, 2001). Este efecto sinérgico negativo se atribuye a la sobresaturación superficial por exceso de colector, combinada con el aumento de viscosidad en pulpa concentrada y la formación de agregados inestables, factores que reducen drásticamente la probabilidad de colisiones efectivas burbuja-partícula al deteriorar la

movilidad del sistema y la estabilidad de la interfase mineral-reactivo (Agorhom et al. 2015; Monte et al. 1997; Allan y Woodcock, 2001). En contraste, la combinación de xantato (60-80 g/t) y sólidos (27-30%) delimita una zona óptima de desempeño donde la recuperación alcanza valores máximos ($>85\%$), evidenciando que la optimización mediante RSM de estas variables interdependientes es fundamental para maximizar la eficiencia en el tratamiento metalúrgico de relaves auríferos (Klimpel, 1999; McGrath et al., 2013).

Figura 6 Superficie de respuesta 3D que relaciona la recuperación de oro residual con el porcentaje de sólidos y xantato amílico de potasio, manteniendo constantes tamaño de partícula (56 μm) y Dow Froath (50 g/t).



Slice at tamaño = 56, DF250 = 50

- Optimización de las condiciones de flotación

La Tabla 6 presenta los parámetros óptimos para la flotación de oro residual (38-74 μm) proveniente de relaves de mesa gravimétrica, alcanzándose una recuperación máxima de 95.75% sin requerir molienda adicional. Este resultado valida la eficiencia del proceso para capturar partículas auríferas finas en su granulometría natural (P80 = 56 μm),

Tabla 6 Condiciones de optimización y resultados relevantes

Respuesta	Objetivo	Tamaño (μm)	Dow Froath 250 (g/t)	Xantato amílico de potasio (g/t)	Porcentaje de sólido (%)	Recuperación (%)
Recuperación	Máximo	56	50	88	31	95.75

- CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

Para la contrastación de la hipótesis, se empleó un Diseño Central Compuesto (CCD), adecuado para evaluar las interacciones y efectos cuadráticos de los cuatro factores sobre la recuperación de oro residual. Este diseño incluyó 8 tratamientos factoriales, 8 puntos axiales (estrella) y 5 puntos centrales, que permitió ajustar el modelo de superficie de respuesta (RSM). El análisis estadístico se llevó mediante el software RStudio v4.3.2, mediante el análisis

confirmando la liberación incompleta durante la concentración gravimétrica previa. Las condiciones óptimas corresponden a una dosificación de Dow Froth 250 de 50 g/t, xantato amílico de potasio de 88 g/t y un porcentaje de sólidos del 31%, parámetros que demuestran la efectividad del modelado de regresión lineal para maximizar la recuperación oro residual de relaves gravimétricos.

de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$) se determinó la significancia de efectos y validó la capacidad predictiva del modelo.

Las hipótesis planteadas fueron las siguientes:

H₀: La flotación de relaves de mesa gravimétrica no incrementa significativamente la recuperación de oro aluvial en la Unidad Minera Paolita II.

($p > 0.05$)

H₁: La flotación de relaves de mesa gravimétrica sí incrementa significativamente la recuperación de oro aluvial en la Unidad Minera Paolita II.

($p \leq 0.05$)

Se llevó a cabo un análisis estadístico mediante el Análisis de Varianza (ANOVA), a través del software estadístico RStudio v4.3.2 evaluó la significancia de efectos individuales e interacciones sobre la recuperación de oro residual proveniente de relaves de mesa gravimétrica, validando el modelo de superficie de respuesta para optimización.

Los resultados de la tabla ANOVA indican lo siguiente:

- Tamaño (μm): $p = 0.0113$ (significativo)
- Dow Froath 250: $p = 0.000891$ (significativo)
- Xantato amílico de potasio: $p = 0.000109$ (significativo)
- Porcentaje de sólido (%): $p = 0.004969$ (significativo)
- (Sólido)²: $p = 0.0242$ (significativo)
- **Interacción de dos factores:**
- Dow Froath 250 : Xantato amílico de potasio: $p = 0.0427$ (significativo)

El análisis identificó una interacción significativa entre Dow Froth 250 y xantato amílico de potasio ($p < 0.05$), revelando un efecto co-dependiente donde la eficacia de cada reactivo está condicionada por el nivel del otro.

La hipótesis nula (H₀) establece que los factores Tamaño (μm), Dow Froath 250, Xantato amílico de potasio y porcentaje de sólido (%), así como sus interacciones y efectos cuadráticos, no tienen un efecto significativo sobre la recuperación de oro aluvial por flotación. Esta hipótesis se rechaza si el valor-p ($\text{Pr}(>F)$) asociado a un factor o interacción es menor o igual a 0.05 ($\alpha = 5\%$).

