

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL COMPORTAMIENTO QUÍMICO DE LA DEGRADABILIDAD DE LIXIVIANTES GDA Y GOLDMAX FRENTE A OXIGENACIÓN Y VARIACIONES DE PH: IMPLICACIONES PARA PROCESOS SOSTENIBLES DE EXTRACCIÓN DE ORO

STATISTICAL ANALYSIS OF THE CHEMICAL BEHAVIOR OF THE DEGRADABILITY OF GDA AND GOLDMAX LIXIVIANTS UNDER OXYGENATION AND PH VARIATIONS: IMPLICATIONS FOR SUSTAINABLE GOLD EXTRACTION PROCESSES

Carlos Santiago Curay Yaulema¹, Alex Rolando Moyota Paguay², Carmen Natalia Lindao Rosero³, Luis Patricio Tierra Perez⁴

{carlos.curay@esPOCH.edu.ec¹, rolando.moyota@esPOCH.edu.ec², carmen.lindao@esPOCH.edu.ec³, patricio.tierra@esPOCH.edu.ec⁴}

Fecha de recepción: 14/05/2026 / Fecha de aceptación: 17/06/2026 / Fecha de publicación: 08/07/2026

RESUMEN: El uso de cianuro en la minería aurífera genera graves problemas ambientales, lo que ha impulsado la búsqueda de lixiviantes alternativos biodegradables. Este estudio es de carácter experimental con enfoque cuantitativo en donde se evalúa comparativamente la degradabilidad de dos lixiviantes comerciales, GDA y GOLDMAX, bajo condiciones controladas de oxigenación y variaciones de pH (ácido cítrico 0.3 y 0.8 g/350mL; NaOH 0.3 y 0.8 g/350mL) durante 1, 3 y 6 semanas. Se midieron pH, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), conductividad, sólidos totales disueltos (STD) y oxígeno disuelto (OD). Mediante un diseño completamente aleatorizado con triple repetición, se aplicó ANOVA de dos vías, prueba post-hoc de Tukey y un Índice de Impacto Ambiental (IIA) estandarizado. Los resultados muestran que GDA en medio ácido con dosis baja (GDA H⁺ 0.3) presenta la menor DQO residual (162 mg/L), DBO5 (229.7 mg/L), conductividad (3.52 mS/cm) y el menor IIA (0.975), cumpliendo con la normativa ecuatoriana TULSMA (pH 6–9, DQO 250 mg/L). GOLDMAX mostró DQO persistentemente alta (400 mg/L) sin tendencia decreciente significativa. El control

¹Carrera de Ingeniería en Minas, Laboratorio de Química. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo – Ecuador. <https://orcid.org/0009-0005-0946-5298>; +593995272493.

²Carrera de Ingeniería Ambiental, Laboratorio de Química. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo – Ecuador. <https://orcid.org/0009-0008-4864-7643>; +593 99 742 7081.

³Carrera de Ingeniería en Minas, Laboratorio de Química. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo – Ecuador. <https://orcid.org/0009-0009-6303-6565>; +593994706420.

⁴Carrera de Ingeniería en Minas, Laboratorio de Química. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo – Ecuador. <https://orcid.org/0000-0003-3366-7867>; +593958645163.

preciso de la dosificación es crítico: dosis de 0.8 g generan pH extremos (5 o 9.5). Se concluye que GDA con ajuste ácido controlado constituye la alternativa más sostenible para la minería aurífera responsable.

Palabras clave: *Degradabilidad, GDA, GOLDMAX, lixiviantes verdes, oxigenación, pH, minería sostenible*

ABSTRACT: The use of cyanide in gold mining generates severe environmental problems, which has driven the search for biodegradable alternative lixiviants. This study comparatively evaluates the degradability of two commercial lixiviants, GDA and GOLDMAX, under controlled oxygenation and pH variations (citric acid 0.3 and 0.8 g/350 mL; NaOH 0.3 and 0.8 g/350 mL) over 1, 3, and 6 weeks. Parameters measured included pH, chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD5), conductivity, total dissolved solids (TDS), and dissolved oxygen (DO). A completely randomized design with triple replication was applied, using two-way ANOVA, Tukey's post-hoc test, and a standardized Environmental Impact Index (EII). Results show that GDA in acidic medium at low dosage (GDA H+ 0.3) exhibited the lowest residual COD (162 mg/L), BOD5 (229.7 mg/L), conductivity (3.52 mS/cm), and EII (0.975), meeting Ecuadorian TULSMA standards (pH 6–9, COD ≤250 mg/L). In contrast, GOLDMAX maintained persistently high COD (>400 mg/L) without significant decreasing trends. Precise dosage control proved critical, as 0.8 g treatments produced extreme pH values (<5 or >9.5). It is concluded that GDA with controlled acidic adjustment represents the most sustainable alternative for responsible gold mining.

