



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

MAESTRIA EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES

TESIS

“LIXIVIACIÓN OXIDATIVA DE COBRE A PARTIR DE MINERALES
TIPO ÓXIDO Y CARBONATO EN MEDIO ALCALINO CON LA
ADICIÓN DE GLICINA COMO LIGANDO ORGÁNICO.”

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias de los Materiales

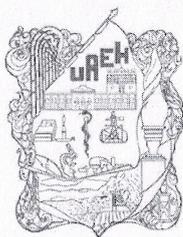
PRESENTA

Ing. Jesús Iván Martínez Soto

Director
Dr. Julio Cesar Juárez Tapia

Codirector
Dr. Ángel Ruiz Sánchez

Mineral de la Reforma, Hgo., México., enero 2024



Mineral de la Reforma, Hgo., a 11 de enero de 2024

Número de control: ICBI-D/016/2024
Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCIO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

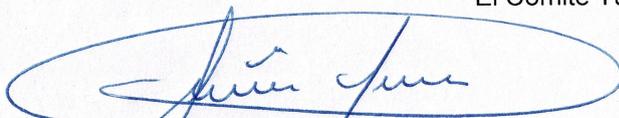
El Comité Tutorial de la tesis titulada “**Lixiviación oxidativa de cobre a partir de minerales tipo óxido y carbonato en medio alcalino con la adición de glicina como ligando orgánico**” realizado por el sustentante **Jesús Iván Martínez Soto** con **número de cuenta 262816** perteneciente al programa de **la Maestría en Ciencias de los Materiales**, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que el sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente
“Amor, Orden y Progreso”

El Comité Tutorial



Dr. Julio Cesar Juárez Tapia
Directora de tesis



Dr. Dr. Ángel Ruiz Sánchez
Codirector



Dr. Martín Reyes Pérez
Titular



Dr. Miguel Pérez Labra
Suplente

Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval
Director del ICBI



OAAS/IBO

Ciudad del Conocimiento
Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5 Colonia
Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 ext. 2231 Fax 2109
direccion_icbi@uaeh.edu.mx





El presente trabajo se llevó a cabo en el Laboratorio de Metalurgia Extractiva del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales (AACTyM) del Instituto de Ciencias Básicas e Ingenierías de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), bajo la dirección del Dr. Julio Cesar Juárez Tapia, el Dr. Ángel Sánchez Ruiz, el Dr. Martin Reyes Pérez y el Dr. Miguel Pérez Labra, así mismo se contó con el apoyo económico del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) con el número de beca 2022-0000002-01NACF-05094 dentro del programa 002622 – Maestría en Ciencias de los Materiales.



Agradecimientos

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y en especial al Área de Ciencias de la Tierra y Materiales por abrirme las puertas y haberme aceptado para formar parte de ella.

Al Dr. Julio Cesar Juárez Tapia y la Dra. Aislinn Michelle Teja Ruiz por estar presentes en todo momento y convertirse en una segunda familia para mí, por brindarme el apoyo y los conocimientos necesarios, por guiarme a través del camino adecuado y por su paciencia y comprensión durante el proceso de elaboración de este trabajo.

Al Dr. Martin Reyes Pérez, Dr. Miguel Pérez Labra, Dr. Ángel Ruiz Sánchez y al Dr. Raúl Velasco Azorsa por asesorarme y estar presentes en todo momento para aclarar todas mis interrogantes durante el proceso de aprendizaje.

A mis padres Pedro Martínez Arellano y Alicia Soto Montaña por brindarme la educación, formación y herramientas necesarias para enfrentar los retos presentados durante la licenciatura además de apoyarme incondicionalmente y darme la posibilidad de realizar mis sueños.

A mi hermana Alicia Martínez Soto, por su apoyo y motivación durante todo el tiempo.

A mis amigos y compañeros presentes a través del proceso de aprendizaje por brindarme su amistad sincera y apoyo incondicional.



CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS	V
NOMENCLATURA.....	VII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT	X
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES.....	2
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
4. OBJETIVOS	10
4.1 Objetivo General.	10
4.2 Objetivos Específicos.....	10
5. HIPÓTESIS	12
6. JUSTIFICACIÓN.....	12
7. MARCO TEÓRICO	13
7.1 Proceso de Lixiviación.....	14
7.1.1 Métodos o Tipos.....	15
7.1.2 Química de la Lixiviación.....	17
7.1.3 Reactivos.	20
7.2 Termodinámica del Sistema Glicina.	24
7.3 Análisis Granulométrico.	25
7.4 Sistemas oxidativos.	25
7.4.1 Permanganato de Potasio (KMnO ₄):	26
7.4.2 Peróxido de Hidrógeno (H ₂ O ₂):.....	26
7.4.3 Ozono (O ₃):.....	26
8. DESARROLLO EXPERIMENTAL	28
8.1 Análisis granulométrico y determinación del contenido de cobre	31
8.2 Caracterización química y mineralógica de las muestras minerales MC y MM. 32	
8.2.1 Espectrometría de Absorción Atómica (EAA).	32
8.2.2 Fluorescencia de Rayos X (FRX).	32
8.2.3 Análisis Químico por Espectrometría de Emisión de Plasma Acoplada por	



Inducción (ICP)	33
8.2.4 Análisis por Difracción de Rayos X (DRX)	33
8.2.5 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y Microanálisis de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS).....	34
8.3 Construcción de diagramas termodinámicos.....	34
8.4 Pruebas Experimentales de Lixiviación.....	35
8.5 Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR).....	36
8.6 Reactivos y Dispositivos Experimentales.....	36
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
9.1 Caracterización de las Muestras Minerales.....	38
9.1.1 Caracterización Química de las Muestras Minerales.....	38
9.1.2 Caracterización Mineralógica de las Muestras Minerales.....	44
9.2 Diagramas termodinámicos del sistema Gli-Mineral.....	49
9.3 Lixiviación con Glicina.....	51
9.3.1 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).....	54
9.3.2 Lixiviación sistema Gli-KMnO ₄ -Mineral.....	55
9.3.3 Lixiviación sistema Gli-H ₂ O ₂ -Mineral.....	57
9.3.4 Lixiviación sistema Gli-O ₃ -Mineral.....	60
9.4 Reacciones propuestas para los sistemas experimentales.....	62
9.5 Caracterización de los residuos experimentales mediante MEB- EDS.....	65
9.5.1 Residuos de la muestra MC.....	66
9.5.2 Residuos de la muestra MM.....	68
CONCLUSIONES	XI
APÉNDICE A.....	XIII
REFERENCIAS	XXXIX



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de la Metalurgia Extractiva.....	13
Figura 2. Estructura molecular base de un alfa aminoácido.....	22
Figura 3. Estructura molecular de la glicina.....	22
Figura 4. Diagrama de distribución de especies para el sistema Gli-H ₂ O a 25 °C [Gli] 0.5M y Eh [0.63].....	24
Figura 5. Esquema del desarrollo experimental.	31
Figura 6. Diagrama del equipo utilizado en las pruebas experimentales.	35
Figura 7. Distribución de Cu (%) con respecto al número de malla, muestra MC.	39
Figura 8. Distribución de Cu (%) con respecto al número de malla, muestra MM.	40
Figura 9. Contenido elemental muestra MM, Fluorescencia de Rayos X.	42
Figura 10. Contenido elemental muestra MC, Fluorescencia de Rayos X.	43
Figura 11. Difractograma de Rayos X correspondientes a la muestra MC.....	45
Figura 12. Difractograma de Rayos X correspondiente a la muestra MM.	46
Figura 13. Fotomicrografías de MEB (b y d) y espectros EDS (a y c) correspondientes a la muestra MC.....	47
Figura 14. Fotomicrografías de MEB (b y d) y espectros EDS (a y c) correspondientes a la muestra MM.	48
Figura 15. (a) Diagrama Eh-pH del sistema Gli-Mineral 25 °C, (b) Diagrama Eh-pH del sistema MC-glicina a 40 °C, (c) Diagrama Eh-pH del sistema MC-glicina a 60 °C.	50
Figura 16. Diagrama Eh-pH del sistema Glicina [1] molar - Fe ³⁺ - Cu ²⁺ a 25 °C	51
Figura 17. Curvas de disolución de Cu en las pruebas de lixiviación, sistema Gli-MM	52
Figura 18. Curvas de disolución de Cu en las pruebas de lixiviación, sistema Gli-MC.....	53
Figura 19. Espectros infrarrojos correspondiente a las muestras Gli, Gli-MM y Gli-MC.....	55
Figura 20. Curvas de disolución de Cu en las pruebas de lixiviación, sistema Gli-KMnO ₄ -MM.....	56
Figura 21. Curvas de disolución de Cu en las pruebas de lixiviación, sistema Glicina-KMnO ₄ -MC.....	57
Figura 22. Curvas de disolución de Cu en las pruebas de lixiviación, sistema Gli-H ₂ O ₂ -MM.	58
Figura 23. Curvas de disolución de Cu en las pruebas de lixiviación, sistema Gli-H ₂ O ₂ -MC.	59
Figura 24. Curvas de disolución de Cu en las pruebas de lixiviación, sistema Gli-O ₃ -MM.	60
Figura 25. Curvas de disolución de Cu en las pruebas de lixiviación, sistema Gli-	



O ₃ -MC.	61
Figura 26. Residuos del sistema Gli-KMnO ₄ -MM	65
Figura 27. Fotomicrografías de MEB (b y d) y espectros EDS (a y c) correspondientes a los residuos del sistema Gli-KMnO ₄ -MC.	66
Figura 28. Fotomicrografías de MEB (b y d) y espectros EDS (a y c) correspondientes a los residuos del sistema Gli-H ₂ O ₂ -MC.	67
Figura 29. Fotomicrografías de MEB (b y d) y espectros EDS (a y c) correspondientes a los residuos del sistema Gli-O ₃ -MC.	68
Figura 30. Fotomicrografías de MEB (b y d) y espectros EDS (a y c) correspondientes a los residuos del sistema Gli-KMnO ₄ -MM.....	69
Figura 31. Fotomicrografías de MEB (b y d) y espectros EDS (a y c) correspondientes a los residuos del sistema GliH ₂ O ₂ -MM.	70
Figura 32. Fotomicrografías de MEB (b y d) y espectros EDS (a y c) correspondientes a los residuos del sistema Glicina-O ₃ -MM.	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones variables experimentales.	29
Tabla 2. Condiciones constantes experimentales para experimentos preliminares	29
Tabla 3. Condiciones constantes experimentales con ambientes oxidantes.....	30
Tabla 4. Dispositivos utilizados para la lixiviación de cobre.	37
Tabla 5. Reactivos utilizados en la lixiviación de Cobre.	37
Tabla 6. Contenido de cobre por malla de la muestra MC.	39
Tabla 7. Contenido de cobre por malla de la muestra MM.....	40
Tabla 8. Contenido de cobre presente en las muestras minerales MC y MM por la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica.	41
Tabla 9. Contenido de cobre presente en las muestras MC y MM por la técnica de espectrometría de Emisión de Plasma Acoplada por Inducción.....	43
Tabla 10. Reacciones propuestas para el sistema [Gli] 1 M - MC.....	63
Tabla 11. Reacciones propuestas para el sistema [Gli] 1 M - MM.	64



NOMENCLATURA

°C	Grados Centígrados
°F	Grados Fahrenheit
Å	Armstrong
ASTM	American Society for Testing and Materials
CaCO ₃	Carbonato de Calcio
cm	Centímetros
CuCO ₃ (OH) ₂	Hidróxido de Carbonato de Sodio
Cu ₂ O	Óxido de Cobre
DRX	Difracción de Rayos X
EAA	Espectrofotometría de Absorción Atómica
Eh	Potencial
Fe ₂ O ₃	Óxido de Hierro
FeO(OH)	Oxihidróxido de Hierro (III)
FRX	Fluorescencia de Rayos X
gr	Gramos
g/L	Gramo por Litro
g/mol	Gramo por mol
H ₂ O ₂	Peróxido de Hidrógeno
hrs.	Horas
ICP	Espectrometría de Emisión de Plasma Acoplada por Inducción
IR	Rayos Infrarrojos
K	Grados Kelvin
Kg/t	Kilogramos por tonelada
km	Kilómetros
KMnO ₄	Permanganato de Potasio
kV	Kilovolts
L/min	Litros por minuto
M	Molaridad



MEB	Microscopía Electrónica de Barrido
EDS	Microanálisis de Energía Dispersiva de Rayos X
min.	Minutos
mL	Mililitros
Mn ²⁺	Ión Manganeseo
MC	Muestra mineral con contenido de cuprita
MM	Muestra mineral con contenido de malaquita
mV	MiliVolts
NaOH	Hidróxido de Sodio
NH ₂ CH ₂ COOH	Glicina (Gli)
nm	Nanómetros
O ₃	Ozono
pH	Potencial de Hidrógeno
RPM	Revoluciones Por Minuto
S.A de C. V	Sociedad Anónima de Capital Variable
SO ₂	Dióxido de Azufre
θ	Theta
%	Porcentaje m/m



RESUMEN

Se llevó a cabo la lixiviación de cobre con glicina (Gli) a partir de muestras minerales que contienen Cu en forma de cuprita (Cu_2O) (MC) y malaquita ($(\text{CuCO}_3)\cdot\text{Cu}(\text{OH})_2$) (MM) en presencia de tres agentes oxidantes: permanganato de potasio, peróxido de hidrógeno y ozono, a pH alcalino, analizando el efecto de la concentración de cada uno de los reactivos en el porcentaje de lixiviación de cobre. Los resultados experimentales indicaron que el porcentaje máximo de disolución de cobre se obtuvo con el sistema Gli- H_2O_2 , con un valor de 69.7% m/m a $[\text{Gli}]=1\text{M}$ - $\text{H}_2\text{O}_2=1\%\text{v/v}$ en 150 minutos y 96.3% m/m a $[\text{Gli}]=1\text{M}$ - $\text{H}_2\text{O}_2=0.7\%\text{v/v}$, a 60 minutos para la muestra MC y MM respectivamente. Para el sistema Gli-MM, con permanganato de potasio u ozono no se obtuvieron los resultados esperados en la disolución debido a que estos agentes reaccionaron directamente con la glicina, causando bajos porcentajes de lixiviación de cobre.

Palabras clave: cobre, disolución, glicina, agentes oxidantes, permanganato de potasio, peróxido de hidrógeno, ozono, métodos alternativos, hidrometalurgia.



ABSTRACT

Copper leaching was conducted using glycine (Gly) on mineral samples containing copper in the form of cuprite (Cu_2O) (MC) and malachite ($(\text{CuCO}_3)\cdot\text{Cu}(\text{OH})_2$) (MM) in the presence of three oxidizing agents: potassium permanganate, hydrogen peroxide, and ozone, under alkaline pH. The study analyzed the effect of the concentration of each reagent on the percentage of copper leaching. Experimental results indicated that the maximum copper dissolution percentage was achieved with the Gly- H_2O_2 system, with a value of 69.7% m/m at $[\text{Gly}]=1\text{M}-\text{H}_2\text{O}_2=1\%\text{v/v}$ in 150 minutes, and 96.3% m/m at $[\text{Gly}]=1\text{M}-\text{H}_2\text{O}_2=0.7\%\text{v/v}$ at 60 minutes for samples MC and MM, respectively. For the Gly-MM system, potassium permanganate or ozone did not yield the expected dissolution results, as these agents reacted directly with glycine, causing low percentages of copper leaching.

Keywords: copper, dissolution, glycine, oxidizing agents, potassium permanganate, hydrogen peroxide, ozone, alternative methods, hydrometallurgy.



1. INTRODUCCIÓN

El cobre es una materia prima ampliamente utilizada por su capacidad de aleación con otros metales ya que se encuentra presente en automóviles, trenes, aviones además de usos aplicados en monedas, utensilios de cocina, joyería, así como en el desarrollo de nuevas tecnologías para aumentar la eficiencia en la transmisión de datos (Zhang, 2015). Por otro lado, existen grandes depósitos de minerales de cobre en varias regiones del mundo como China, Chile y Perú; en México el cobre es el cuarto metal que más se produce, esto ha permitido que el país se encuentre entre los 10 países con mayor producción de cobre (Pano, 2019).

Los minerales de cobre de mayor importancia son los sulfuros, óxidos y carbonatos, que a partir de ellos el cobre es obtenido de forma tradicional, es decir, por fundición, lixiviación y electrólisis. A pesar de que la industria del cobre es enorme a nivel mundial, en la actualidad se enfrenta a problemas sociales y económicos, debido a la explotación masiva realizada para satisfacer la demanda actual de este metal, estimada en 22 millones de toneladas anuales (Zorilla, 2013). Por esta razón en el presente estudio se llevó a cabo la lixiviación de dos minerales por separado que contienen cobre en forma de cuprita o malaquita, utilizando glicina como complejante en ambientes oxidantes como una alternativa a los métodos tradicionales. La lixiviación con glicina se encuentra poco explorada, por lo cual es de suma importancia la investigación de este tipo de sistemas con la intención de lograr un escalamiento industrial que incluya procesos con menor impacto al ambiente y con una capacidad productiva comparable con los métodos tradicionales tales como la lixiviación con ácido sulfúrico o por la vía pirometalúrgica.



2. ANTECEDENTES

En este capítulo, reúne las aportaciones relacionadas con el presente estudio, en cuanto a la caracterización de las especies minerales y los procesos de lixiviación de cobre tradicionales y alternativos.