Por tanto, se acepta la hipótesis alterna (H₁), confirmando que los factores evaluados y sus interacciones contribuyen significativamente al proceso de recuperación de oro aluvial a partir de relave de mesa gravimétrica mediante flotación.

b) Discusión

i) Tamaño de partícula (μm)

La flotabilidad diferencial del oro aluvial no depende únicamente del tamaño de partícula que, según Allan & Woodcock, (2001), se sitúa óptimamente entre 38 y 75 μm , sino también de los efectos hidrodinámicos que influyen en la adhesión de las partículas a las burbujas de aire. La recuperación eficiente de oro residual está condicionada por su distribución granulométrica, particularmente en el rango de 40-60 μm . En este espectro, las partículas finas (<50 μm) alcanzan

altas tasas de recuperación debido a su masa reducida que facilita una adhesión estable a las burbujas (Tao, 2005), minimizando las fuerzas de desprendimiento y maximizando el tiempo de residencia en la espuma. En contraste, las partículas mayores a 150 μm experimentan una flotabilidad reducida, ya que su elevada inercia incrementa las fuerzas de desprendimiento, dificultando su permanencia en la espuma (Moreno y Ata, 2016). El intervalo entre 40 y 60 μm representa un punto óptimo de recuperación, como se evidencia en la Figura 2, donde se alcanza un equilibrio favorable entre la energía cinética de colisión, las fuerzas de adhesión y la estabilidad del agregado partícula-burbuja (Farrokhpay et al., 2021). Además del tamaño, otros factores críticos como la morfológicos y mineralógicos de las partículas como esfericidad, rugosidad y grado de liberación explican desviaciones de modelos teóricos (Özçelik & Ekmekçi, 2024).

En el caso de partículas de oro asociadas a óxidos de hierro, con tamaños superiores a 60 μm , requiere intensificar la agitación por encima de 500 rpm para compensar su mayor inercia y asegurar colisiones efectivas con las burbujas de aire (Norori-McCormac et al. 2017).

ii) Dow Froath 250

El Dow Froth 250 (DF250) espumante alcohol poliglicólico optimiza la flotación de oro residual reduciendo la tensión superficial agua/aire en 40 % a 60 %, generando burbujas (0.5-2 mm) que mejoraron la captura de finos (<50 μm) (Farrokhpay et al., 2021). Su mecanismo no solo estabiliza la espuma mediante control reológico (viscosidad/elasticidad), sino que también aumenta la cinética de adhesión partícula-burbuja en oro fino (<50 μm) (Jera et al., 2021). Como demuestra Teague et al. (1999), su efectividad máxima se logra en rangos de 25-40 g/t, coincidiendo con observaciones de Allan & Woodcock, (2001) para sistemas auríferos.

iii) Xantato amílico de potasio (g/t)

El xantato amílico de potasio destaca como colector para oro residual (38-75 μm) por su cadena pentacarbonada (C5), que genera mayor hidrofobicidad superficial vs. xantatos cortos (C2-C4) según (McGrath et al., 2013). Su mecanismo de adsorción implica quimisorción de grupos tiol (-SH) sobre superficies metálicas, formando películas de dixantógeno que incrementan el ángulo de contacto a >85° (Kenzhaliyev, et al., 2024). Como demuestran (Monte et al. 1997), dosificaciones >100 g/t de

xantato amílico de potasio provocan la saturación de sitios activos, formación de multicapas desordenadas, y pérdidas de hasta 20% en recuperación de oro residual.

iv) Porcentaje de sólidos (%)

La densidad de pulpa (25 - 35% sólidos) determina la viscosidad del medio y la cinética de adhesión partícula-burbuja. Mientras valores $\leq 35\%$ optimizan movilidad de burbujas y reducen arrastre de ganga (Allan y Woodcock, 2001), concentraciones $>35\%$ incrementan viscosidad limitando colisiones eficaces en partículas $>75 \mu\text{m}$ (Norori-McCormac et al. (2017). Adicionalmente, que valores superiores al 35% de sólidos incrementan la viscosidad, limitando colisiones eficaces en partículas auríferas $>75 \mu\text{m}$, lo cual deteriora la calidad del concentrado (Monte et al. 1997). Por ello, el control riguroso de este parámetro junto con la dosificación óptima de reactivos resulta esencial para maximizar la recuperación de oro fino ($<75 \mu\text{m}$) en relaves gravimétricos (Klimpel, 1999).