Keywords: *Degradability, GDA, GOLDMAX, green lixiviants, oxygenation, pH, sustainable mining*

INTRODUCCIÓN

La extracción de oro mediante cianuración representa una de las principales fuentes de contaminación por metales pesados y compuestos tóxicos en ecosistemas acuáticos (1)(2). En respuesta, han surgido los denominados lixiviantes verdes: formulaciones biodegradables basadas en tiourea, tiosulfato, glicina, ácidos orgánicos o compuestos nitrogenados que reducen la toxicidad y facilitan el tratamiento de efluentes (3). La degradación de compuestos orgánicos como GDA y GOLDMAX está gobernada por procesos de oxidación e hidrólisis. En medios ácidos, la protonación de grupos funcionales favorece la ruptura de enlaces y la formación de especies más simples, mientras que en medios básicos la desprotonación puede estabilizar complejos recalcitrantes. La presencia de oxígeno disuelto acelera las reacciones de oxidación, promoviendo la mineralización de la materia orgánica. Estos mecanismos explican por qué la fluctuación de pH influye directamente en la estabilidad y degradabilidad de los lixiviantes.

El GDA y GOLDMAX son dos productos comerciales prometedores, pero su comportamiento químico frente a la oxigenación y las variaciones de pH aún no ha sido caracterizado estadísticamente. La estabilidad y degradabilidad de un lixiviante dependen críticamente del pH

y de la disponibilidad de oxígeno, las cuales afectan la cinética de oxidación y la formación de subproductos(4). Estudios recientes han evaluado alternativas como el ácido metanosulfónico para tierras raras, el glutamato monosódico para zinc (5) o la tiourea para oro (6). Sin embargo, pocos trabajos han aplicado métodos estadísticos robustos para comparar la evolución temporal de parámetros de calidad de agua entre lixiviantes comerciales bajo condiciones controladas de oxigenación. El objetivo de este estudio es: (i) comparar la degradabilidad química de GDA y GOLDMAX en medios ácido (ácido cítrico) y básico (NaOH) con dos dosificaciones (0.3 y 0.8 g/350mL) durante 6 semanas; (ii) aplicar un ANOVA de dos vías y pruebas post-hoc para identificar diferencias significativas en DQO; y (iii) proponer un Índice de Impacto Ambiental (IIA) que integre múltiples parámetros, con el fin de determinar el tratamiento óptimo bajo la normativa TULSMA (Ecuador) (17).

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras y reactivos

Se utilizaron soluciones residuales de lixiviación aurífera proporcionadas por una planta piloto, conteniendo GDA y GOLDMAX (concentraciones iniciales según especificaciones del fabricante). El ácido cítrico ($C_6H_8O_7$) y el hidróxido de sodio (NaOH) fueron de grado analítico (Sigma- Aldrich).

Diseño experimental

Se empleó un diseño completamente aleatorizado con 8 tratamientos resultantes de la combinación de: lixivante (GDA, GOLDMAX), tipo de ajuste (ácido H^+ con ácido cítrico, básico OH^- con NaOH) y dosis (0.3 g, 0.8 g por 350 mL). Cada tratamiento se realizó por triplicado ($n=3$), totalizando 24 unidades experimentales. Se mantuvo aireación constante (oxigenador de laboratorio, caudal 0.5 L/min). Las mediciones se realizaron a las 1, 3 y 6 semanas.

Parámetros analíticos

Se determinaron: pH (electrodo combinado), DQO (método de dicromato, digestión a $150^\circ C$, espectrofotometría), DBO5 (método manométrico OxiTop®), conductividad (conductímetro), STD (gravimetría) y OD (oxímetro). Todos los métodos siguieron APHA-AWWA-WEF.