Ojeda (2005) caracterizó minerales de cobre mediante la técnica de MEB (Microscopía Electrónica de Barrido) con la finalidad de determinar el tipo de especies minerales que flotan, las características del tamaño de partícula, las asociaciones y el grado de liberación. El objetivo de su trabajo fue presentar el beneficio de la caracterización mineralógica aplicada a la identificación de minerales de oro y plata para incrementar el beneficio del proceso de flotación de minerales y evitar pérdidas en el proceso. Los estudios mineralógicos definieron como principales minerales de cobre, la cuprita y la bornita, seguido de la calcocita y en menores proporciones la covelita. El oro y la plata se encuentran como telururos siendo las especies más frecuentes la calaverita TeAu_2 , silvanita $\text{Te}(\text{Ag}, \text{Au})_2$ y hessita TeAg_2 , en tamaños entre 2 y 9 micras y se les encuentra asociados a los sulfuros y sulfosales de cobre y bismuto. En relación al tamaño de partícula, los minerales del metal de interés se presentan liberados en un 80% a tamaños entre 90 y 100 micras. Los minerales de cobre encontrados en las colas de flotación fueron sulfuros y óxidos tanto liberados como en asociaciones.

En otros estudios, Vargas (2005) determinó las mejores condiciones para lixiviar por agitación un relave antiguo proveniente de la flotación de minerales sulfurados de cobre. Los parámetros que evaluó fueron la concentración de ácido sulfúrico, relación sólida/líquido y temperatura, manteniendo parámetros constantes a lo largo de las pruebas tales como la granulometría, el volumen de pulpa, la velocidad de agitación y tiempo de agitación. Concluyó que las mejores condiciones fueron: lixiviar con ácido sulfúrico (98% de pureza) a una concentración de ácido de 40 g/L, relación sólida/líquido $\frac{1}{4}$ y temperatura ambiente (25 °C). Con estas condiciones logró recuperaciones de cobre soluble cercanas al 90% y generó una solución rica en cobre de aproximadamente 1.3 g/L.



Arias (2018) desarrolló un método alternativo para la disolución de oro con el uso de glicina, el cual se cataloga como un agente de lixiviación no tóxico, de bajo precio. Utilizó un mineral con los siguientes contenidos para la evaluación de la lixiviación con glicina presentando concentraciones de 11 y 26 g/t de Au y Ag, respectivamente y un contenido de 0,05 % de Cu, 75% de silicatos, 24% de arcillas y 1% de pirita. El proceso de lixiviación con glicina fue realizado durante 96 horas en lecho agitado, con pH de 11, donde se varió la concentración de la glicina (1 M - 2 M) y la temperatura (40 °C - 60 °C). Posteriormente, realizó un doble proceso de lixiviación con agitación, de 96 horas cada uno, manteniendo el potencial electroquímico en un valor de 600 mV, por medio de la adición de H₂O₂. Obtuvo resultados de recuperación de oro mayores al 80% a una temperatura de 60 °C y una concentración de glicina 2 M.

Anchapuri et. al. (2019) determinaron el porcentaje de recuperación de cobre en la lixiviación de minerales oxidados de cobre con reactivo glicina en medio alcalino y comprobó su capacidad de disolución de cobre.

Anchapuri y colaboradores (2019) emplearon un tamaño de partícula de 53 (malla 200). La extracción de cobre se llevó a cabo por el método de lixiviación por agitación en 400 rpm. Preparó la solución de glicina como lixivante, la concentración óptima determinada fue 0.5 M, para ajustar el pH a 11 se utilizó lechada de cal. Además, determinó el tiempo de lixiviación de cobre por agitación siendo óptimo de 24 horas. Bajo estas condiciones el porcentaje de extracción de cobre por el método de agitación alcanzó el 82.14% de Cu.

Garza (2020) realizó un estudio de extracción de oro y plata a partir de materiales con diferente composición, incluyendo uno con alto contenido de pirita (85%) y un residuo de lixiviación ácida de calcopirita. El objetivo fue investigar la extracción de oro y plata mediante los sistemas cianuro, glicina-cianuro y glicina, analizando el balance de masa de oro y plata en términos de porcentaje de extracción. Los trabajos experimentales se llevaron a cabo en condiciones controladas de laboratorio, utilizando diversos parámetros como el medio lixivante



(cianuro, cianuro más glicina, glicina), pH, tipo de reactor, concentración del medio lixivante, reactivos adicionales y tiempos de hasta 48 horas. Se emplearon 30 g de material y 300 mL de agua comercial purificada en todas las pruebas.

La caracterización de los materiales antes y después del proceso de lixiviación se realizó mediante técnicas analíticas como ICP, FRX y DRX por el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CIDT) del Grupo Peñoles. Garza propuso dos pretratamientos (desulfuración y peroxidación en medio alcalino con NaOH) para analizar la extracción de oro y plata del residuo de lixiviación ácida de calcopirita.

Los resultados mostraron que la cianuración proporcionó los mayores porcentajes de extracción de oro y plata, independientemente del material y pretratamiento. El material con alto contenido de pirita exhibió los porcentajes más altos de extracción de oro (99.22%) y plata (94.90%). Para el subproducto de lixiviación ácida de calcopirita, la combinación de desulfuración y pre-oxidación alcanzó los mayores porcentajes de extracción de oro (99.50%), mientras que la desulfuración sola logró los mayores porcentajes de extracción de plata (46.71%).

Solano (2016) evaluó la lixiviación de oro con glicina y glutamato monosódico en presencia de peróxido de hidrógeno y permanganato de potasio a pH alcalino, con el fin de analizar la cinética y el mecanismo de lixiviación realizó pruebas utilizando pines de contactos eléctricos y láminas de oro puro, con el fin de evitar los efectos de la difusión en los poros del mineral, en este trabajo se evaluó el efecto del agente oxidante a concentraciones de 0.03, 0.01, 0.004 M, en pH 9.4 y 11, en un tiempo máximo de 25 horas. Al final de las pruebas se analizó el material sólido para determinar el porcentaje de extracción del metal de interés respecto a cada concentración del agente oxidante y cada pH. Los resultados experimentales indicaron que el porcentaje de extracción de oro es afectado por la concentración del agente oxidante, el pH y aumenta con la presencia de iones de Cu^{2+} , logrando en presencia de estos iones valores de extracción 2 veces mayores para glicina. Al evaluar el porcentaje de extracción de oro en las diferentes condiciones a



temperatura a 25 y 40°C, observó que la cinética de extracción es muy sensible al cambio de temperatura, lo cual le permitió proponer que el mecanismo de la lixiviación es controlado químicamente.

Juyo et. al. (2022) aplicaron el sistema alcalino de Glicina-Peróxido de Hidrógeno con el objetivo de ofrecer un proceso alternativo y ambientalmente favorable para la lixiviación tanto de cobre como de plata, en particular en el contexto de la lixiviación in situ de minerales de Cobre y Plata de baja ley o en procesos de lixiviación en pilas. Encontró que este sistema lixivante puede disolver el cobre y plata en condiciones neutras y alcalinas a temperaturas de 23 a 60°C, en este trabajo se determinó el efecto de la velocidad de reacción a esta temperatura por un mecanismo que es el control de la reacción química en lugar de controlar la transferencia de masa como se encuentra para la lixiviación de cianuro, de igual manera se exploraron los efectos de la lixiviación sola contra las dos etapas de lixiviación, pH, concentración de oxidante, la densidad de la pulpa y la concentración de glicina y la velocidad de extracción de cobre, se determinó la presencia del ion Cu^{2+} mejora la disolución del oro en soluciones de glicina-peróxido. Determinó que es un proceso ambientalmente favorable para el tratamiento de Cobre y Plata con el fin de sustituir el uso de cianuro en la lixiviación.

En otros estudios Tanda et al., (2017) llevaron a cabo una investigación para explorar una alternativa al proceso convencional a partir de ácido sulfúrico para la extracción de minerales de óxido de cobre. En lugar de utilizar la lixiviación ácida tradicional seguida de la recuperación de cobre mediante extracción con solventes y electro obtención, se propuso emplear un sistema acuoso alcalino de glicina. El objetivo fue evaluar el comportamiento de lixiviación de minerales de óxido de cobre, específicamente azurita, crisocola, cuprita y malaquita, utilizando este enfoque alternativo.

Tanda y colaboradores (2017) analizaron los efectos de la concentración de glicina y el pH en la extracción de cobre a temperatura ambiente y presión atmosférica, se observó que la concentración de glicina y el pH tenían un impacto



significativo en la extracción de cobre de los minerales estudiados garantizando la estabilidad del complejo glicinato de cobre(II). Se determinaron condiciones óptimas de lixiviación, específicamente un pH de 11 y una relación de glicina a cobre de 4:1, bajo estas condiciones, se lograba una extracción de cobre de azurita del 95%, malaquita del 91%, cuprita del 83.8% y crisocola del 17.4%. Se destacó que, aunque la disolución fue más lenta en comparación con la lixiviación ácida, la disolución selectiva de cobre sobre minerales de ganga consumidores de ácido mostraba un gran potencial. También proporcionaron detalles sobre la forma en que el cobre disuelto se encontraba en estado cúprico y formaba un complejo neutro de cobre-glicinato en condiciones alcalinas, según lo demostrado mediante espectroscopía UV-Vis.

Chávez (2020), se centró en evaluar la influencia de soluciones de tartrato en la recuperación de cobre a partir de minerales oxidados de cobre, específicamente la malaquita, en comparación con el uso del ácido sulfúrico. La motivación principal fue la búsqueda de reactivos alternativos menos agresivos con el medio ambiente en la industria minera.

Los resultados obtenidos por Chávez (2020) se analizaron mediante espectrometría ultravioleta-visible aplicando la ecuación de Beer-Lambert y absorción atómica, dichos resultados indicaron que, utilizando la solución de tartrato, se lograron recuperaciones de 1.039 g de cobre por litro de solución en 5 días de proceso (26.3% del total recuperado), 2.909 g/L en 32 días (73.7% del total recuperado) y 3.948 g/L en 37 días de proceso. Por otro lado, el proceso con ácido sulfúrico mostró recuperaciones favorables en los primeros días, alcanzando 4.2 g/L en 5 días de proceso (65.6% del total recuperado), pero disminuyendo la velocidad de extracción con el tiempo a 2.2 g/L en 32 días (34.4% del total recuperado) y alcanzando 6.4 g/L de Cu^{2+} en 37 días.

La solución de tartrato, además de ser biodegradable y respetuosa con el ambiente, se presenta como una nueva alternativa tecnológica para el procesamiento de cobre mediante lixiviación selectiva.



Córdova et. al. (2010) se enfocaron en buscar nuevas tecnologías para la extracción del cobre a partir de la malaquita utilizando procesos hidrometalúrgicos que no contaminen el medio ambiente, suelos, aguas subterráneas y superficiales. Para ello, propusieron como alternativa el uso de soluciones diluidas de ácido cítrico en lugar de las tradicionales soluciones diluidas de ácido sulfúrico, debido a la biodegradabilidad del ácido cítrico, presente principalmente en el jugo de limón y otras frutas de consumo humano. La investigación de Córdova incluyó pruebas experimentales que demostraron extracciones de cobre significativas, alcanzando porcentajes de 99.4% y 95.51% para minerales de granulometría menores a 1/4 de pulgada. Para minerales de granulometría menores a -3/8 de pulgada, las extracciones fueron del 61.6% y 52.49%, utilizando soluciones diluidas de ácido cítrico con concentraciones de 20 g/L y 10 g/L, respectivamente, durante un periodo de lixiviación de 36 días. Por otro lado, en un periodo de lixiviación de 16 días, obtuvieron extracciones de cobre de 40.82% y 39.03% para minerales de granulometría menores a 1/4 de pulgada, y extracciones de 25.25% y 23.68% para minerales de granulometría menores a 3/8 de pulgada. Estas extracciones se lograron utilizando soluciones diluidas de ácido cítrico con concentraciones de 20 g/L y 10 g/L para cada caso.

Calizaya et al., (2010) se enfocaron en la cinética de lixiviación de minerales de malaquita y azurita provenientes del cerro Azoguine en la ciudad de Puno, Perú, con un contenido de cobre del 35.58%, utilizando reactivos orgánicos como ácido cítrico, ácido fórmico y ácido acético.

Calizaya y colaboradores (2010) exploraron diversas variables, incluyendo el tipo y concentración del reactivo orgánico, el tamaño de partícula y la temperatura. Aplicaron modelos de velocidad controlada por difusión y velocidad por reacción superficial en el análisis cinético.

Mediante la realización del trabajo antes mencionado, obtuvieron los siguientes resultados de lixiviación, con una solución de 0.3087 M de ácido cítrico mostraron una extracción de cobre del 68%, con un tiempo de lixiviación de 4 horas



y un tamaño de partícula de malla -60. Se determinó la energía de activación a temperaturas de 16° y 35°, obteniendo un valor de 11.2281 KJ/mol. En cuanto a la lixiviación con una solución de 1.029 M de ácido fórmico, se logró una extracción del 75% en un tiempo de 2 horas y tamaño de partícula menor a 250 micras. La lixiviación con una solución de 1.014 M de ácido acético resultó en una extracción del 36% en un tiempo de 5 horas.

De acuerdo con los trabajos previamente mencionados se puede observar que existen grandes áreas de oportunidad, relacionadas con el beneficio de los minerales cobre, por esta razón, el presente estudio tiene la finalidad de obtener información detallada de la concentración de cobre presente en las muestras minerales a estudiar, mediante técnicas cualitativas y cuantitativas. Así como conocer la mineralogía presente y sus asociaciones minerales con el propósito de proponer las condiciones adecuados para el proceso de lixiviación de este metal.



3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente el procesamiento de minerales de cobre considera métodos como la fundición y refinación o la hidrometalurgia, implica tres tipos de impactos ambientales, los cuales son: cambio climático y salud humana, agotamiento de fósiles y formación de partículas (Zhang, 2015). Además, lleva consigo efectos tales como la alteración de la calidad del agua, contaminación por metales pesados y contaminación por drenaje ácido (Sacher et al., 2011).

Por otra parte, la elaboración de este proyecto surge a partir de la escasa investigación existente acerca de la implementación del sistema glicina para la recuperación de cobre contenido en óxidos y carbonatos, el cual requiere para su eficiencia el estudio de agentes oxidantes que regulen el medio y permitan altas disoluciones del metal base. Otro de los motivos importantes para el desarrollo de este trabajo es la necesidad actual por la cual atraviesa la humanidad, que es convertir procesos industriales dañinos al medio ambiente en procesos amigables para el mismo.

Considerando lo anterior se propone un método alternativo a base del aminoácido glicina para la lixiviación de cobre, procurando su selectividad y condiciones óptimas de recuperación, basándose en un sistema de disolución de cobre utilizando insumos de bajo costo como lo es el sistema glicina, el cual es un compuesto orgánico cuya característica principal es ser el aminoácido más sencillo con la propiedad de propiciar la disolución de metales.



4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General.

Evaluar las condiciones de operación para el sistema de lixiviación con glicina mediante el estudio de la influencia de la concentración de los agentes oxidantes (KMnO_4 , H_2O_2 y O_3), con la finalidad de determinar el ambiente oxidativo idóneo para la lixiviación de cobre en medio alcalino.

4.2 Objetivos Específicos.

- Realizar el análisis granulométrico de la muestra mineral y disolución ácida de los polvos retenidos en cada malla de la serie Tyler con la finalidad de conocer la distribución de cobre y el tamaño de partícula óptimo para las pruebas de lixiviación.
- Realizar la caracterización de las fracciones del análisis granulométrico por espectrofotometría de absorción atómica (EAA)
- Realizar la caracterización química mineralógica de la muestra utilizando las técnicas de espectrofotometría de absorción atómica (EAA), espectrometría de emisión de plasma acoplada por inducción (ICP), fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido – microanálisis de energía dispersiva de rayos X (MEB-EDS) para conocer la composición elemental, morfología e identificación de las especies minerales presentes en la muestra mineral.
- Construir los diagramas termodinámicos del sistema Cu^{2+} -Gli- H_2O para encontrar regiones de predominancia de cobre-glicina, usando software comercial libre.
- Realizar experimentos de lixiviación en función de las variables propuestas en este trabajo.



4. Objetivos



- Comprobar la formación del complejo diglicinato de cobre a través de la técnica de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).
- Caracterización de los residuos sólidos de los experimentos de lixiviación por la técnica de microscopía electrónica de barrido – microanálisis de energía dispersiva de rayos X (MEB-EDS).



5. HIPÓTESIS

Los medios oxidantes propuestos en esta investigación favorecen la obtención selectiva de cobre alcanzando porcentajes de lixiviación comparables con la literatura.

6. JUSTIFICACIÓN

Los procesos alternativos a la lixiviación oxidativa de cobre sugieren el uso de glicina en medio alcalino, para disminuir el impacto ambiental generado por los sistemas convencionales como la lixiviación ácida. No obstante, hoy en día todavía se desconoce las condiciones óptimas de este sistema en diferentes muestras minerales, por lo que es fundamental llevar a cabo un estudio sistemático de este proceso acoplado con la termodinámica y caracterización química del medio acuoso que permitan obtener un conocimiento más profundo sobre este sistema, en particular bajo operación de condiciones moderadas (presión atmosférica y temperatura en el intervalo de 20 a 30 °C).

Por lo antes mencionado en esta investigación se llevó a cabo un estudio de la lixiviación oxidativa de cobre en medio alcalino a partir de dos muestras minerales cuya composición mineralógica indica la presencia malaquita y cuprita.



7. MARCO TEÓRICO

Para lograr el aprovechamiento óptimo de una fuente mineral es necesaria la obtención de datos en torno a su caracterización, datos como la geología y la morfología de la mineralización, así como sus características texturales y granulométricas, ya que son indispensables para el diseño del proceso de extracción del metal (Palacios et al., 2011).