CONCLUSIONES

La optimización mediante RSM maximizó la recuperación de oro residual de

95.75% en relaves gravimétricos de Madre de Dios, superando a métodos tradicionales para partículas $<75 \mu\text{m}$. Mediante DCC (21 experimentos), se identificaron parámetros clave: tamaño de partícula ($56 \mu\text{m}$), dosificación de espumante Dow Froath 250 50 g/t, xantato amílico de potasio 88 g/t y porcentaje de sólidos. El modelo cuadrático ($R^2=0.941$) reveló sinergias críticas (sobredosificación de xantato reduce recuperación en 8.4%). La cinética de García-Zúñiga ($R^2=0.9976$) confirmó 80% de recuperación en 5-12 min. La tecnología actualmente aplicada en la MAPE garantiza un proceso escalable, libre de mercurio y sostenible para la revalorización de pasivos mineros.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su profundo agradecimiento al Laboratorio de Procesamiento de Minerales de la Universidad Nacional de Altiplano por facilitar las instalaciones y equipos para la etapa experimental.

CONFLICTO DE INTERES

No existe conflicto de interés por el autor y autores.

REFERENCIAS

- Agorhom, E. A., Skinner, W., & Zanin, M. (2013). Influence of gold mineralogy on its flotation recovery in a porphyry copper-gold ore. *Chemical Engineering Science*, 99, 127–138.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.05.037>
- Agorhom, E. A., Skinner, W., & Zanin, M. (2015). Post-regrind selective depression of pyrite in pyritic copper-gold flotation using aeration and diethylenetriamine. *Minerals Engineering*, 72, 36–46.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.11.019>
- Aksoy, B. S., & Yazar, B. (1989). Natural hydrophobicity of native gold flakes and their flotation under different conditions. In *Processing of Complex Ores* (pp. 19–27). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-037283-9.50007-x>
- Albajan, B., Ozdemir, O., Nguyen, A. V., & Bradshaw, D. (2010). A review of induction and attachment times of wetting thin films between air bubbles and particles and its relevance in the separation of particles by flotation. In *Advances in Colloid and Interface Science* (Vol. 159, Issue 1, pp. 1–21).
<https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.04.003>
- Alekseev, V. S., & Banskchikova, T. S. (2018). Rebellious Gold Extraction from Gravity Concentrates and Placer Tailings by Chemical Reagents. *Journal of Mining Science*, 53(4), 756–761.
<https://doi.org/10.1134/S1062739117042741>
- Allan, G. C., & Woodcock, J. T. (2001a). A REVIEW OF THE FLOTATION OF NATIVE GOLD AND ELECTRUM. In *Minerals Engineering* (Vol. 14, Issue 9).
[https://doi.org/10.1016/0892-6875\(01\)00103-0](https://doi.org/10.1016/0892-6875(01)00103-0)
- Allan, G. C., & Woodcock, J. T. (2001b). A REVIEW OF THE FLOTATION OF NATIVE GOLD AND ELECTRUM. In *Minerals Engineering* (Vol. 14, Issue 9).
- Bai, X., Wen, S., Liu, J., & Lin, Y. (2018). Response surface methodology for optimization of copper leaching from refractory flotation