Análisis estadístico

Los datos se procesaron con R (v4.3). Se aplicó:

- ANOVA de dos vías (factores: lixivante, tipo de ajuste, interacción) para DQO en semana 6.
- Prueba post-hoc de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$).
- Índice de Impacto Ambiental (IIA) estandarizado:

$$IIA = \frac{DQO - \min(DQO)}{\max DQO - \min DQO} + \frac{DBO - \min(DBO)}{\max (DBO) - \min(DBO)} + \frac{Cond - \min(Cond)}{\max Cond - \min Cond} + \frac{STD - \min STD}{\max STD - \min STD} + \delta pH$$

En donde δpH 0,5 si el pH está fuera del rango 6,9 (norma TULSMA), y 0 en caso contrario.

RESULTADOS

Comportamiento del pH

La Figura 1 (diagrama de cajas) muestra que únicamente cuatro tratamientos mantuvieron el pH dentro del intervalo 6.9 en todas las semanas: GDA H^+ 0.3, GDA $(OH)^-$ 0.3, GOLDMAX $(OH)^-$ 0.3 y GOLDMAX $(OH)^-$ 0.8. Las dosis altas (0.8 g) en medio ácido produjeron pH 5, mientras que en medio básico superaron 9.5. La prueba de Kruskal- Wallis confirmó diferencias significativas entre tratamientos ($\chi^2 = 52.3$; gl = 7, $p = 0.001$).

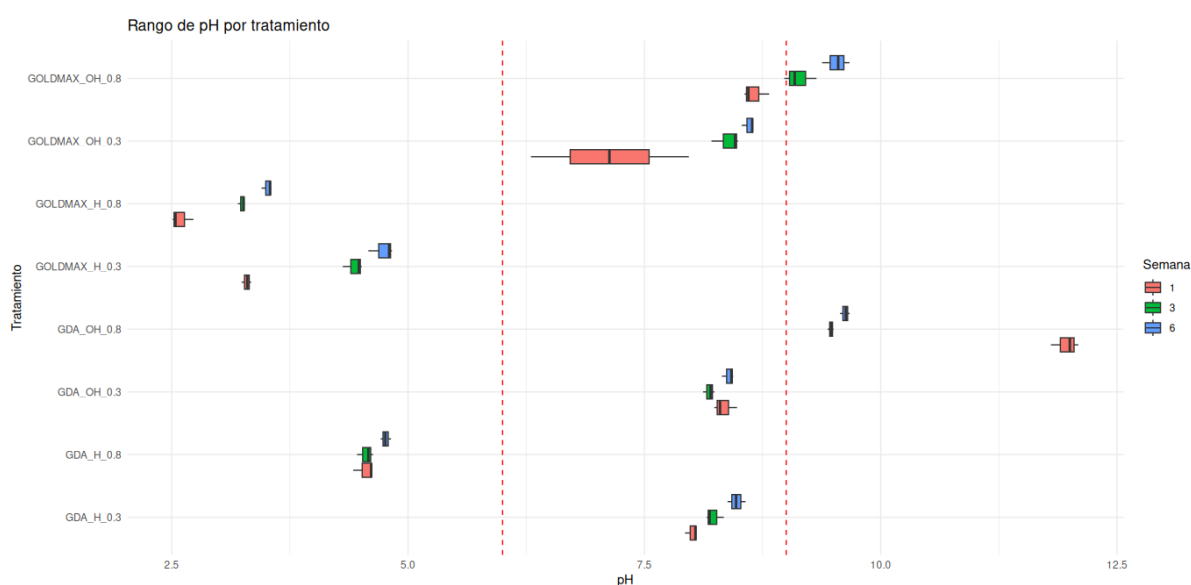


Figura 1. Diagrama de cajas del pH por tratamiento a lo largo de las semanas 1, 3 y 6. La línea discontinua roja marca el rango normativo (6,9).

Evolución de la DQO

La Figura 2 muestra que GDA en medio ácido (0.3 g) reduce su DQO desde 500 mg/L (semana 1) hasta 162 mg/L (semana 6), mostrando una tendencia de degradación de primer orden. Por el contrario, GOLDMAX mantiene DQO 400mg/L en todos los tiempos, sin disminución significativa.

**ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL COMPORTAMIENTO QUÍMICO DE LA DEGRADABILIDAD DE LIXIVIANTES GDA Y GOLDMAX
FRENTE A OXIGENACIÓN Y VARIACIONES DE PH: IMPLICACIONES PARA PROCESOS SOSTENIBLES DE EXTRACCIÓN DE ORO**

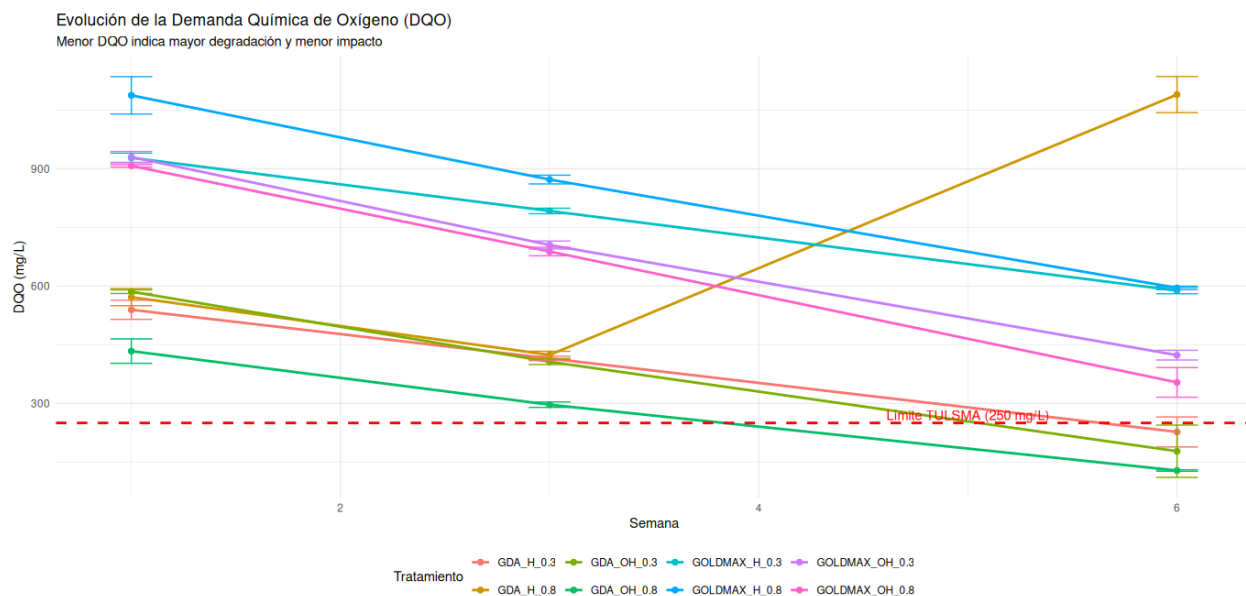


Figura 2. Evolución de la DQO (mg/L) por tratamiento durante las semanas 1, 3 y 6. GDA H 0.3 muestra la disminución más pronunciada.

ANOVA y prueba de Tukey

El ANOVA de dos vías (Tabla 1) indica que el factor tipo de ajuste tiene un efecto significativo sobre la DQO ($F = 12.706$, $p = 0.00194$), mientras que el lixiviente solo no alcanza significancia ($p = 0.405$). La interacción lixiviente: ajuste no es significativa ($p = 0.144$).

Tabla 1. ANOVA de dos vías para DQO (semana 6).

Fuente	gl	Suma Cuad.	Cuad. Medio	F valor	P - valor
Lixiviente	1	42842	42842	0.723	0.40536
Ajuste	1	753313	753313	12.706	0.00194**
Interacción	1	136806	136806	2.0307	0.14441
Residuos	20	1185790	59289		

Signif.:** $p < 0.01$

La prueba de Tukey agrupa las medias de DQO (semana 6) en dos grupos significativamente diferentes: GDA (OH)⁻ (media 153.0 mg/L) forma un grupo inferior (más bajo, mejor), mientras que GDA H⁺ (658.3) y GOLDMAX H⁺ (591.8) pertenecen a un grupo superior con mayor carga orgánica.

Índice de Impacto Ambiental (IIA)

La Tabla 2 presenta el ranking de tratamientos según el IIA al final de la semana 6. El tratamiento

GDA H⁺ 0,3 obtiene el menor IIA (0,975), seguido por GOLDMAX (OH)⁻ 0.3 (1,523) y GDA (OH)⁻ 0,3 (1,822). Los tratamientos con GOLDMAX en medio ácido presentan los valores más altos (2,6).