Lo anterior se lleva a cabo mediante la metalurgia extractiva, la cual es la rama de la metalurgia encargada de estudiar la transformación de menas de minerales o materiales de reciclado a metales. En cuanto a la metalurgia extractiva, (Ballester et al. 2000), la define como la ciencia que estudia los métodos químicos requeridos para procesar una mena mineral que se va a reciclar de tal manera que se pueda obtener, un metal o alguno de sus compuestos, se clasifica en tres grandes grupos, como se presenta en la Figura 1.

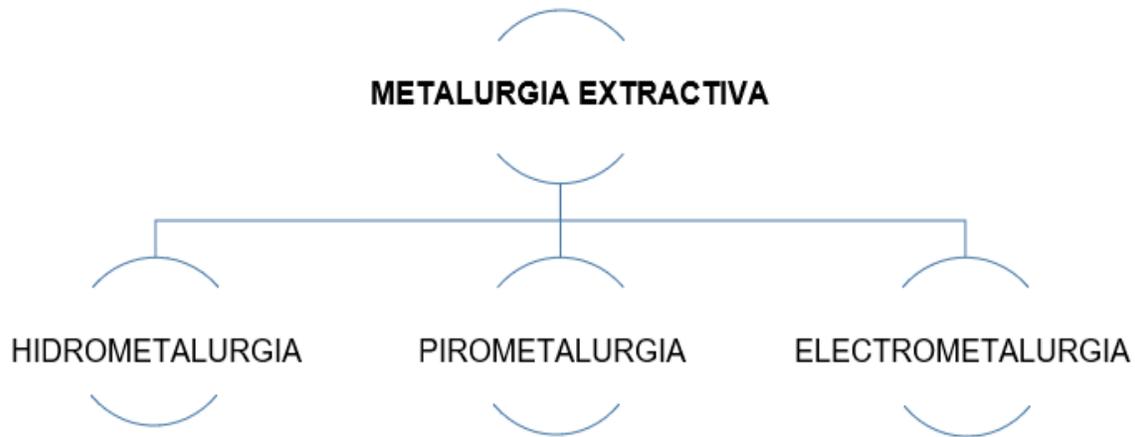


Figura 1. Clasificación de la Metalurgia Extractiva.

La metalurgia extractiva está dividida en dos grupos: operaciones por vía húmeda y operaciones por vía seca. Las operaciones por vía seca se les conoce como operaciones pirometalúrgicas las cuales se realizan a altas temperaturas, con productos en los tres estados de la materia: sólido, líquido y gaseoso. Por otra parte, las operaciones por vía húmeda, también conocidas como operaciones hidrometalúrgicas se llevan a cabo en fase



acuosa y a bajas temperaturas.

La operación principal de los procesos hidrometalúrgicos es la lixiviación, proceso por el cual se lleva a cabo la obtención del metal y/o los metales de interés a través de la disolución del mineral que los contiene. En este método se agregan reactivos lixiviantes como: cianuro, tiourea, tiosulfatos, ácidos, entre otros, los cuales tienen el papel de complejar al metal de interés. Los metales más comunes que se recuperan por procesos hidrometalúrgicos son: cobre, manganeso, uranio, zinc, oro y plata (Ballester et. al. 2013).

En este capítulo se presentan los conceptos básicos referentes al proceso de lixiviación tradicional y experimental para el estudio de este proceso hidrometalúrgico.

7.1 Proceso de Lixiviación.

La lixiviación es el ataque químico de una determinada materia prima para disolver algún metal valioso utilizando reactivos ácidos o básicos, reductores u oxidantes, complejantes o combinaciones de ellos. Las materias primas pueden ser de distinta naturaleza: minerales naturales (pobres o ricos), concentrados, productos metalúrgicos intermedios, chatarras, etc.

Uno de los procesos convencionales es la lixiviación cianurada directa la cual es un proceso para menas no refractarias, para minerales donde el metal precioso se encuentra liberado o es fácilmente lixiviado, tales como la disolución directa en una solución alcalina diluida de cianuro, concentración gravitacional y cianuración.

Por otro lado, la lixiviación cianurada indirecta es un proceso para minerales refractarios en donde el metal precioso se encuentra íntimamente asociado a otras especies mineralógicas o posee un tamaño microscópico. Donde la concentración gravimétrica del mineral es realizada con el fin de eliminar el material estéril, elementos cianicidas, el refractario y así obtener un concentrado de alto valor (Ballester et. al. 2013).



7.1.1 Métodos o Tipos.

Los métodos de lixiviación se clasifican con base al tipo de interacción que tiene lugar en el sólido mineral y la solución lixivante, tal como se presenta a continuación:

- Lixiviación estática o por percolación.

Se caracteriza por no existir un movimiento relativo entre el sólido y la solución de lixiviación. El sólido permanece estático y la solución lo atraviesa, es decir, percola a través de la partícula mineral. La lixiviación estática se desarrolla a nivel comercial según tres modalidades distintas: lixiviación in situ, lixiviación en montones y lixiviación en estanques.

- Lixiviación in situ.

Mediante este método de lixiviación se solubilizan las especies mineralógicas valiosas existentes en un yacimiento sin necesidad de mover el mineral del lugar donde se encuentra. Se inyectan las soluciones lixiviantes directamente sobre la zona mineralizada. El método puede aplicarse a minas ya explotadas, con masas mineralizadas de baja ley, que no justifican económicamente un sistema de explotación convencional.

- Lixiviación en montones (Lixiviación tradicional de minerales de cobre)

Esta técnica es comúnmente empleada para lixiviación de minerales cobre en donde el mineral triturado hasta un tamaño adecuado ($44 \mu\text{m}$) e incluso sin triturar se apila en montones, formando un lecho estático a través del cual se hace percolar una solución lixivante de ácido sulfúrico que se añade al mineral de forma discontinua, alterándose los periodos de riego con los de sequedad.

Existen dos tipos de lixiviación por montones, el primer caso son los montones dump donde se tratan minerales que no han sido preparados en tamaño con un contenido metálico marginal es decir que no es suficiente para justificar una mínima



trituration. El segundo caso son los montones heap donde el mineral es preparado en tamaño y presenta un contenido metálico mayor el cual justifica pequeños gastos de trituración (Ballester et. al. 2013).

Una vez realizada la lixiviación mediante el uso de ácido sulfúrico como reactivo principal, los líquidos fértiles se percolan y son recogidos para ser tratados ya sea por cambio de ion, por extracción con solventes o incluso, en algunos casos, precipitando los metales directamente.

➤ Lixiviación en estanques.

Esta técnica de lixiviación es una forma sencilla y eficiente de poner en contacto el mineral con la solución de lixiviación. Se utiliza un principio de trabajo en contracorriente, aunque con el mineral estático. El mineral es tratado sucesivamente con concentraciones crecientes de la disolución de lixiviación la cual puede ser añadida en continuo o discontinuo, existen dos tipos de lixiviación en estanques, la primera de ellas se conoce como percolación ascendente, cuando la disolución lixivante entra al estanque por el fondo del mismo y lo abandona por la parte superior, siendo trabajado comúnmente en sistemas continuos en donde la disolución pasa a través de una serie de tanques.

Por otro lado, si la disolución entra tanto por el fondo como por la parte superior del estanque, pero es extraída por el fondo, el sistema se denomina percolación descendente, siendo el método más utilizado cuando se trabaja en sistemas discontinuos.

7.1.1.1 Lixiviación dinámica o con agitación.

Mediante esta técnica el mineral y la disolución de ataque están en movimiento relativo, donde el tamaño de partícula debe ser pequeño para facilitar la suspensión de la pulpa en el tanque de agitación.

Este proceso se lleva a cabo en continuo en series de 3-4 tanques con volúmenes variables, con un aumento de temperatura de hasta 60 °C



incrementando así la productividad de estos sistemas. Al trabajar con temperaturas superiores es preferible el uso de reactores a presión (autoclave) para evitar una excesiva evaporación. La lixiviación con agitación a presión atmosférica es el procedimiento más utilizado a escala industrial, llevándose a cabo mediante:

➤ Agitación mecánica

Para dar lugar a la lixiviación del mineral es importante el contacto íntimo entre este y la solución lixivante para lo cual se debe imprimir al líquido un movimiento tal que la velocidad del fluido sea superior a la de la caída libre de las partículas.

Para este tipo de agitación los reactores empleados consisten en una vasija cilíndrica y un dispositivo mecánico para propiciar la turbulencia adecuada en el sistema, mediante el uso de dos tipos de agitador: el de hélice marina y el de turbina.

➤ Agitación neumática

El movimiento de la pulpa se obtiene por la energía de expansión del aire comprimido inyectado en el vértice de la parte cónica inferior del reactor. La cantidad de gas que se debe introducir en un reactor para obtener distintos grados de agitación es variable de acuerdo al tipo de reactor y la pulpa tratada (Ballester et. al. 2013).

7.1.2 Química de la Lixiviación.

Las reacciones de lixiviación son de tipo: a) físico, b) químico y c) electroquímico, y para su realización a escala industrial se utilizan reactivos de muy distinta naturaleza: ácida o básica, en función del tipo de ganga que tenga el mineral (Ballester et. al. 2013).

7.1.2.1 Tipos de Reacciones

Las reacciones de lixiviación se clasifican en distintos grupos dependiendo la naturaleza del proceso que controle el mecanismo, es decir, pueden ser de



naturaleza física, química o electroquímica.

Las más importantes a nivel industrial, tanto a nivel cualitativo como cuantitativo, son las últimas dos, ya que la mayoría de diagramas de flujo que están implementados industrialmente incluyen una reacción de transferencia electrónica, generalmente oxidante.

A continuación, se analiza el mecanismo que hay detrás de las anteriores posibilidades:

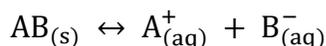
➤ Procesos físicos

Es el caso de la lixiviación de un sólido en agua sin que haya transformación química. Esta es la situación más simple que se puede presentar en lixiviación:

- El trabajo que se realiza para vencer las fuerzas electrostáticas y de otra naturaleza que mantienen los iones unidos en la red cristalina.
- La formación de iones hidratados por unión de los iones en disolución con las moléculas de agua.

➤ Procesos químicos

En este caso el sólido cristalino es solubilizado en una solución acuosa para contener un determinado ion. Entonces cuando un sólido cristalino AB se pone en contacto con agua, se establece el siguiente equilibrio con su correspondiente constante de equilibrio:



$$K = [A^{+}] [B^{-}]$$

El equilibrio se desplaza cuando la concentración de cualquiera de los iones



decrece lo cual supone que se disuelve más rápido. Lo anterior puede producirse por una reacción de neutralización o por la formación de un complejo. Un proceso controlado por la disolución química comprende:

- Un proceso químico en el que se establece un equilibrio entre el sólido y la fase acuosa.
- Una reacción química homogénea, junto a los reactivos presentes en la fase acuosa.

En este contexto, el sólido, al entrar en contacto con el agua, origina una disolución saturada estacionaria en las proximidades de su superficie. Cuando el reactivo seleccionado para el ataque es introducido en el agua, se difunde a través de la capa límite adyacente al sólido, donde procede a neutralizar o formar complejos con los iones presentes. En consecuencia, la concentración de los iones existentes disminuye, lo que favorece que nuevos iones abandonen la estructura cristalina del sólido y que haya más ataque.

La naturaleza del proceso varía según la velocidad de la reacción iónica en la capa límite. Si es rápida, el proceso está gobernado por la difusión de los reactivos químicos añadidos hasta el sólido, es decir, se tiene un proceso controlado por la difusión.

Por el contrario, si la reacción iónica es lenta, el proceso está controlado químicamente. Entonces, una reacción química en la que toman parte los sólidos puede estar gobernada por un proceso físico relacionado con la difusión de los reactivos a través de la capa límite (Ballester et. al. 2013).

➤ Procesos electroquímicos.

En la lixiviación de un gran número de compuestos de distinta naturaleza, donde se produce una transferencia electrónica, el mecanismo electroquímico es el más importante. Esto ocurre especialmente en los sulfuros y difiere de los procesos físicos y químicos en los siguientes puntos:



- El sólido es un conductor o un semiconductor, como en el caso de los sulfuros.
- Hay una transferencia de electrones desde la fase sólida hasta las especies reaccionantes, es decir, el proceso transcurre a través de un par de redox en el cual los iones o moléculas en disolución difunden hasta la superficie del sólido donde interaccionan con los electrones.
- Los sólidos se disuelven en ciertos puntos localizados, mientras que la transferencia electrónica tiene lugar en otros puntos distintos y separados de los primeros.
- Las reacciones de oxidación y reducción tienen lugar simultáneamente, pero cada una tiene sus propias características en cuanto al mecanismo cinético de control (químico o difusional).
- La velocidad de disolución es una función compleja de la concentración de los reactantes.
- La cinética de estas reacciones está influida por la presencia de defectos en la red. Son importantes las impurezas en disolución sólida, la presencia de distintas fases minerales y la presencia de distintos iones en disolución (Ballester et. al. 2013).

7.1.3 Reactivos.

Cualquier reactivo químico, que puede ser usado en un proceso de lixiviación debe cumplir con las siguientes características:

- Disolver las menas minerales con la rapidez suficiente para hacer comercialmente utilizable la reacción correspondiente. Pero al mismo tiempo debe ser inerte a los componentes de la ganga.
- Ser barato por su fácil obtención en grandes toneladas.



- Si es posible, se debe elegir de tal manera que facilite su regeneración en etapas posteriores del proceso hidrometalúrgico.

Los reactivos de lixiviación están clasificados de la siguiente manera: reactivos ácidos: los ácidos sulfúrico, clorhídrico y nítrico son los más utilizados.

- Reactivos básicos: la lixiviación en un medio básico se apoya sobre todo en disoluciones de reactivos de amoníaco, hidróxido sódico y carbonato sódico.
- Reactivos salinos: cianuros de sodio y potasio que, conjuntamente con el oxígeno, se utilizan para lixiviar los minerales de oro y/o plata. Además, sales sulfatadas y cloruradas de los iones férrico y cúprico que tienen una amplia utilización a escala industrial por su carácter oxidante.
- Reactivos gaseosos: los dos gases que comúnmente se utilizan en los procesos de lixiviación son el oxígeno, y en menor extensión el cloro (Ballester et. al. 2013).

7.1.3.1 Compuestos Orgánicos en la Disolución de Metales

Se ha reportado que los compuestos orgánicos tienen la capacidad de formar complejos estables con el oro, por lo cual estos reactivos se han convertido en una interesante alternativa a la cianuración (Perea et. al. 2016).

Dentro de los compuestos orgánicos más factibles para la lixiviación del oro se encuentran los alfa aminoácidos, los cuales se clasifican según su acidez o el número de grupos amino y carboxilo en tres grupos: (1) neutro (un amino y un carboxilo) como glicina, alanina, valina, leucina (2) ácida (un amino y dos carboxilos)

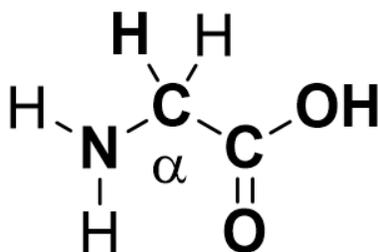


Figura 2. Estructura molecular base de un alfa aminoácido

grupos tales como ácidos aspárticos, ácido glutámico; (3) básico (dos grupos amino y un grupo carboxilo) tal como lisina e histidina (Finar et. al 1963 y Oraby et. al. 2015). En la Figura 2 se presenta la estructura general de los aminoácidos.

La glicina ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$) es el aminoácido más simple y tiene hidrógeno como cadena lateral al carbono alfa (Figura 3), la investigación sobre las propiedades termodinámicas de la glicina en soluciones acuosas es de gran importancia en las ciencias de la vida, el desarrollo biotecnológico y los procesos industriales (Haque et. al. 2017).

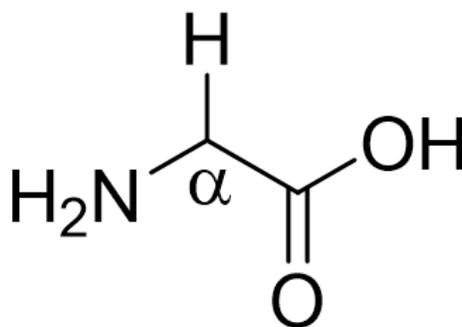


Figura 3. Estructura molecular de la glicina.

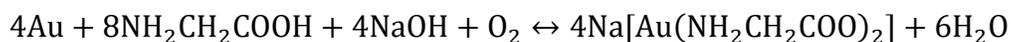
Éste es un reactivo no tóxico, no volátil y de bajo costo que se produce en grandes cantidades industriales para su uso en varias industrias. Puede producirse fácilmente industrialmente o derivarse como subproducto de diferentes microorganismos (González et. al. 2005).

La glicina y sus complejos de cobre, así como metales preciosos son estables en un amplio rango de pH, Eh y temperatura, además tiene una alta solubilidad en



agua de alrededor de 250 g/L a 25 °C, una masa molar de 75.07 g/mol y un punto de fusión de 233 °C (con descomposición) (Eksteen et. al. 2017), otra característica importante es que durante la separación sólido/líquido, la glicina se recupera y se recicla para lixiviar nuevamente.

Actualmente se realizaron investigaciones de lixiviación de oro y plata con glicina en presencia de peróxido de hidrógeno, demostrándose de esta manera la disolución de oro y plata, bajo condiciones neutras y alcalinas a temperaturas ambiente elevadas moderadas desde 23 °C a 60 °C. Los porcentajes de disolución de metales preciosos acrecentaron con el aumento de la concentración de glicina, la mayor presencia de contenido de plata y pH 11, la estequiometría de este proceso de disolución se describe en la siguiente ecuación (Oraby, 2015).