- tailings. *Minerals*, 8(4).
<https://doi.org/10.3390/min8040165>
- Farrokhpay, S., Filippov, L., & Fornasiero, D. (2021a). Flotation of Fine Particles: A Review. In *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* (Vol. 42, Issue 7, pp. 473–483). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1793140>
- Farrokhpay, S., Filippov, L., & Fornasiero, D. (2021b). Flotation of Fine Particles: A Review. In *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* (Vol. 42, Issue 7, pp. 473–483). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1793140>
- Fornasiero, D., & Filippov, L. O. (2017). Innovations in the flotation of fine and coarse particles. *Journal of Physics: Conference Series*, 879(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/879/1/012002>
- Forrest ~, K., Yan, D., & Dunne, R. (2001). OPTIMISATION OF GOLD RECOVERY BY SELECTIVE GOLD FLOTATION FOR COPPER-GOLD-PYRITE ORES. In *Minerals Engineering* (Vol. 14, Issue 2).
- Forrest, K., Yan, D., & Dunne, R. (2001). Optimization of gold recovery by selective gold flotation for copper-gold-pyrite ores. *Minerals Engineering*, 14(2), 227–241. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00178-3](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00178-3)
- Humberto Garcia-Zuñiga. (1935). RE0000542_0164. *Boletín minero de la sociedad nacional de minería*, XLVII.
- Jera, T. M., Bhondayi, C., Mcfadzean, B., & Hadler, K. (2021). minerals A Review of Flotation Physical Froth Flow Modifiers. *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min1108>
- Junge, M., Goldmann, S., & Wotruba, H. (2023). Mineralogy and mineral chemistry of detrital platinum-group minerals and gold particles from the Elbe, Germany. *European Journal of Mineralogy*, 35(4), 439–459. <https://doi.org/10.5194/ejm-35-439-2023>
- Kenzhaliyev, B., Koizhanova, A., Surkova, T., Fischer, D., Azlan, M. N., Atanova, O., Magomedov, D., Yerdenova, M., & Abdyldayev, N. (2024a). Extraction of gold from gravity-flotation concentrates via surfactant and oxidation reagents. *Discover Applied Sciences*, 6(11). <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06281-7>
- Kenzhaliyev, B., Koizhanova, A., Surkova, T., Fischer, D., Azlan, M. N., Atanova, O., Magomedov, D., Yerdenova, M., & Abdyldayev, N. (2024b). Extraction of gold from gravity-flotation concentrates via surfactant and oxidation reagents. *Discover Applied Sciences*, 6(11). <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06281-7>
- Kenzhaliyev, B., Mukhanova, A., Surkova, T., Turysbekov, D., Kaldybayeva, Z., Amanzholova, L., & Baltabekova, Z. (2024a). Investigation of the possibility of using sulfur-containing oil products as flotation reagents components. *Canadian Metallurgical Quarterly*. <https://doi.org/10.1080/00084433.2024.2423962>
- Kenzhaliyev, B., Mukhanova, A., Surkova, T., Turysbekov, D., Kaldybayeva, Z., Amanzholova, L., & Baltabekova, Z. (2024b). Investigation of the possibility of using sulfur-containing oil products as flotation reagents components. *Canadian Metallurgical Quarterly*. <https://doi.org/10.1080/00084433.2024.2423962>
- Klimpel, R. R. (1999a). *Industrial experiences in the evaluation of various flotation reagent schemes for the recovery of gold*. <https://doi.org/10.1007/BF03402850>
- Klimpel, R. R. (1999b). *Industrial experiences in the evaluation of various flotation reagent schemes for the recovery of gold*.

- Kowalczyk, P. B., Sahbaz, O., & Drzymala, J. (2011). Maximum size of floating particles in different flotation cells. *Minerals Engineering*, 24(8), 766–771. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.01.007>
- Liang, Z., Wang, J., Sun, W., Ye, G., Jiang, J., & Han, X. (2024). Research on the progress of particle-bubble transport. *Journal of Physics: Conference Series*, 2791(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2791/1/012005>
- Marcin, K. (2023). Chemical and mineralogical characteristics and origin of placer gold from fluvial deposits of Zelisowski Creek (North Sudetic Basin, SW Poland). *Geological Quarterly*, 67(2). <https://doi.org/10.7306/gq.1682>
- Mathioudakis, S., Xiroudakis, G., Petrakis, E., & Manoutsoglou, E. (2023). Alluvial Gold Mining Technologies from Ancient Times to the Present. In *Mining* (Vol. 3, Issue 4, pp. 618–644). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/mining3040034>
- McGrath, T. D. H., Staunton, W. P., & Eksteen, J. J. (2013a). Development of a laboratory test to characterise the behaviour of free gold for use in a combined flash flotation and gravity. *Minerals Engineering*, 53, 276–285. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.08.004>
- McGrath, T. D. H., Staunton, W. P., & Eksteen, J. J. (2013b). Development of a laboratory test to characterise the behaviour of free gold for use in a combined flash flotation and gravity. *Minerals Engineering*, 53, 276–285. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.08.004>
- Miettinen, T., Ralston, J., & Fornasiero, D. (2010). The limits of fine particle flotation. *Minerals Engineering*, 23(5), 420–437. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.12.006>
- Monte, M. B. M., Lins, F. F., & Oliveira, J. F. (1997a). IHIF, IRnITIOIHL JOIHIL OF HIH;RHL PRO(ESSIHG Selective flotation of gold from pyrite under oxidizing conditions. In *Int. J. Miner. Process* (Vol. 51).
- Monte, M. B. M., Lins, F. F., & Oliveira, J. F. (1997b). Selective flotation of gold from pyrite under oxidizing conditions. In *Int. J. Miner. Process* (Vol. 51). [https://doi.org/51\(1997\)255-267](https://doi.org/51(1997)255-267)
- Moreno, Y. S., & Ata, S. (2016a). On the detachment of hydrophobic particles from the froth phase. *Minerals Engineering*, 95, 113–115. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.06.016>
- Moreno, Y. S., & Ata, S. (2016b). On the detachment of hydrophobic particles from the froth phase. *Minerals Engineering*, 95, 113–115. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.06.016>
- Mulleneers, H. A. E., Koopal, L. K., Bruning, H., & Rulkens, W. H. (2002). Selective separation of fine particles by a new flotation approach. *Separation Science and Technology*, 37(9), 2097–2112. <https://doi.org/10.1081/SS-120003503>
- Nesterenko, G. V., & Kolpakov, V. V. (2007). Fine gold particles and gold dust in alluvial autochthonous placers in southern West Siberia. *Russian Geology and Geophysics*, 48(10), 783–798. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.01.004>
- Nikiforova, Z. S., Gerasimov, B. B., Glushkova, E. G., & Kazhenkina, A. G. (2018). *Indicative features of placer gold for the prediction of the formation types of gold deposits (east of the Siberian Platform)*. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.201>
- Norori-McCormac, A., Brito-Parada, P. R., Hadler, K., Cole, K., & Cilliers, J. J. (2017a). The effect of particle size distribution on froth stability in flotation. *Separation and*