Tabla 2. Ranking de tratamientos según Índice de Impacto Ambiental (semana 6)

Tratamiento	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	Conductividad (mS)	STD (g/L)	IIA
GDA H ⁺ 0.3	162.0	229.7	3.52	0.515	0.975
GOLDMAX (OH) ⁻ 0.3	423.3	218.0	6.62	0.490	1.523
GDA (OH) ⁻ 0.3	177.7	232.7	4.92	0.533	1.822
GOLDMAX (OH) ⁻ 0.8	353.7	187.7	5.43	0.519	2.009
GDA (OH) ⁻ 0.8	128.3	216.0	6.47	0.517	2.281
GDA H ⁺ (OH) ⁻ 0.8	1089.7	201.3	4.23	0.513	2.344

DISCUSIÓN

Los resultados demuestran que la degradabilidad de los lixiviantes está fuertemente condicionada por el pH y la oxigenación. GDA en medio ácido con dosis baja presenta una rápida disminución de DQO, indicando una mineralización efectiva de la materia orgánica, consistente con observaciones previas sobre la estabilidad de compuestos orgánicos en presencia de oxígeno y pH moderado (7). Por el contrario, GOLDMAX mostró una persistencia mucho mayor, reflejada en DQO siempre superior a 400mg/L, lo que sugiere la formación de subproductos recalcitrantes (posiblemente complejos de azufre o polímeros orgánicos), un fenómeno también reportado en tiosulfatos y tiourea (8)(9)(10).

El hecho de que la dosis de 0.8 g (tanto ácida como básica) desplace el pH fuera del rango normativo es crítico: implica que no se debe aumentar la dosis más allá de 0.3 g/350mL si se busca cumplir con la normativa ambiental. Este hallazgo es novedoso y tiene implicaciones directas para el diseño de plantas de tratamiento(11). Además, la aplicación del IIA permitió integrar múltiples indicadores en una sola métrica, facilitando la comparación (12).

Comparando con otros lixiviantes verdes reportados en la literatura, como el ácido metanosulfónico para tierras raras (13) o la glicina para cobre (1), GDA ofrece un rendimiento ambiental superior en términos de reducción de DQO y mantenimiento de pH neutro.

Sin embargo, se requiere investigar más a fondo la eco toxicidad de los subproductos generados.

CONCLUSIONES

El tratamiento GDA H⁺ 0.3 (GDA con ácido cítrico 0.3 g/350mL) es estadísticamente el más óptimo: presenta la menor DQO residual (162 mg/L), el menor IIA (0.975) y cumple con los límites de pH (8.47) y DQO (<250mg/L) de la normativa TULSMA.

La evolución temporal de la DQO confirma que el lixiviante GDA en medio ácido con dosis baja (0.3 g/350 mL) presenta una cinética de degradación de primer orden, evidenciada por pendientes negativas significativas ($p < 0.05$). Este comportamiento refleja una mineralización progresiva de la materia orgánica, favorecida por la disponibilidad de oxígeno y un pH moderado que facilita la oxidación de los compuestos. En contraste, GOLDMAX no mostró mejora

apreciable, manteniendo valores de DQO superiores a 400 mg/L, lo que sugiere la formación de subproductos recalcitrantes con baja biodegradabilidad.

Estos resultados tienen varias implicaciones:

Ambientales: GDA cumple con los límites de la normativa TULSMA (pH 6–9, DQO ≤ 250 mg/L), lo que lo posiciona como un lixiviante más sostenible y menos contaminante.

Operativas: El control de la dosificación es crítico; dosis superiores (0.8 g) generan pH extremos (<5 o >9.5) que incumplen la normativa y pueden afectar la eficiencia de los sistemas de tratamiento.

Químicas: La persistencia de GOLDMAX sugiere la necesidad de investigar los mecanismos de formación de complejos orgánicos estables, posiblemente asociados a compuestos azufrados o poliméricos.

Aplicadas: Se recomienda la adopción de GDA como lixiviante preferente en procesos de extracción de oro, con ajuste ácido controlado y monitoreo periódico de parámetros de calidad de agua.

Finalmente, este estudio aporta evidencia experimental y estadística que respalda la sustitución progresiva de lixiviantes convencionales por alternativas biodegradables, contribuyendo a la minería aurífera responsable y sostenible. No obstante, se requiere profundizar en la caracterización ecotoxicológica de los subproductos generados para garantizar la seguridad ambiental a largo plazo

3. El control preciso de la dosificación es crítico: dosis de 0.8 g generan pH extremos (<5 o >9.5) incumpliendo la normativa, independientemente del lixiviante.