A pesar de que la glicina puede disolver el oro éste presenta mayor afinidad por el cobre, por lo que se ha evaluado la combinación cianuro-glicina con el fin de recuperar oro en menas con alto contenido de cobre, obteniendo como resultado que la presencia de éste mejora significativamente la velocidad de disolución de oro en soluciones que contienen especies de cobre. El porcentaje de disolución de oro en un sistema Cu-CN-glicina es aproximadamente 6.5 veces mayor que la velocidad de disolución de oro en la cianuración convencional, este comportamiento se mantiene hasta una concentración de glicina de 1 g/L y pH 12, por encima de estos valores genera un efecto adverso (Perea, 2016).

Se ha estudiado la glicina como lixivante potencial para minerales de cobre y oro de bajo grado a pH alcalino, empleando el método de botellas en rodillos, colocando los minerales de cobre en soluciones alcalinas de glicina, con una relación molar Glicina: Cobre de 4:1, pH inicial de la solución de 11 a 25 ° C. Las disoluciones de cobre de los minerales empleados de azurita, malaquita, cuprita, crisocola, cobre metálico, calcocita y calcopirita fueron 97, 90, 90, 19, 92, 42, 6%, respectivamente. Durante las pruebas cinéticas de lixiviación para malaquita,



calcocita y cupritas llevadas a cabo en un reactor de vidrio donde las variables de proceso podían controlarse, se encontró que se obtenían mayores extracciones de cobre, obteniendo hasta 99% de cobre metálico en solo 30 minutos. La lixiviación de una calcocita finamente molida resultó en 78% de extracción de Cu en 48 horas. La lixiviación de cuprita dio como resultado una extracción del 90% de Cu después de 96 horas (Chemuta et. al. 2017).

7.2 Termodinámica del Sistema Glicina.

Perea en 2016 realizó un estudio de análisis termodinámico para evaluar el comportamiento de los sistemas glicina y oro-glicina, en la Figura 4, se muestra el diagrama de distribución de especies químicas para la glicina a temperatura ambiente y la concentración establecida en su trabajo (0.5 M). Con esto el autor demostró que a pH alcalinos (10-14) incrementa la disociación de la glicina, logrando así la mayor fracción de concentración de glicinato disponibles para formar complejos.

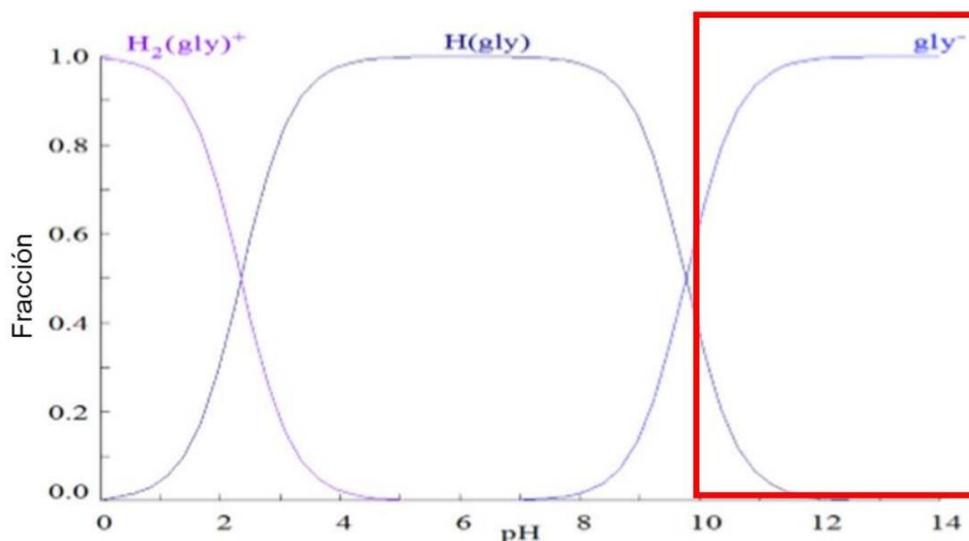


Figura 4. Diagrama de distribución de especies para el sistema Gli-H₂O a 25 °C [Gli] 0.5M y Eh [0.63].



7.3 Análisis Granulométrico.

El tamizado se puede definir como la técnica de clasificar partículas de una muestra en términos de su capacidad o incapacidad que presentan para pasar a través de un orificio de dimensiones regulares. La técnica consiste en colocar la muestra de polvo en la parte superior de un juego de tamices, uno debajo del otro con una secuencia de reducción sucesiva del tamaño del orificio de la malla.

Considerando lo anterior, el juego de tamices junto con la muestra se agita y las partículas con las dimensiones adecuadas pasarán a través de las diferentes mallas, reteniéndose sobre aquellas las partículas que presenten la capacidad de atravesarlas.

La relación entre el tamaño del orificio y el diámetro del alambre empleado definen el número de orificios por pulgada que se diferencian en cierta medida acorde a los diferentes estándares existentes como ASTM, USA y UE. La calibración del orificio de la malla se realiza usando un micrómetro óptico.

Los resultados del análisis granulométrico y su aproximación a la distribución real dependen fundamentalmente de la preparación de la muestra, la forma de las partículas y la técnica empleada. Independientemente del método o el conjunto de técnicas a emplear en el análisis granulométrico, es muy importante que la muestra analítica sea representativa respecto a su volumen total.

Es indudable que el muestreo, la manipulación y el procedimiento de la preparación de la muestra analítica pueden cambiar sus características físicas e inclusive las químicas debido a reacciones topoquímicas o mecanoquímicas durante el proceso de trituración y/o pulverización (Ballester et. al. 2013).

7.4 Sistemas oxidativos.

El permanganato de potasio (KMnO_4), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el ozono (O_3) se utilizan como agentes oxidantes en la lixiviación de metales en general:



7.4.1 Permanganato de Potasio (KMnO_4):

- **Función:** El permanganato de potasio se utiliza como un agente oxidante en la lixiviación de diversos metales, como el manganeso y el hierro. Actúa oxidando los minerales metálicos y convirtiéndolos en formas solubles en agua para su extracción.
- **Proceso:** En la lixiviación, se agrega KMnO_4 al mineral triturado o a la solución lixivante. El permanganato se reduce a iones de manganeso (Mn^{2+}), mientras que los minerales metálicos se oxidan y liberan los iones metálicos que luego se recuperan.
- **Ventajas:** El permanganato es un agente oxidante eficaz y es relativamente seguro de manejar (Solano et. al. 2016).

7.4.2 Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2):

- **Función:** El peróxido de hidrógeno se utiliza como agente oxidante en la lixiviación de varios metales, como el oro, el uranio y el níquel. Facilita la oxidación de minerales metálicos.
- **Proceso:** Se añade H_2O_2 al mineral o a la solución lixivante. El peróxido se descompone, liberando oxígeno que oxida los minerales metálicos, permitiendo la recuperación de metales.
- **Ventajas:** El peróxido de hidrógeno es una alternativa segura y efectiva a otros agentes oxidantes. Puede ser utilizado en condiciones alcalinas y temperatura mayor a la ambiental. (Dávila et. al. 2021)

7.4.3 Ozono (O_3):

- **Función:** El ozono se utiliza como un oxidante poderoso en la lixiviación de metales como el oro y el cobre. Su capacidad de oxidación lo hace útil para procesos de lixiviación selectiva.



- Proceso: El ozono se introduce en la pulpa de mineral o en la solución lixivante. Actúa directamente sobre los minerales metálicos, convirtiéndolos en formas solubles en agua.
- Ventajas: El ozono tiene una alta capacidad de oxidación y reacción rápida, lo que puede acelerar la lixiviación. Es una opción más respetuosa con el medio ambiente en comparación con algunos otros oxidantes. (Hernández et. al. 2019)

La elección del agente oxidante en la lixiviación de metales depende de la naturaleza del mineral, la velocidad de reacción requerida, las condiciones de procesamiento y otros factores. Cada agente tiene sus propias ventajas y desventajas, y su selección se basa en los objetivos específicos del proceso. Además, se debe tomar en cuenta las consideraciones de seguridad y ambientales al utilizar estos agentes oxidantes en operaciones de lixiviación.



8. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La metodología experimental del presente trabajo se dividió en cinco etapas: análisis granulométrico, caracterización de las muestras minerales, construcción de los diagramas termodinámicos, experimentos de lixiviación y caracterización de residuos sólidos. A continuación, se proporciona una descripción detallada de cada una de estas etapas.

La muestra mineral “MC” fue obtenida de la región de Santa María de La Paz, San Luis Potosí como donación de la empresa Negociación Minera Santa María de La Paz y Anexas S.A. de C.V. la cual, presenta una naturaleza multi metálica, con la presencia de cuprita. La segunda muestra denominada “MM”, corresponde a una muestra mineral proveniente del distrito minero de Mapimí, Durango, con contenido de malaquita.

En la primera etapa fueron homogeneizadas y cuarteadas las muestras minerales para obtener muestras representativas y llevar a cabo su análisis granulométrico, utilizando las siguientes mallas de la serie Tyler (60, 100, 140, 200, 270, 325 y 400).

Para cuantificar la distribución de cobre presente en cada uno de los pesos retenidos, se utilizaron muestras de 0.5 gr para la digestión ácida y su posterior análisis mediante la técnica de espectrofotometría de absorción atómica (EAA).

La segunda etapa consistió en la caracterización química mineralógica de las muestras mediante las siguientes técnicas:

Para cuantificar la concentración de cobre presente en las muestras se utilizaron las técnicas de ICP y EAA. Adicionalmente, para conocer otros elementos presentes se empleó la técnica de FRX. Por otro lado, a través de la difracción de rayos X se revelaron las fases mineralógicas presentes en las muestras. Finalmente, mediante microscopía electrónica de barrido y microanálisis de energía dispersiva se obtuvieron micrografías mostrando la morfología de las muestras y el



contenido elemental de las mismas.

En la tercera etapa, se elaboraron los diagramas termodinámicos del sistema Cu^{2+} - $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ - H_2O , considerando la identificación de las especies minerales presentes para establecer condiciones iniciales en los experimentos de lixiviación.

La cuarta etapa consistió en realizar las pruebas de lixiviación utilizando un reactor de fondo redondo, el cual se introdujo en un cristalizador con agua para garantizar una distribución homogénea del calor. Este arreglo se montó sobre una parrilla de calentamiento con agitación magnética.

En la Tabla 1, se muestran las condiciones variables utilizadas en las pruebas experimentales para evaluar los ambientes oxidantes en el sistema glicina.

Tabla 1. Condiciones variables experimentales.

Pruebas experimentales		
Reactivo	Solución lixivante	Concentración
Blanco	Mineral-Glicina	Glicina [M]: 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 1.5, 2
KMnO_4	Mineral-Glicina- KMnO_4	KMnO_4 [M]: 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.07, 0.1
H_2O_2	Mineral-Glicina- H_2O_2	H_2O_2 %: 0.5, 0.7, 1, 1.5, 2, 2.5, 3
O_3	Mineral-Glicina- O_3	O_3 L/min: 0.2, 0.5, 0.7, 1, 1.5, 2

En las Tablas 2 y 3 se presentan las condiciones constantes para las pruebas experimentales en el sistema antes mencionado.

Tabla 2. Condiciones constantes experimentales para experimentos preliminares

Constantes	
RPM	800
Volumen	300 ml
Muestra	0.5 g
Temperatura	30 °C
Tiempos de reacción (hr)	4
Tiempos de extracción de alícuotas (min)	15, 30, 60, 90, 120, 180, 240
pH	11



Tabla 3. Condiciones constantes experimentales con ambientes oxidantes.

Constantes	
RPM	800
Volumen	300 ml
Muestra	0.1 g
Temperatura	30 °C
Tiempo de reacción (hr)	4
Tiempos de extracción de alícuotas (min)	5, 10, 20, 40, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240
pH	10

Para dar seguimiento al avance de la lixiviación de cobre a partir de las muestras minerales con solo glicina se tomaron alícuotas a diferentes intervalos de tiempo en un periodo de 4 horas, las cuales fueron analizadas por la técnica de EAA. Los licores obtenidos de estas pruebas fueron analizados mediante FTIR para corroborar la formación del complejo diglicinato de cobre.

Considerando lo anterior, se realizaron los experimentos de lixiviación en medio alcalino utilizando O_3 , $KMnO_4$ y H_2O_2 como agentes oxidantes a diferentes concentraciones, tal como se describe en la Tabla 1.

En la quinta etapa se caracterizaron los residuos sólidos de la lixiviación por la técnica de MEB-EDS donde, mediante la obtención de micrografías, se logró observar la morfología y el tamaño de las partículas resultantes, por otro lado, el microanálisis de rayos X permitió determinar el contenido de los algunos elementos presentes en dichos residuos.

A continuación, en el diagrama general (Figura 5) se presenta una esquematización de la metodología utilizada en el proyecto de disolución de cobre a partir de las muestras MC y MM.

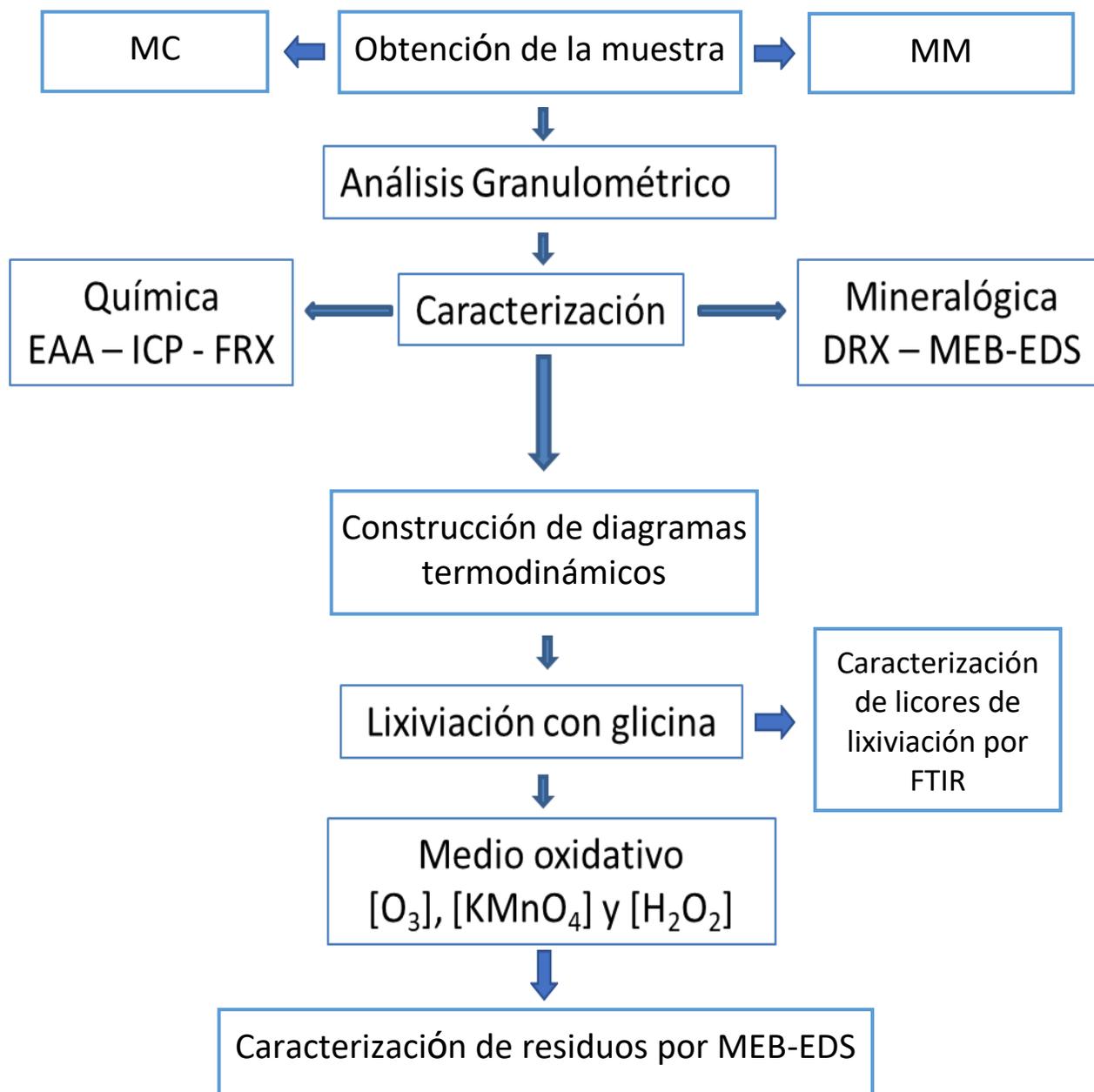


Figura 5. Esquema del desarrollo experimental.

8.1 Análisis granulométrico y determinación del contenido de cobre

Para obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en las muestras minerales, se realizó un análisis granulométrico por vía húmeda, donde se contemplaron las mallas 60, 100, 140, 200, 270, 325 y 400. Se pesaron en una balanza analítica 100 y 30 g para las muestras MC y MM respectivamente.



Las muestras minerales fueron colocadas por separado sobre los tamices y se lavaron con agua a presión moderada hasta que ya no se logró identificar partículas de mineral que pudieran atravesar la malla, los pesos retenidos fueron pesados y se utilizaron para determinar el contenido de cobre presente en cada fracción.

Para la digestión de las fracciones retenidas se tomó un vaso de precipitado donde se colocó 0.5 g de muestra, al que se le añadieron 10 mL de una combinación de ácido perclórico, clorhídrico, sulfúrico y nítrico, y agua desionizada, colocados sobre una parrilla de calentamiento a 150 °C hasta que la muestra fue completamente digerida, finalmente se dejó enfriar durante 20 minutos. La solución final fue filtrada y aforada a 100 mL y analizada por la técnica de EAA.

8.2 Caracterización química y mineralógica de las muestras minerales MC y MM.

A continuación, se muestra el fundamento básico de las técnicas químicas y microscópicas de caracterización utilizadas en el presente estudio.