- Purification Technology*, 184, 240–247.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.04.022>
- Norori-McCormac, A., Brito-Parada, P. R., Hadler, K., Cole, K., & Cilliers, J. J. (2017b). The effect of particle size distribution on froth stability in flotation. *Separation and Purification Technology*, 184, 240–247.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.04.022>
- Özçelik, S., & Ekmekçi, Z. (2024a). Surface Chemistry and Flotation of Gold-Bearing Pyrite. *Minerals*, 14(9), 914.
<https://doi.org/10.3390/min14090914>
- Özçelik, S., & Ekmekçi, Z. (2024b). Surface Chemistry and Flotation of Gold-Bearing Pyrite. *Minerals*, 14(9), 914.
<https://doi.org/10.3390/min14090914>
- Peukert, W., & Wadenpohl, C. (2001). Industrial separation of fine particles with difficult dust properties. In *Powder Technology* (Vol. 118). <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.045>
- Ran, J. cheng, Qiu, X. yang, Hu, Z., Liu, Q. jun, Song, B. xu, & Yao, Y. qing. (2019). Effects of particle size on flotation performance in the separation of copper, gold and lead. *Powder Technology*, 344, 654–664.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.045>
- Tao, D. (2005a). Role of Bubble Size in Flotation of Coarse and Fine Particles - A Review. In *Separation Science and Technology* (Vol. 39, Issue 4, pp. 741–760). Marcel Dekker Inc. <https://doi.org/10.1081/ss-120028444>
- Tao, D. (2005b). Role of Bubble Size in Flotation of Coarse and Fine Particles - A Review. In *Separation Science and Technology* (Vol. 39, Issue 4, pp. 741–760). Marcel Dekker Inc. <https://doi.org/10.1081/ss-120028444>
- Teague ~, A. J., Van Deventer, J. S. J., & Swaminathan ~, C. (1999). A CONCEPTUAL MODEL FOR GOLD FLOTATION. In *Minerals Engineering* (Vol. 12, Issue 9). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.04.022>
- Teague, A. J., Van Deventer, J. S. J., & Swaminathan, C. (1999). A CONCEPTUAL MODEL FOR GOLD FLOTATION. In *Minerals Engineering* (Vol. 12, Issue 9). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.04.022>
- Toktar, G., Bakrayeva, A., Abdyldayev, N., Banks, G. E., & Kubaizhanov, A. (2023a). Increase in the Free Finely-Dispersed Gold Recovery in the Flotation Cycle. *Journal of Ecological Engineering*, 24(1), 115–119.
<https://doi.org/10.12911/22998993/156002>
- Toktar, G., Bakrayeva, A., Abdyldayev, N., Banks, G. E., & Kubaizhanov, A. (2023b). Increase in the Free Finely-Dispersed Gold Recovery in the Flotation Cycle. *Journal of Ecological Engineering*, 24(1), 115–119.
<https://doi.org/10.12911/22998993/156002>
- Wang, D., & Liu, Q. (2021). Hydrodynamics of froth flotation and its effects on fine and ultrafine mineral particle flotation: A literature review. In *Minerals Engineering* (Vol. 173). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107220>