4. Se recomienda adoptar GDA como lixiviante preferente, con ajuste de pH mediante ácido cítrico a dosis de 0.3 g por cada 350 mL de solución, un tiempo de retención mínimo de 6 semanas y monitoreo de DQO y pH en las semanas 3 y 6. Evitar dosis superiores y evitar GOLDMAX en medios ácidos debido a su persistencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Xie F, Chen J, Wang J, Wang W. Review of gold leaching in thiosulfate-based solutions. Trans Nonferrous Met Soc China [Internet]. 2021;31(11):3506–29. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65745-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65745-X)
2. Chemical R. Gold MAX®. 2016; Available from: http://www.murciasalud.es/recursos/ficheros/137911-CIANURO_DE_SODIO.pdf
3. Durand G., Barceló D. AJ. Capítulo V: Estudio de degradación 1. 2000; Available from: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/93734/08cap5.pdf?sequence=8&isAllowed=y>

4. Internacional R. No Title.
5. Para G, El O, Bi TPDE, Microbi L, Autor L, Juver J, et al. AS RE IO ST Pseudomonas sp . a dos temperaturas y tres pH . IN Degradación de cianuro de sodio por CO AC IO ST.
6. Kudpeng K, Bohu T, Morris C, Thiravetyan P, Kaksonen AH. Bioleaching of Gold from Sulfidic Gold Ore Concentrate and Electronic Waste by Roseovarius tolerans and Roseovarius mucosus.
7. J BDP. Escuela Superior Politécnica De Chimborazo. 2024;
8. Cáceda C. et al. Vista de Cinética en la biodegradación de cianuro por Bacillus sp. en condiciones alcalinas.pdf. 2024.
9. Max G, Max DERG, Lixivante A, Reemplaza QUE, Cianuro AL, Max G, et al. Gold MAX ®.
10. Gaviria A, Meza L. Analysis of Alternatives for the Degradation of the Cyanide in Liquids and Solids Efluentes of the County of Segovia , Antioquia and in the Ore Dressing Mill of the Mineros Nacionales, County of Marmato, Caldas. Rev Dyna [Internet]. 2006;31–44. Available from: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/html/496/49614904/49614904.html>
11. Molina L. Identificación y análisis de agentes lixiviantes no convencionales para la recuperación de elementos de valor desde minerales, concentrados y escorias de fundición. 2018;49–50.
12. Chen XXXX, Tsai MY, Wolynes PG, da Rosa G, Grille L, Calzada V, et al. No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析Title. Nucleic Acids Res [Internet]. 2018;6(1):1–7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gde.2016.09.008%0Ahttp://dx.doi.org/10.1007/s00412-015-0543-8%0Ahttp://dx.doi.org/10.1038/nature08473%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.jmb.2009.01.007%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.jmb.2012.10.008%0Ahttp://dx.doi.org/10.1038/s4159>
13. Ummah MS. Properties of AdeABC and AdeIJK Efflux Systems of Acinetobacter baumannii Compared with Those of the AcrAB-TolC System of Escherichia coli. Sustain [Internet]. 2019;11(1):1–14. Available from: http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI
14. Munganyinka JP, Habinshuti JB, Komadja GC, Uwamungu P, Tanvar H, Ofori-Sarpong G, et al. Optimization of gold dissolution parameters in acidified thiourea leaching solution with hydrogen peroxide as an oxidant. Metals. 2022;12(10):1567.
15. Calla-Choque D, Fuentes-Rubio JE. Gold leaching with thiourea and oxalate in acid medium. MRS Adv. 2025;11(3):267–72.
16. Puglla Sumba M, Borja Álvarez D. Análisis de la biodegradabilidad de lixiviantes GDA y GOLDMAX en aguas residuales mineras. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo; 2024.
17. Ministerio del Ambiente del Ecuador. Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA). Quito: MAE; 2015.
18. Marsden J, House C. The chemistry of gold extraction. 2nd ed. Littleton: Society for Mining,

- Metallurgy, and Exploration; 2006.
19. Hilson G. The environmental impact of small-scale gold mining in developing countries. *J Clean Prod.* 2006;14(3–4):305–14.
 20. Oraby RA, Eksteen JJ. The leaching of gold, silver and their alloys in alkaline glycine–peroxide solutions and their application in gold extraction. *Hydrometallurgy.* 2023;215:108889.