8.2.1 Espectrometría de Absorción Atómica (EAA).

Esta técnica es sumamente específica, ya que las líneas de absorción atómica son estrechas de entre 0.002 nm a 0.005 nm y las energías de transición electrónicas son únicas para cada elemento, por tal motivo fue empleada para cuantificar el contenido de cobre presente en las muestras minerales y para dar seguimiento al avance de reacción en las pruebas de lixiviación, es decir la disolución de cobre a través del tiempo.

Dicho análisis se llevó a cabo utilizando un Espectrofotómetro de Absorción Atómica marca Perkin Elmer 2380, utilizando una flama de aire acetileno según las condiciones requeridas para el elemento a analizar (Rocha, 2000).

8.2.2 Fluorescencia de Rayos X (FRX).

La técnica de Fluorescencia de Rayos X es un fenómeno en el cual, mediante la incidencia de Rayos X, se genera un haz secundario de Rayos X fluorescentes,



característico de cada elemento, la medición de su energía determina al elemento que lo emitió y la intensidad de los fotones indica la concentración de cada elemento.

El estudio se realizó de manera cualitativa y cuantitativa con el objetivo de conocer la clasificación y concentración de cada elemento como mayoritario, minoritario o traza. Para este estudio se utilizó un equipo portátil de la marca Bruker, Modelo Titan S1, el cual, utiliza un espectro-membranas de la marca Chemplex, cabe señalar que la corrida que se utilizó fue de suelos y geoquímica.

8.2.3 Análisis Químico por Espectrometría de Emisión de Plasma Acoplada por Inducción (ICP).

Esta técnica se basa en la emisión de fotones desde los iones y átomos que han sido excitados. La muestra sólida debe ser preparada en forma de solución para ser introducida continuamente al canal central de plasma, donde los analitos son ionizados y atomizados generando espectros de emisión atómicos de líneas características. Las longitudes de onda de los fotones se utilizan para determinar los elementos de los cuales fueron originados y finalmente los datos obtenidos son procesados por el sistema informático (Contreras et. al. 2015).

El equipo empleado para corroborar el contenido de cobre presente en las muestras minerales fue un espectrómetro Perkin Elmer 8300.

8.2.4 Análisis por Difracción de Rayos X (DRX).

Este método consiste en el bombardeo de Rayos X a una muestra para la identificación cualitativa de compuestos cristalinos. La preparación de la muestra involucra una disminución en tamaño para después ser compactada y acoplada a un dispositivo giratorio con el objetivo de orientar los granos en distintas direcciones (Pérez, 2012).

Lo más interesante de esta técnica en cuanto a la caracterización de polvos minerales y por lo cual fue empleada en este proyecto, es que la información se



refiere únicamente a la composición mineralógica y no a la composición elemental (Cowley, 1981).

El análisis de los polvos minerales se realizó con un difractómetro de Rayos X “D8-Advance” en el rango de 4° - 90° , ángulo 2θ , a una velocidad de 8° por min. La identificación de fases se llevó a cabo con el software Match y DiffracEVA 5.1.

8.2.5 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y Microanálisis de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS).

El microscopio electrónico de barrido es empleado para el examen y análisis de características microestructurales de muestras sólidas. Esta técnica permite observar resultados en alta definición (de 20 a 50 Å) y en apariencia tridimensional, debido a la excelente profundidad de campo.

Por lo cual esta técnica es fundamental para la caracterización morfológica. Por su parte, el microanálisis de rayos X (EDS) utiliza un detector de Rayos X dispersivo en energías es capaz de brindar información composicional de manera rápida y eficiente (Kyung et. al. 2013).

Para los análisis de morfología y composición química de las muestras minerales montadas sobre un porta muestras con cinta de carbono y recubrimiento de oro, se utilizó un microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo IT-300, con un voltaje de 30 KV a diferentes magnificaciones con electrones secundarios y retrodispersados.

8.3 Construcción de diagramas termodinámicos

De acuerdo con las especies minerales de cobre identificadas mediante DRX y el ligando orgánico propuesto para el sistema de lixiviación ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$), los diagramas termodinámicos se realizaron con dos elementos metálicos (Cu y Fe) y cuatro no metálicos (C, S, H y O_2), construyendo diagramas de Pourbaix y distribución de especies a temperatura de los 25 a 60°C , variando la concentración del elemento metálico de interés y el agente lixivante con la finalidad de establecer un marco de referencia del comportamiento de estos elementos en el sistema



acuoso. Los softwares utilizados fueron Medusa-Hydra y HSC Chemistry 6.0.

8.4 Pruebas Experimentales de Lixiviación.

Para llevar a cabo los experimentos de lixiviación de cobre se montó un reactor de vidrio sobre una parrilla de calentamiento marca Thermo Scientific modelo Super- Nouva como se muestra en la Figura 6.

Se aplicó una agitación a 800 RPM en un volumen de 300 mL de agua desionizada introducida en el reactor, el cual está ubicado dentro de un cristalizador, Figura 6. La inyección de ozono se realizó mediante un generador de ozono y un difusor, con diferentes tasas de flujo. Para el peróxido de hidrógeno, se prepararon soluciones con distintos porcentajes de concentración. En cuanto al tercer sistema, el permanganato de potasio se añadió en estado sólido, lo que dio lugar a soluciones con diversas molaridades. El pH se ajustó mediante la adición controlada de NaOH, monitoreando el medio constantemente.

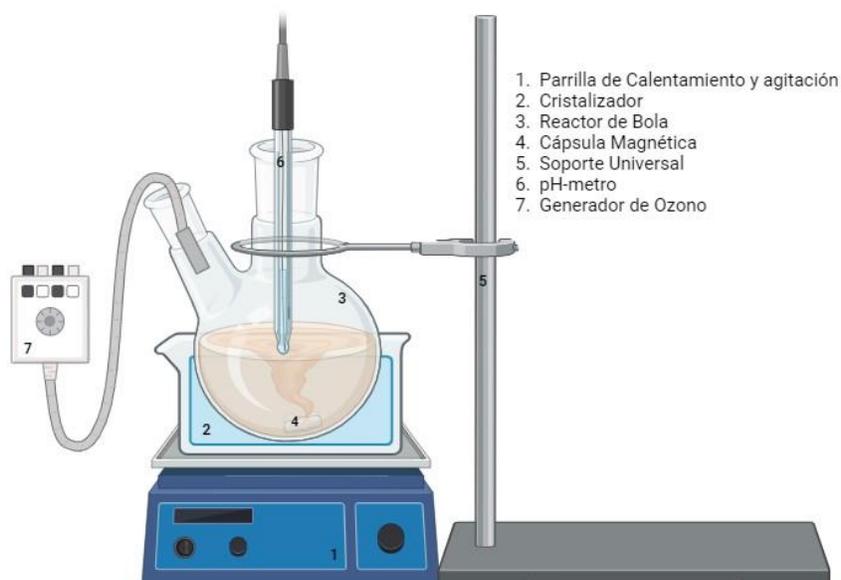


Figura 6. Diagrama del equipo utilizado en las pruebas experimentales.

La muestra inicial, denominada "muestra cero," se obtuvo previa a iniciar la reacción, es decir, antes de que las muestras minerales entraran en contacto con la solución lixivante. Una vez iniciada la reacción, se tomaron alícuotas en diferentes



intervalos de tiempo para seguir la evolución de la reacción mediante la medición de la concentración de cobre lixiviado.

8.5 Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR)

El uso de espectrofotómetros de luz infrarroja (IR) convencionales con monocromador dificultan el acceso a la región de 10 a 400 cm^{-1} (IR lejano), a causa de esta deficiencia se desarrolló la Espectroscopía de Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR).

Esta técnica permite un barrido extenso por toda la región de IR medio y lejano. La medición de un solo espectro es mucho más rápida a través de esta técnica, en comparación con otras técnicas de espectroscopía infrarroja, debido a que la información de todas las frecuencias se toma al mismo tiempo, es decir que en lugar de registrar los datos variando la frecuencia de luz infrarroja monocromática, se guía la luz con todas sus longitudes de onda través de un interferómetro. Después de pasar por la muestra, la señal medida genera el espectro. La realización de una transformada de Fourier de la señal produce un espectro idéntico al de la espectrometría infrarroja convencional o dispersiva.

Esto permite hacer múltiples lecturas de una sola muestra y obtener un promedio, lo que aumenta la sensibilidad del análisis (Svanberg et. al. 1992). En el presente estudio empleado para comprobar la formación del complejo diglicinato de cobre, se utilizó un espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier modelo Optima 8300.

8.6 Reactivos y Dispositivos Experimentales.

Para el desarrollo del presente trabajo, se utilizó cristalería grado A (material volumétrico) así como también material estándar de laboratorio (Tabla 4). Para la preparación de soluciones, análisis químicos y las pruebas experimentales se utilizó agua desionizada; los reactivos empleados para los sistemas propuestos se enlistan en la Tabla 5.



Tabla 4. Dispositivos utilizados para la lixiviación de cobre.

Dispositivo	Marca	Modelo y especificaciones
pH metro	Thermo Scientific	Orion Star A211, pH/mV/°C/°F meter
Parrilla de calentamiento	Thermo Scientific	Super Nouva, Temperatura/Agitación
Electrodo	Thomas Scientific	pH Electrode, pH/mV
Agitador magnético	Sprinbor	Magnetic Stirring Bars, Polygon 3.5 cm
Generador de ozono	O ₃ Generator	Wish-Ozone168A

Tabla 5. Reactivos utilizados en la lixiviación de Cobre.

Reactivo	Fórmula	Pureza	Marca
Hidróxido de Sodio	NaOH	98.7%	Meyer
Glicina	NH ₂ CH ₂ COOH	99%	Meyer
Permanganato de Potasio	KMnO ₄	99.6%	Meyer
Ozono	O ₃	99%	O ₃ Generator
Peróxido de Hidrógeno	H ₂ O ₂	Solución al 3%	Jaloma



9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

9.1 Caracterización de las Muestras Minerales.

Bajo las condiciones descritas en el procedimiento experimental, a continuación, se presenta la información generada de la caracterización de las muestras MC y MM, lo que incluye:

- Concentración de cobre
- Composición de los minerales, incluyendo los elementos minoritarios y trazas en solución sólida.
- Tamaño de partícula de los minerales y su interrelación.

Debido a que, en la actualidad, no existe una técnica general que ofrezca toda esta información se hizo uso de la combinación de las siguientes técnicas:

- Análisis granulométrico
- Análisis químico por espectrofotometría de absorción atómica (EAA)
- Fluorescencia de rayos X (FRX).
- Análisis químico por espectrometría de plasma de inducción acoplada (ICP)
- Difracción de rayos X (DRX).
- Microscopia electrónica de barrido (MEB)

9.1.1 Caracterización Química de las Muestras Minerales.

9.1.1.1 Análisis químico granulométrico.

A continuación, se presentan de manera gráfica los resultados de la distribución granulométrica de la muestra MC (ver Tabla 6 y Figura 7) realizado mediante la técnica de EAA, donde se observa la concentración de cobre contenida en las mallas de la serie Tyler. Destacando que la mayor distribución de cobre se encontró en la abertura perteneciente a la malla 60 con una ley de 4.568% y descartando la



malla <400 por tratarse de partículas finas (menores a 37 micras) sin embargo, el contenido de cobre fue diferente en cada una de las muestras a diferentes tamaños de malla, por lo tanto, la muestra MC es considerada heterogénea, por lo que se decidió emplear el todo uno de la muestra para las pruebas de lixiviación con la intención de presentar condiciones cercanas a la práctica industrial.

Tabla 6. Contenido de cobre por malla de la muestra MC.

Número de malla	Abertura (micras)	Peso retenido (g)	% retenido	Ley de Cu %	Contenido de cobre %	Porcentaje de distribución
+60	250	39.38	39.38	11.6	4.56	37.68%
-60+100	149	3.88	3.88	12.4	0.481	3.97%
-100+140	105	1.76	1.76	13.9	0.244	2.02%
-140+200	74	8.60	8.60	13.5	1.161	9.58%
-200+270	53	6.70	6.70	13.3	0.891	7.35%
-270+325	44	4.68	4.68	12.9	0.604	4.98%
-325+400	37	4.83	4.83	12.7	0.613	5.06%
-400	<37	30.17	30.17	11.8	3.56	29.37%

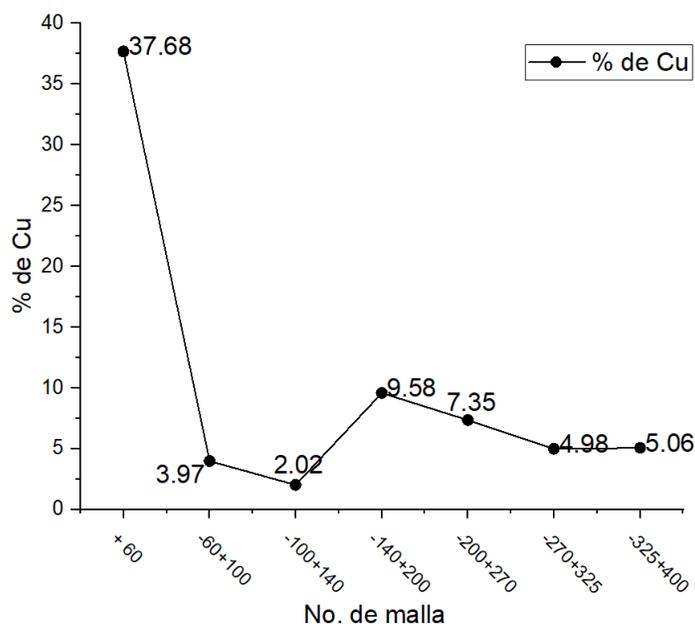


Figura 7. Distribución de Cu (%) con respecto al número de malla, muestra MC.



La Tabla 7 y la Figura 8 muestran el análisis granulométrico para la muestra MM, donde se observa la mayor concentración de cobre en la malla +100 correspondiente a un tamaño de partícula de 149 micras con un contenido de 9.06%, sin embargo, dicha muestra presenta contenidos heterogéneos por lo cual, igual que en el caso anterior se determinó emplear el todo uno del MM para las pruebas de lixiviación, dicha muestra tiene una concentración general del metal de interés de 21.3%. Cabe destacar que tanto el análisis granulométrico como el análisis de la muestra MM fueron realizados por la técnica de EAA.

Tabla 7. Contenido de cobre por malla de la muestra MM

Número de malla	Abertura (micras)	Peso retenido (g)	% retenido	Ley de Cu %	Contenido de cobre %	Porcentaje de distribución
+100	149	11.92	42.57	21.3	9.06	46.25%
-100+140	105	1.84	6.57	22.4	1.471	7.51%
-140+200	74	1.43	5.10	19.9	1.014	5.18%
-200+270	53	1.75	6.25	19.1	1.193	6.09%
-270+325	44	0.38	1.36	18.3	0.248	1.27%
-325+400	37	1.1	3.93	18.4	0.723	3.69%
-400	<37	9.58	34.22	17.2	5.885	30.02%

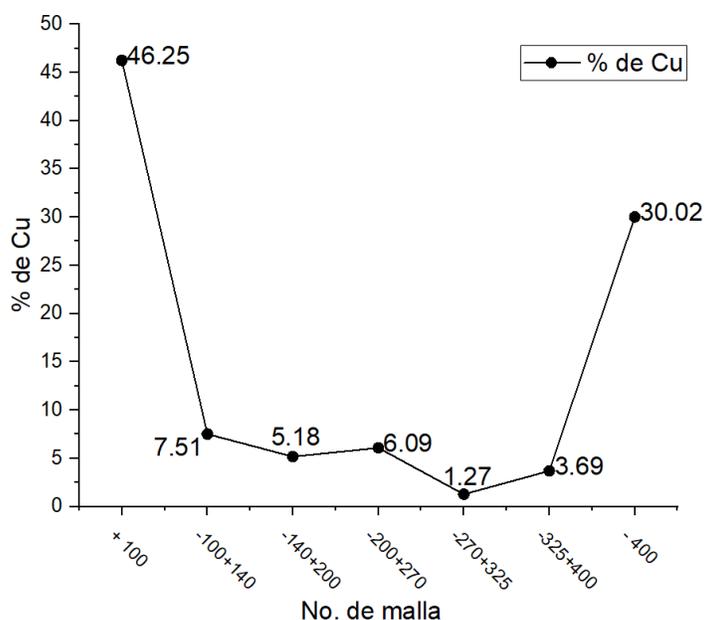


Figura 8. Distribución de Cu (%) con respecto al número de malla, muestra MM.



9.1.1.2 Espectrofotometría de Absorción Atómica.

Se llevó a cabo la caracterización química de las muestras minerales con el propósito de determinar la concentración de cobre presente. Los resultados obtenidos mediante la técnica de EAA se presentan en la Tabla 8, donde se detalla la concentración de cobre en las muestras MC y MM, ambas sometidas a un proceso de digestión ácida por triplicado para su análisis.

Tabla 8. Contenido de cobre presente en las muestras minerales MC y MM por la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica.

	MC	MM
Contenido de Cobre (%)	12.5	21.34

9.1.1.3 Fluorescencia de Rayos X.

Para complementar la caracterización química, se aplicó la técnica de FRX con el método geoquímico para analizar las muestras minerales. La Figura 9 presenta los resultados obtenidos a partir de la muestra MM. Destaca un valor significativo para este estudio de 21.6% de Cu, el cual es consistente con los resultados obtenidos por ICP y EAA, dichas técnicas revelaron contenidos de cobre del 21.6 y 21.34% respectivamente. También se identificó un alto contenido de hierro de 27.76%, atribuible a la presencia de minerales como la hematita y goetita, mientras que el Al, Si, S, Ca, Zn, As y Pb están presentes en concentraciones menores.

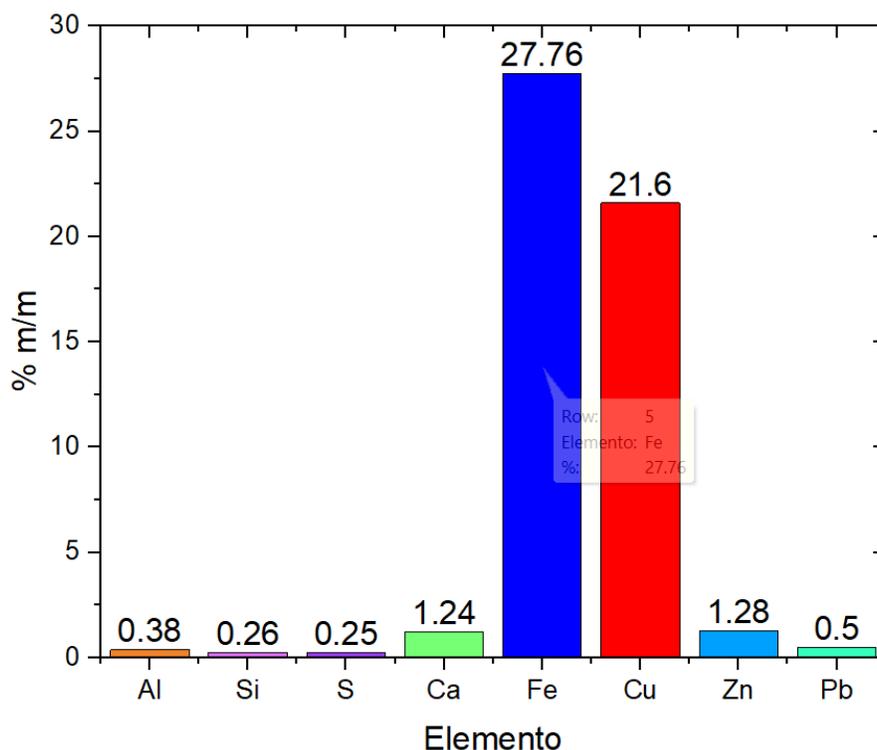


Figura 9. Contenido elemental muestra MM, Fluorescencia de Rayos X.

La muestra MC fue analizada por el mismo método (Figura 10), confirmando el contenido de cobre obtenido mediante las técnicas de ICP y EAA, que registraron un valor del 13.93%. Este resultado está asociado principalmente a la presencia de la especie mineral cuprita. Además, se observó un notable porcentaje de hierro, alcanzando un 35.91%, relacionado a óxidos de hierro como la goetita y la hematita. Se detectó también una presencia significativa de calcio, con un 4.78%, atribuido a la existencia de calcita en la muestra mineral. Por último, se identificaron otros elementos presentes en concentraciones menores, como Al, Si, S, Zn, Pb.

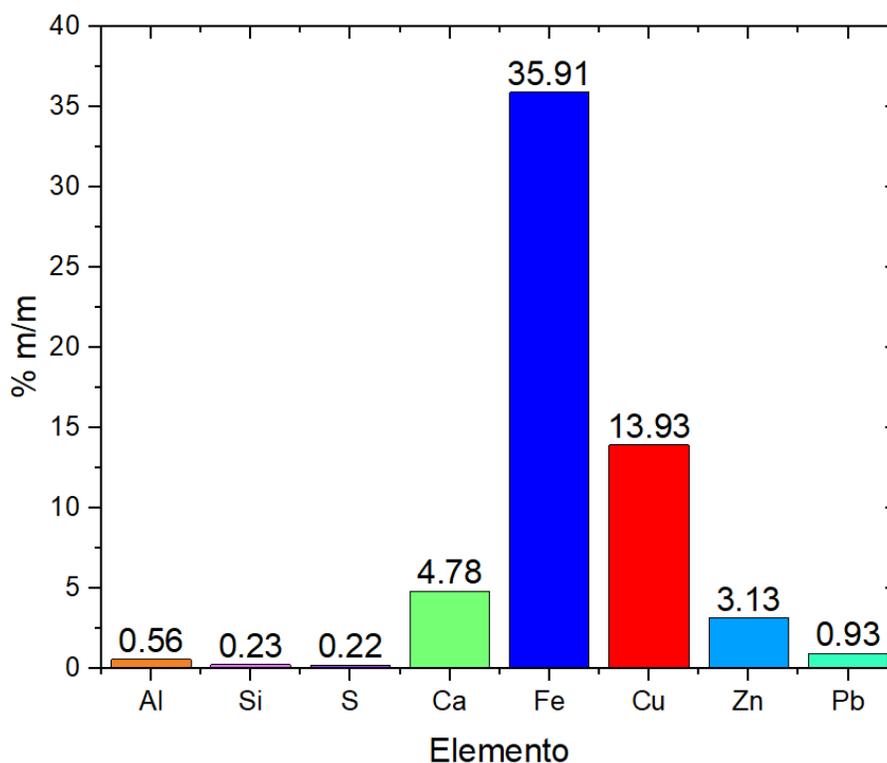


Figura 10. Contenido elemental muestra MC, Fluorescencia de Rayos X.

9.1.1.4 Espectrometría de Emisión de Plasma Acoplada por Inducción

La Tabla 9 muestra la caracterización química realizada a las muestras MC y MM por la técnica de ICP, observándose valores de cobre similares a los obtenidos por EAA, cabe resaltar que, de acuerdo con los valores previamente reportados en otros estudios el contenido de cobre presente en la muestra se encuentra dentro de un rango considerable para representar una fuente de extracción factible (Garzón, 2018). Además, se observaron valores de cobre similares a los reportados en la zona en estudios anteriores (López et. al. 2009).

Tabla 9. Contenido de cobre presente en las muestras MC y MM por la técnica de espectrometría de Emisión de Plasma Acoplada por Inducción.

	MC	MM
Contenido de Cobre (%)	12.7	21.6



9.1.2 Caracterización Mineralógica de las Muestras Minerales.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de técnicas de caracterización mineralógica.

9.1.2.1 Difracción de Rayos X (DRX).

La característica principal de un yacimiento rentable de cobre radica en la concentración y calidad del mineral presente. Estos yacimientos albergan diversas especies minerales con concentraciones significativas de cobre, siendo la cuprita una de las más relevantes por su alta concentración, considerada como una de las principales fuentes de este metal (Torres et. al. 2021).

Para los análisis de DRX, se identificaron las especies presentes en las muestras junto con sus correspondientes Crystallography Open Database (COD).

En la Figura 11, se identificaron especies metálicas correspondientes a un óxido de cobre, conocido como cuprita (Cu_2O) JCPD S00-005-0667. Se observó, además, la presencia de calcita (CaCO_3) JCPD S01-071-3699 como matriz del mineral, junto con otras asociaciones minerales como goetita ($\text{FeO}(\text{OH})$) JCPD S01-081-0462, hematita (Fe_2O_3) JCPD S00-024-0072 y vesuvianita ($\text{Ca}_{10}\text{Al}_4(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{Si}_9\text{O}_{34}(\text{OH})_4$) JCPD S00-011-0145, que representan fuentes significativas de hierro en la muestra. Por último, se identificó la paradsasvarita ($(\text{Zn},\text{Cu})_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$) JCPD S00-067-0404, como una fuente adicional del metal de interés.

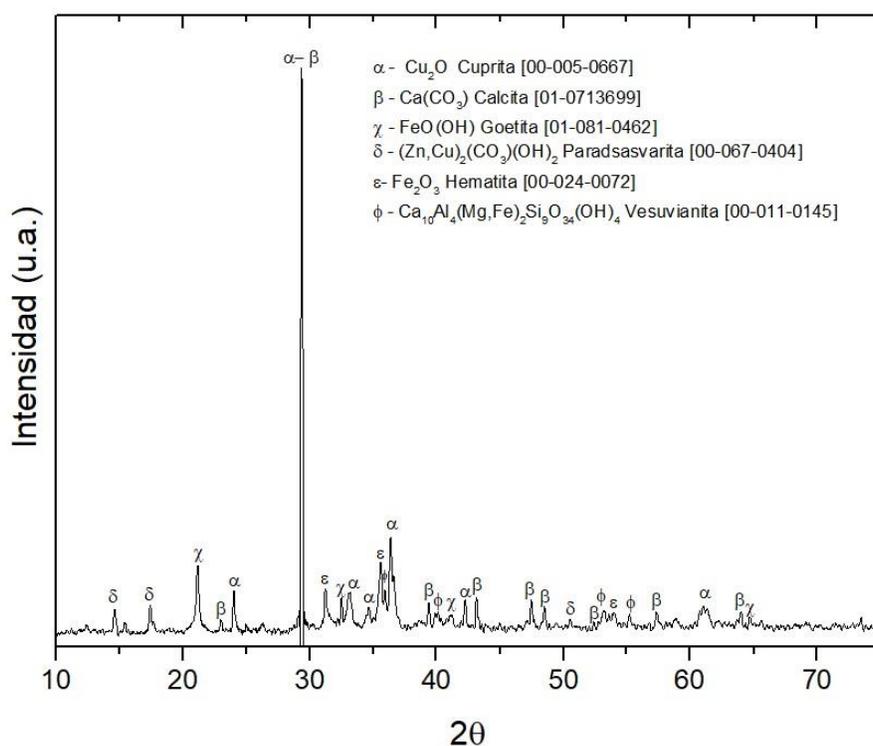


Figura 11. Difractograma de Rayos X correspondientes a la muestra MC.

La muestra MC reveló una composición mineral diversa (Figura 11), destacando la presencia de minerales clave en la extracción y procesamiento del cobre, lo que refuerza su importancia en la viabilidad de los yacimientos de cobre tipo óxidos.

El difractograma obtenido de la muestra MM permitió establecer la presencia de especies correspondientes a carbonatos de cobre, identificados como malaquita ($\text{CuCO}_3(\text{OH})_2$) [00-010-0399] y mcguinnessita ($(\text{Mg,Cu})_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$) JCPD S00-035-0481, lo que confirma la riqueza de estos compuestos en la muestra, por otro lado, se observó la presencia de un mineral tipo sulfosal de cobre denominado como tetraedrita ($\text{Cu}_{14}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$) JCPD S00-042-0560. Finalmente, se identificaron algunas otras asociaciones minerales como goetita ($\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$) JCPD S00-017-0535, hematita (Fe_2O_3) JCPD S00-024-0072 y calcita (CaCO_3) JCPD S96-901-6707, como se observa en la Figura 12.

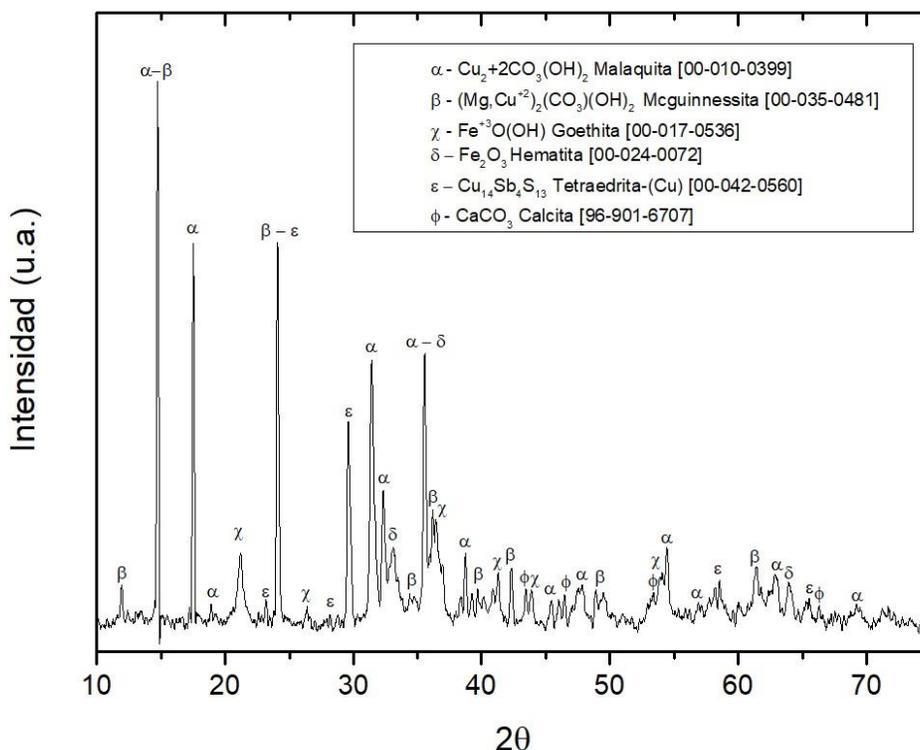


Figura 12. Difractograma de Rayos X correspondiente a la muestra MM.

Este análisis revela una variedad de especies minerales presentes en la muestra MM, incluyendo importantes compuestos de cobre, lo cual destaca la diversidad mineralógica y la relevancia del contenido de cobre en dicha muestra.

9.1.2.2 Caracterización por Microscopía Electrónica de Barrido – Microanálisis de Energía Dispersiva de Rayos X (MEB-EDS).

9.1.2.2.1 Muestra MC

En las micrografías correspondientes a la muestra MC (Figuras 13 b y d), se identificaron partículas con una morfología irregular, bordes bien definidos, textura rugosa y diferentes tamaños. A partir de los espectros (Figuras 13 a y c) obtenidos por microanálisis EDS acoplado al microscopio electrónico con colector de rayos X, se confirmó la presencia de fases minerales correspondientes a estructuras

cristalinas que contienen los siguientes elementos: Cu, Al, Fe, O, Ca, Cu, Si y Zn.

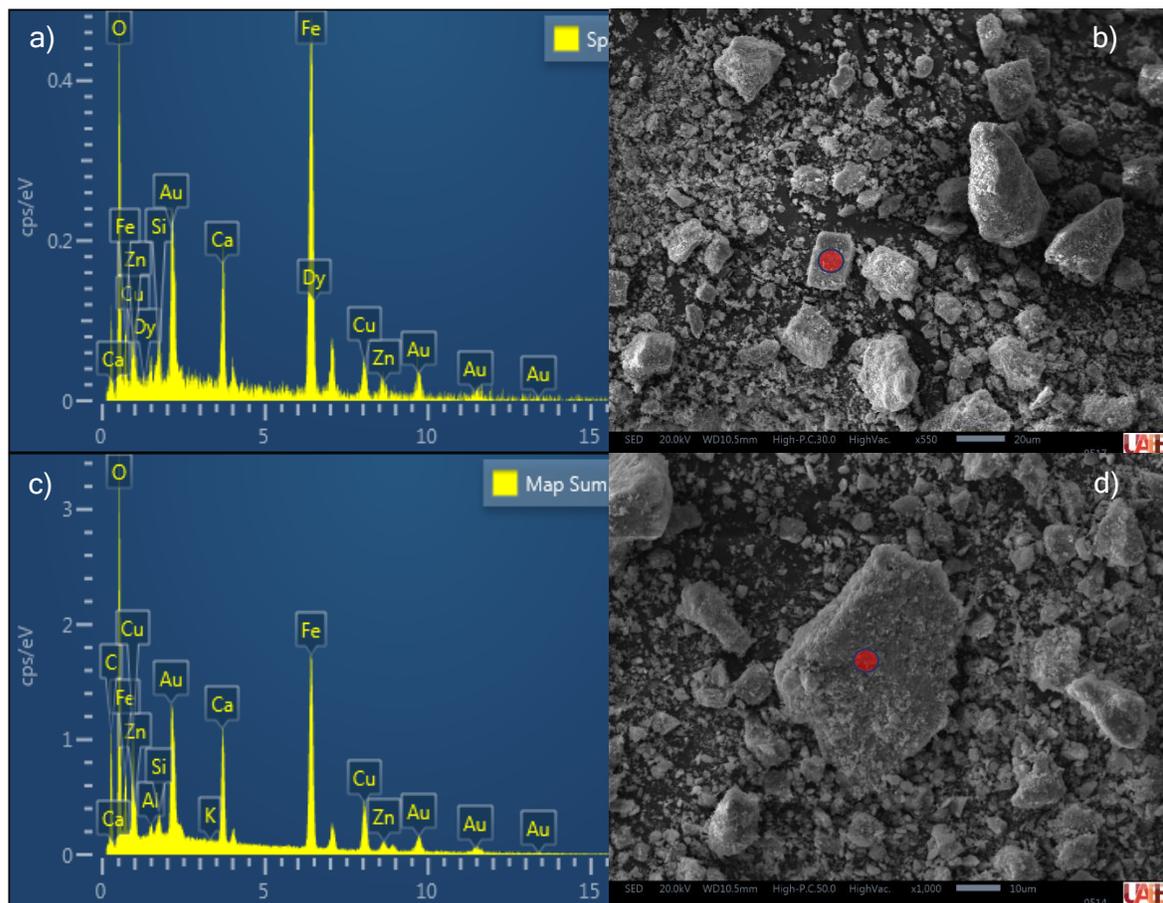


Figura 13. Fotomicrografías de MEB (b y d) y espectros EDS (a y c) correspondientes a la muestra MC.

Por otra parte, se llevaron a cabo análisis puntuales en diversas áreas de la muestra, utilizando electrones secundarios y retrodispersados, donde se obtuvieron espectros (Figuras 13 a y c) que contienen los elementos de especies minerales previamente identificadas por DRX, tales como cuprita (Cu_2O), calcita ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$) hematita (Fe_2O_3) y goetita ($\text{FeO}(\text{OH})$) además de una especie mineral ganga denominada vesuvianita ($\text{Ca}_{10}\text{Al}_4(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{Si}_9\text{O}_{34}(\text{OH})_4$).

Este estudio no solo confirma la presencia de cuprita en la muestra, sino que también identifica componentes de otras especies minerales, proporcionando una comprensión detallada de la composición mineralógica de la muestra analizada.

9.1.2.2.2 Muestra MM

Las microfotografías tomadas de la muestra MM se presentan en las figuras 14 b y d. Estas imágenes revelan una superficie rugosa con grietas presentando diferentes tamaños de partícula al ser la muestra todo uno, compuesta por Fe, O, Ca, Cu y C, de acuerdo, con la identificación de picos del espectro dado por el microanálisis de Rayos X mostrado en las Figuras 14 a y c. Cabe señalar que estos hallazgos concuerdan con los resultados obtenidos mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX).

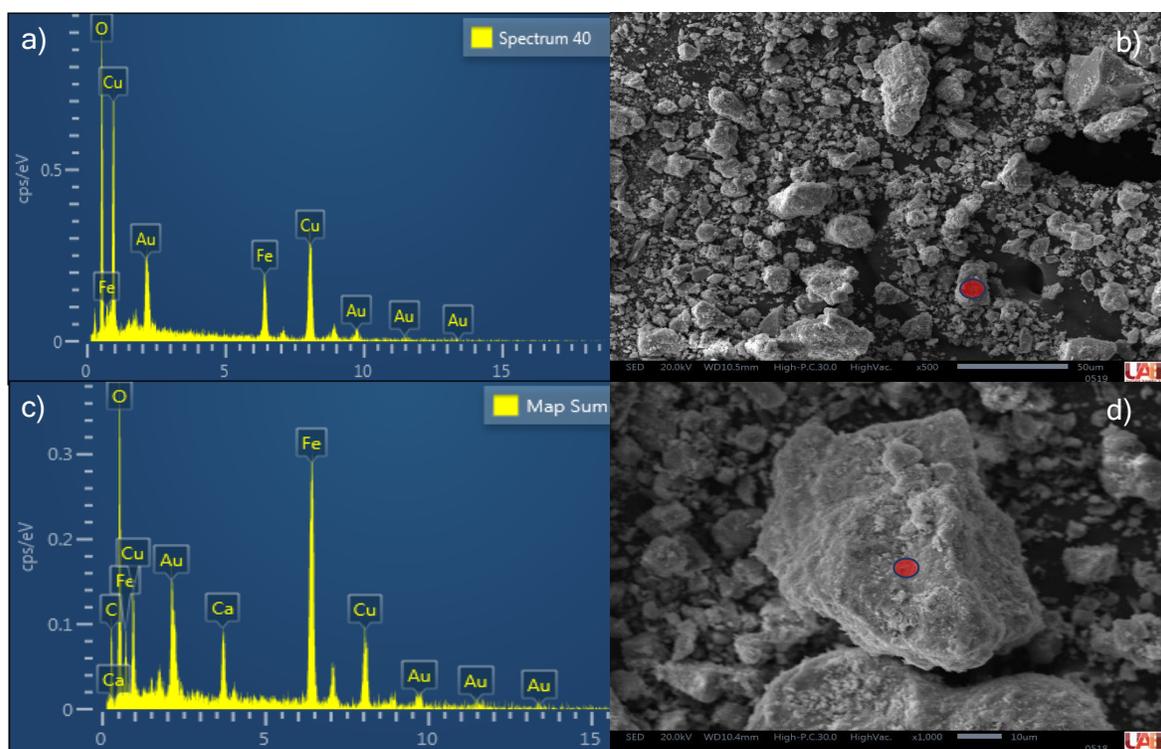


Figura 14. Fotomicrografías de MEB (b y d) y espectros EDS (a y c) correspondientes a la muestra MM.



Se llevaron a cabo análisis detallados en distintas áreas de la muestra utilizando electrones secundarios y retrodispersados, los espectros obtenidos (Figuras 14 a y c) reflejaron la presencia de elementos que conforman las especies minerales malaquita ((CuCO_3) $\text{Cu}(\text{OH})_2$), calcita ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$) hematita (Fe_2O_3) y goetita ($\text{FeO}(\text{OH})$).

El estudio minucioso de las micrográficas y los espectros EDS ha permitido caracterizar la morfología y composición de la muestra MM, lo cual sugiere la presencia de la especie mineral malaquita y otras fases asociadas, estos resultados se alinean de manera consistente con los resultados obtenidos mediante la técnica de DRX.

9.2 Diagramas termodinámicos del sistema Gli-Mineral

La elaboración de diagramas de Pourbaix, se llevó a cabo considerando concentraciones saturadas de los elementos que conforman la química del sistema base. Estos diagramas se construyeron a diferentes temperaturas, abarcando un rango de 25 a 60 °C, con el objetivo de examinar la variación en condiciones térmicas.

Los resultados obtenidos de los diagramas basados en el sistema Gli-Muestra mineral indican la formación del complejo $\text{Cu}(\text{Gli})_2$. Además, se constató que la temperatura no ejerce influencia en la formación de dicho complejo en el rango de 25 a 60 °C y al no observarse la formación de hierro-glicina, se determinó que no se presenta competencia respecto al cobre para la formación del complejo de interés, como se detalla en las Figuras 15 a-c.

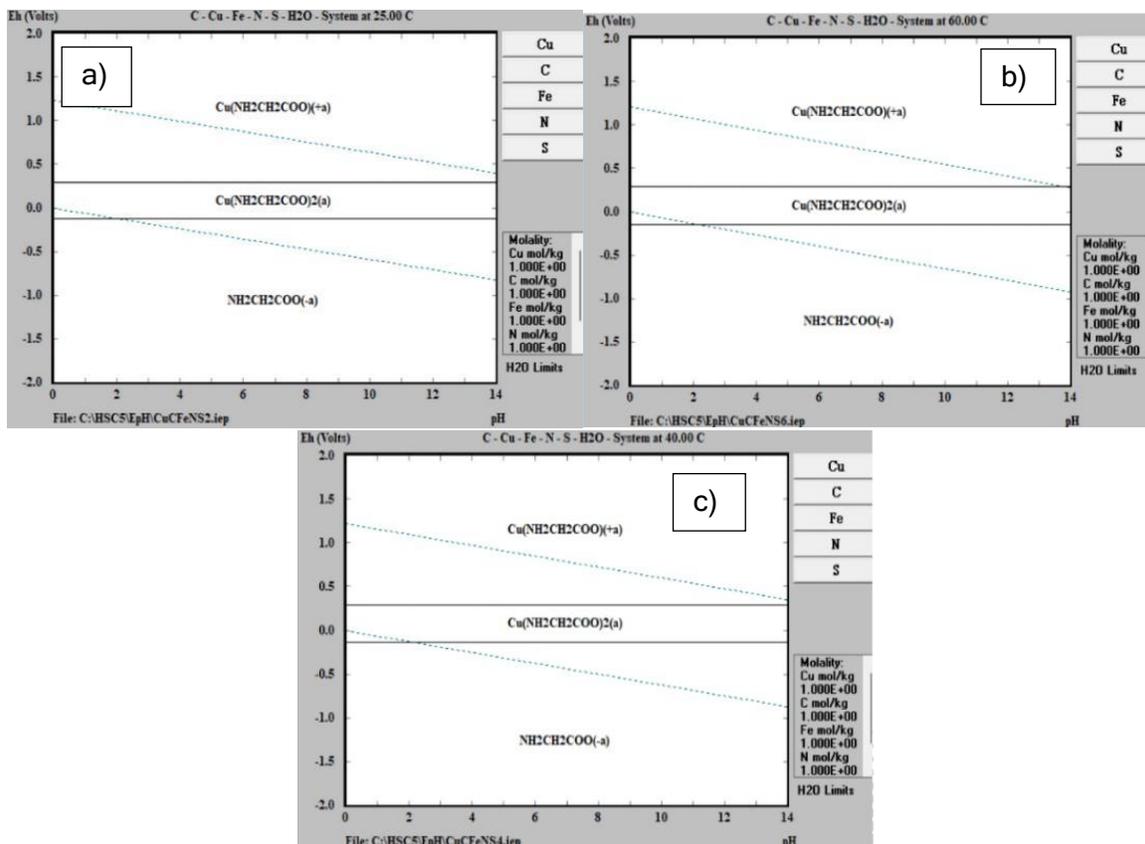


Figura 15. (a) Diagrama Eh-pH del sistema Gli-Mineral 25 °C, (b) Diagrama Eh-pH del sistema MC-glicina a 40 °C, (c) Diagrama Eh-pH del sistema MC-glicina a 60 °C.

La Figura 16 ilustra el comportamiento teórico del sistema base, considerando la presencia de los iones Cu^{2+} y Fe^{3+} , y glicina a una concentración 1M. Donde se destaca la estabilidad del complejo de interés $\text{Cu}(\text{Gli})_2$ en un amplio rango de pH y en un entorno oxidante que abarca valores de 0 a 2 volt.

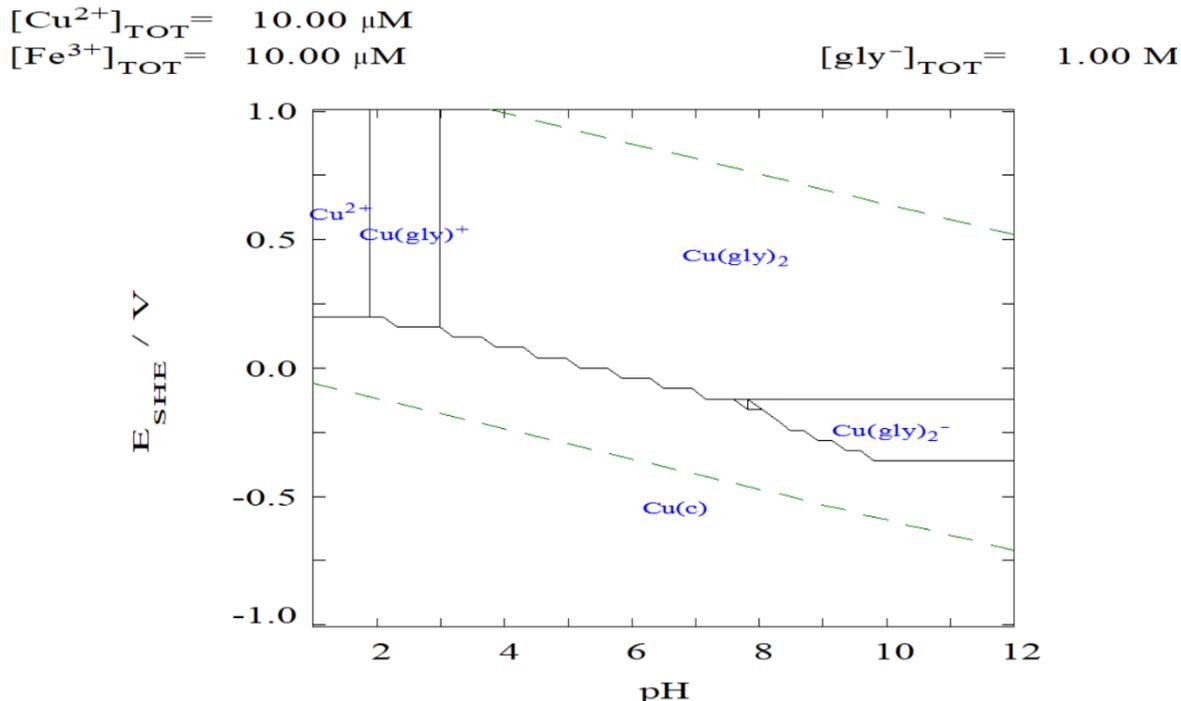


Figura 16. Diagrama Eh-pH del sistema Glicina [1] molar - Fe^{3+} - Cu^{2+} a 25 °C

La representación gráfica proporciona una visualización de la estabilidad del complejo de interés $\text{Cu}(\text{Gli})_2$, evidenciando su estabilidad en condiciones específicas de pH alcalinos y potenciales oxidantes. Esta información teórica es fundamental para comprender el comportamiento del sistema y su relevancia en entornos específicos de pH y potencial.

9.3 Lixiviación con Glicina

Con el propósito de investigar el impacto de la glicina en la lixiviación de cobre presente en las muestras minerales, se llevaron a cabo una serie de experimentos variando únicamente la concentración del agente complejante, para analizar el comportamiento del sistema en función de la concentración de glicina, manteniendo constantes otros parámetros experimentales como pH 11 (valor determinado según la literatura), temperatura de 30 °C, volumen de 300 mL y 800 RPM. Los muestreos se realizaron en intervalos de tiempo predefinidos: 15, 30, 60, 90, 120, 180 y 240 minutos.



La Figura 17 ilustra los porcentajes de disolución de cobre a diferentes puntos a través del tiempo para la muestra MM, donde se observó un comportamiento similar en todos los experimentos llevados a cabo, alcanzando el porcentaje máximo de disolución de cobre, por lo que se infiere que la reacción se estabilizó. No obstante, se destaca que el experimento realizado a 1 M de glicina alcanzó el mayor porcentaje de disolución de cobre, logrando un 84.77% de disolución de cobre, después de 120 minutos.

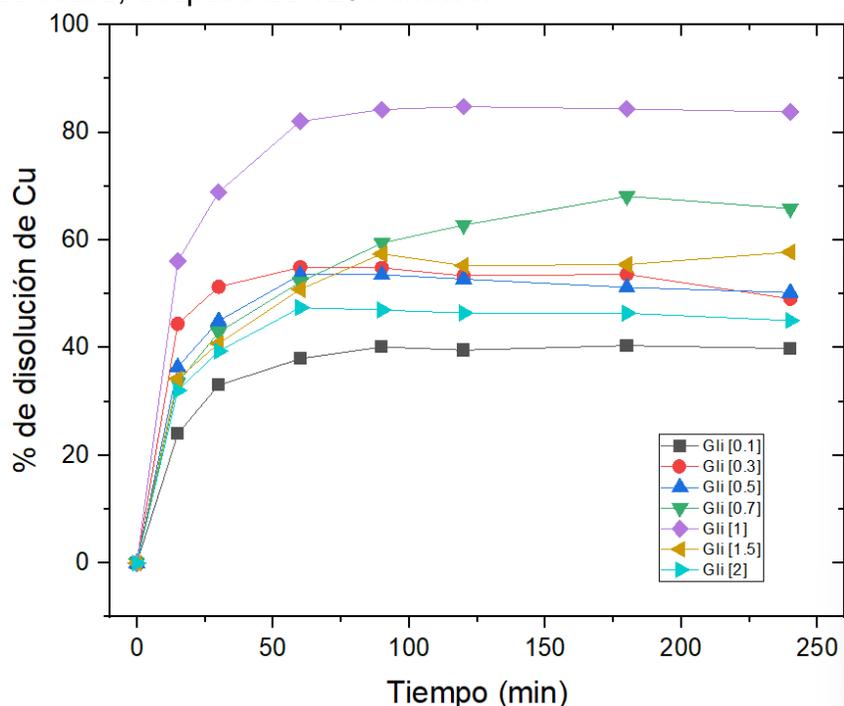


Figura 17. Curvas de disolución de Cu en las pruebas de lixiviación, sistema Gli-MM (Ver valores de porcentajes de disolución en las figuras A.1 a A.7 del apéndice A)

Estos resultados indican que a concentraciones mayores a 1 M de glicina la disolución de cobre se ve perjudicada debido a la solubilidad del medio donde se presentan valores de disolución inferiores. Por lo tanto, se seleccionó la concentración de glicina 1 molar para el desarrollo de las pruebas experimentales correspondientes a la lixiviación oxidante de cobre en ambiente alcalino, a partir de la muestra MM.



Por otro lado, bajo condiciones experimentales idénticas, se llevaron a cabo las pruebas para la muestra MC. En este caso, se obtuvo un porcentaje de disolución de cobre del 44.66% después de 180 minutos (Figura 18). Sin embargo, se observó que ambos experimentos tuvieron el mismo comportamiento en cuanto a las curvas de disolución a medida que transcurre el tiempo, es decir en los primeros 60 minutos se observa un aumento constante en los valores de disolución de cobre para después encontrar una región de estabilidad hasta concluir el experimento después de 4 horas.

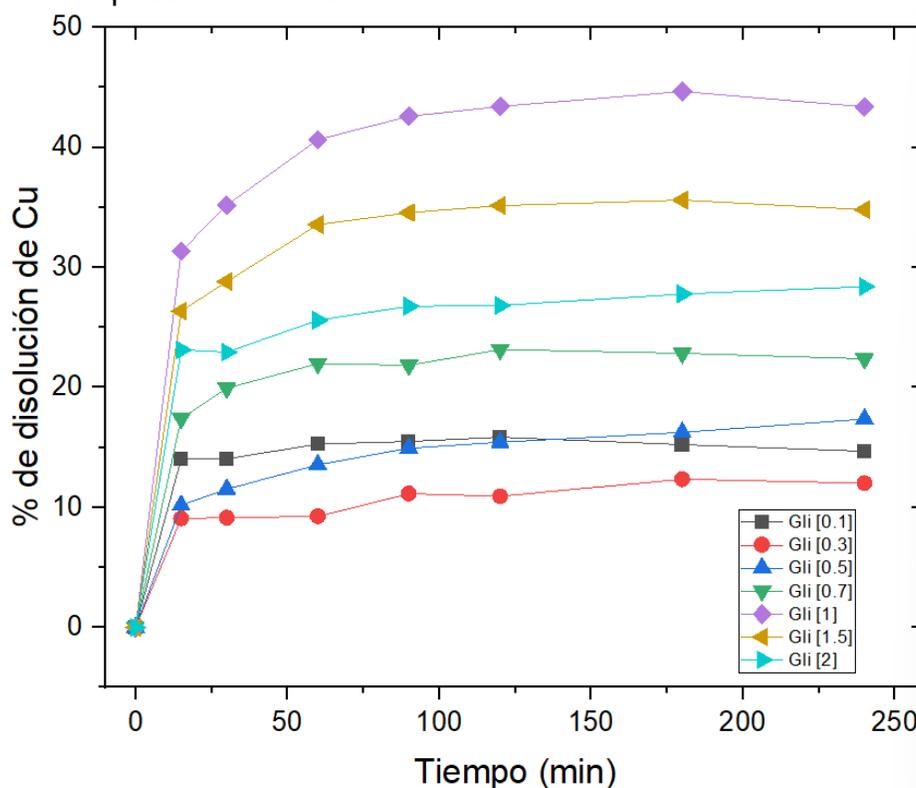


Figura 18. Curvas de disolución de Cu en las pruebas de lixiviación, sistema Gli-MC. (Ver valores de porcentajes de disolución en las figuras A.8 a A.14 del apéndice A.

Tras la realización de las pruebas del sistema Gli-mineral, se estableció que la concentración óptima para continuar con la fase experimental, empleando los agentes oxidativos KMnO_4 , H_2O_2 y O_3 , fue 1 M de glicina. De acuerdo con Tanda et al., en sistemas similares se han reportado valores de disolución de cobre del 83.8% y 91% para muestras minerales puras de cuprita y malaquita respectivamente, después de 24 horas de reacción, con agitación de 400 RPM y 0.5 M de glicina.



Cabe señalar que la diferencia principal respecto al trabajo de Tanda es el tiempo de reacción al cual se logró el porcentaje máximo de disolución de cobre, atribuido al aumento en la concentración de glicina proporcionando mayor disponibilidad del agente lixivante para la formación de complejos y a la agitación superior, que propicia la rotura de la capa de líquido que rodea al mineral aumentando el contacto de la solución lixivante con el metal de interés.

9.3.1 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).

En el análisis por espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), se estudiaron tres muestras. La primera contiene exclusivamente glicina a una concentración de 1 M, utilizada como referencia para el espectro infrarrojo característico de este compuesto. En las otras dos muestras, se mantuvo la misma concentración de glicina, pero esta vez se incorporaron los minerales MC y MM. Los resultados obtenidos revelaron la presencia de los grupos funcionales característicos de la glicina, como NH₂, CH₂ y COOH, lo cual confirma la pureza del reactivo empleado para los experimentos de lixiviación, Figura 19.

El cambio principal observado debido a la unión del Cu²⁺ con la glicina fue la aparición de un pico en 1,572 cm⁻¹, correspondiente al grupo funcional carboxilato. Aunque las ubicaciones de los picos para la glicina libre y el complejo Cu²⁺-glicina no variaron significativamente, las intensidades de todos los picos observados para la glicina libre disminuyeron debido a la reacción de la glicina con el ion metálico de cobre (Hamada et al., 2017).

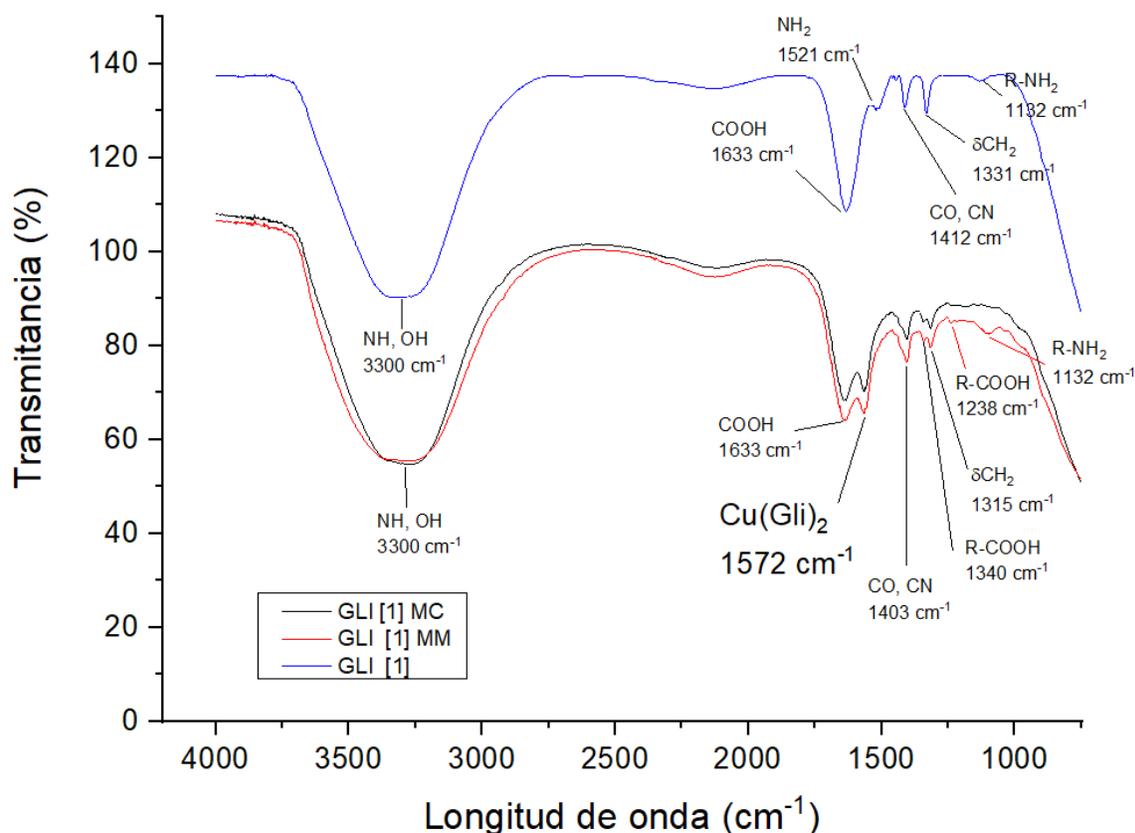


Figura 19. Espectros infrarrojos correspondiente a las muestras Gli, Gli-MM y Gli-MC.

Estos hallazgos validan la formación del complejo entre la glicina y el cobre. Los resultados obtenidos son relevantes para el estudio de la formación de complejos y procesos de reacción en sistemas químicos, destacando la influencia de la glicina en presencia del ion metálico de cobre.

9.3.2 Lixiviación sistema Gli-KMnO₄-Mineral.

Para la continuación de la fase experimental, se incorporó el permanganato de potasio (KMnO₄), como agente oxidante y empleando pH 10.

Cabe señalar que se modificó el pH respecto al sistema Gli-mineral, con el propósito de alejar las condiciones experimentales del límite de la región de estabilidad del complejo diglicinato de cobre, de acuerdo a lo observado en los diagramas Eh-pH (ver Figura 16).



En la Figura 20 se presenta gráficamente el progreso de la disolución en función del tiempo de reacción, para la muestra MM. De acuerdo a los resultados obtenidos, el experimento llevado a cabo con una concentración de KMnO_4 de 0.1 molar, alcanzó el mayor porcentaje de disolución de cobre, logrando un 74.54% después de 120 minutos, lo cual indica una disminución en cuanto al porcentaje obtenido mediante el uso exclusivo de glicina, debido a la degradación de la glicina por exceso de potencial generado por el KMnO_4 , lo que ocasiona la re-precipitación de cobre (Solano et al., 2016).

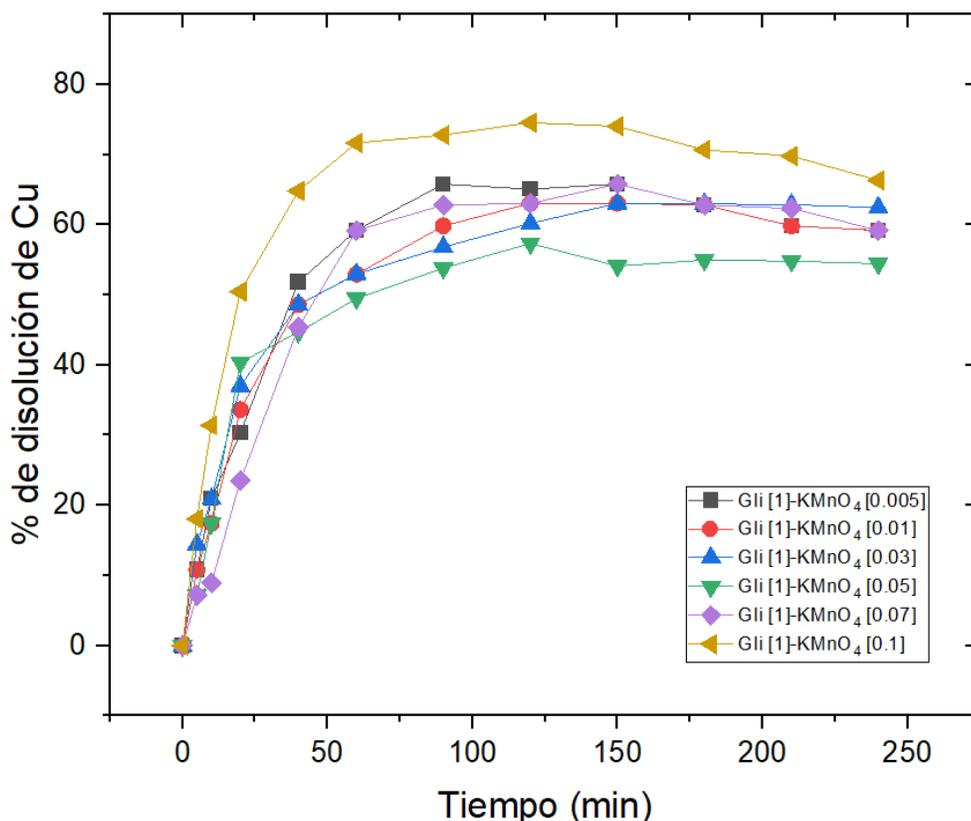


Figura 20. Curvas de disolución de Cu en las pruebas de lixiviación, sistema Gli- KMnO_4 -MM.

(Ver valores de porcentajes de disolución en las Fig. A.15 a A.20 del apéndice A)

Se realizaron experimentos para analizar el efecto de la concentración de KMnO_4 en la lixiviación del cobre presente en la muestra MC, se llevaron a cabo los experimentos correspondientes bajo las condiciones experimentales detalladas previamente. Los resultados, presentados en la Figura 21, indicaron que la concentración óptima del agente oxidante fue de 0.05 molar, logrando una



disolución de cobre del 69.71%, evidenciando un incremento del 25% con respecto a los valores alcanzados mediante el uso exclusivo de glicina, mostrando claramente la influencia positiva del agente oxidante en la mejora de la lixiviación del cobre.

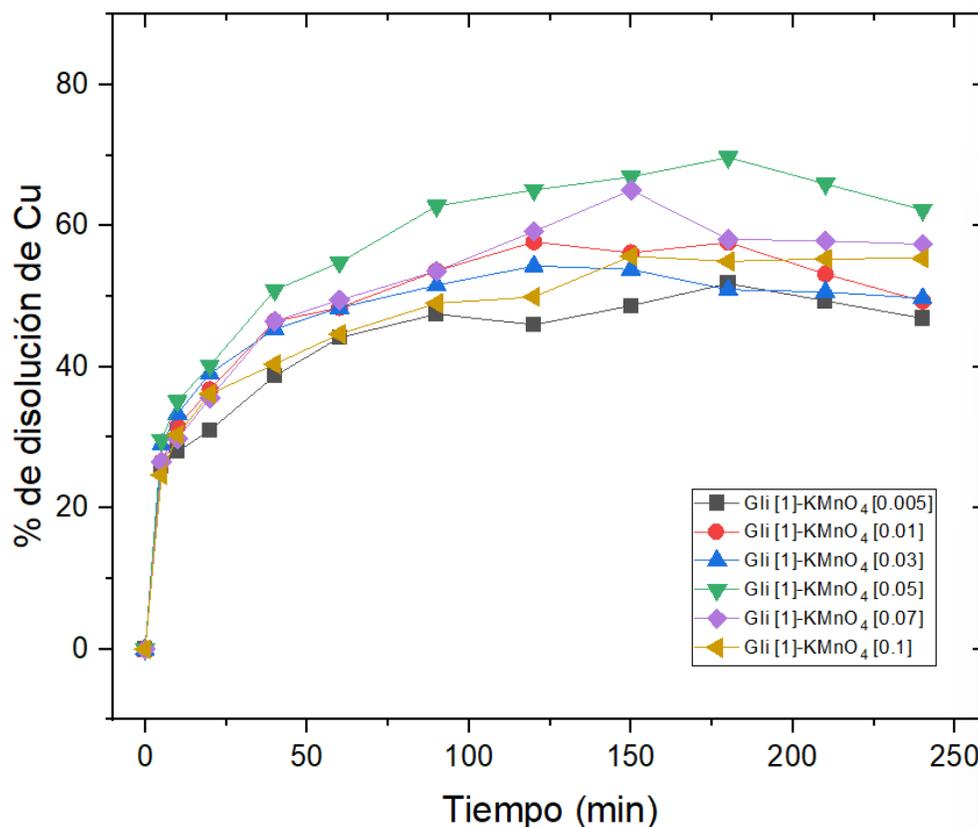


Figura 21. Curvas de disolución de Cu en las pruebas de lixiviación, sistema Glicina-KMnO₄-MC.

(Ver valores de porcentajes de disolución en las Fig. A.21 a A.26 del apéndice A)

Los resultados obtenidos evidencian el potencial del KMnO₄ para mejorar el proceso de extracción de cobre en la muestra MC, lo que puede tener implicaciones importantes en la industria minera y metalúrgica.

9.3.3 Lixiviación sistema Gli-H₂O₂-Mineral.

Con el objetivo de explorar el impacto del peróxido de hidrógeno (H₂O₂) en el proceso de lixiviación del cobre contenido en las muestras minerales, se realizaron una serie de experimentos, variando exclusivamente la concentración de



H₂O₂.

En la Figura 22 se presenta gráficamente la evolución de la disolución en función del tiempo para la muestra MM. Si bien se observó un comportamiento similar en todos los experimentos, destaca la prueba con una concentración de H₂O₂ del 0.7%, logrando una disolución del 96.29% en tan solo 60 minutos.

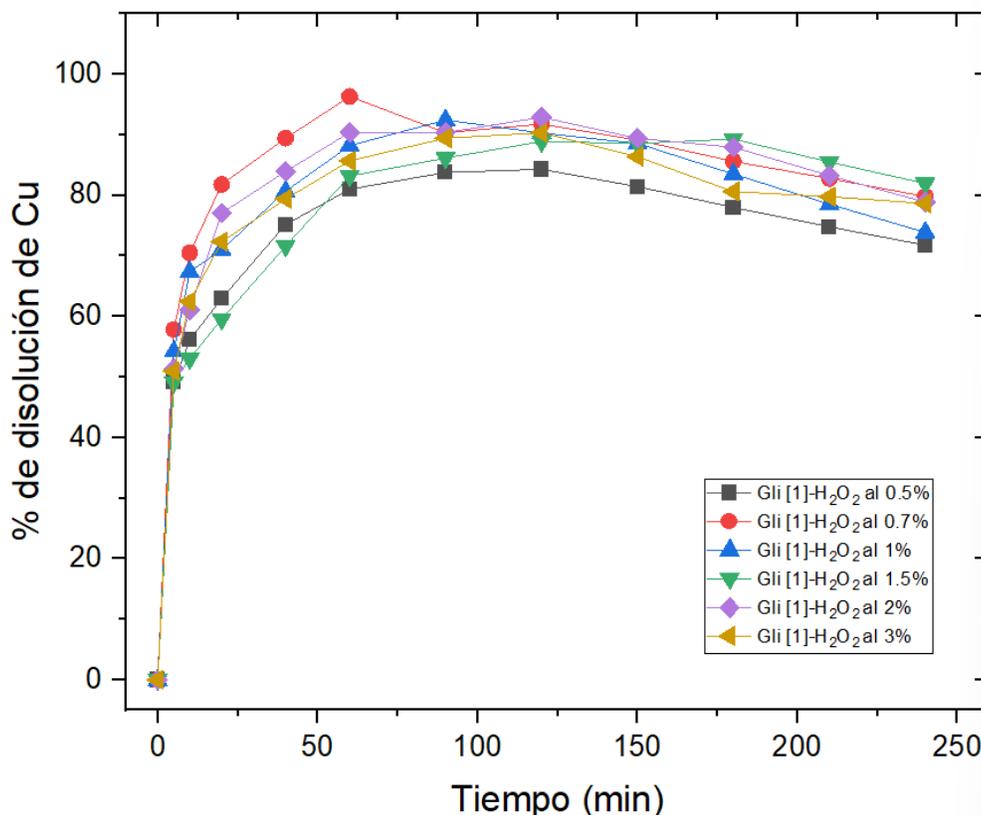


Figura 22. Curvas de disolución de Cu en las pruebas de lixiviación, sistema Gli-H₂O₂-MM. (Ver valores de porcentajes de disolución en las Fig. A.27 a A.32 del apéndice A)

Los resultados obtenidos señalan una influencia positiva en presencia de H₂O₂ en el proceso de lixiviación del cobre. Destacando la concentración de 0.7%, mediante la cual se obtuvo la máxima disolución de cobre, logrando un aumento del 11.52% en el porcentaje de disolución respecto al uso exclusivo de glicina. Estos resultados definen al H₂O₂ como el agente oxidante más efectivo para la disolución de cobre en este contexto experimental, ofreciendo una perspectiva valiosa para el desarrollo de estrategias mejoradas en el proceso de extracción del cobre.



Se llevaron a cabo experimentos específicos para analizar el impacto de la concentración de H_2O_2 en la lixiviación del cobre presente en la muestra MC, siguiendo las condiciones experimentales previamente establecidas. Los resultados, presentados en la Figura 23, revelaron que la concentración óptima del agente oxidante fue del 1%, logrando una disolución de cobre del 69.76%.

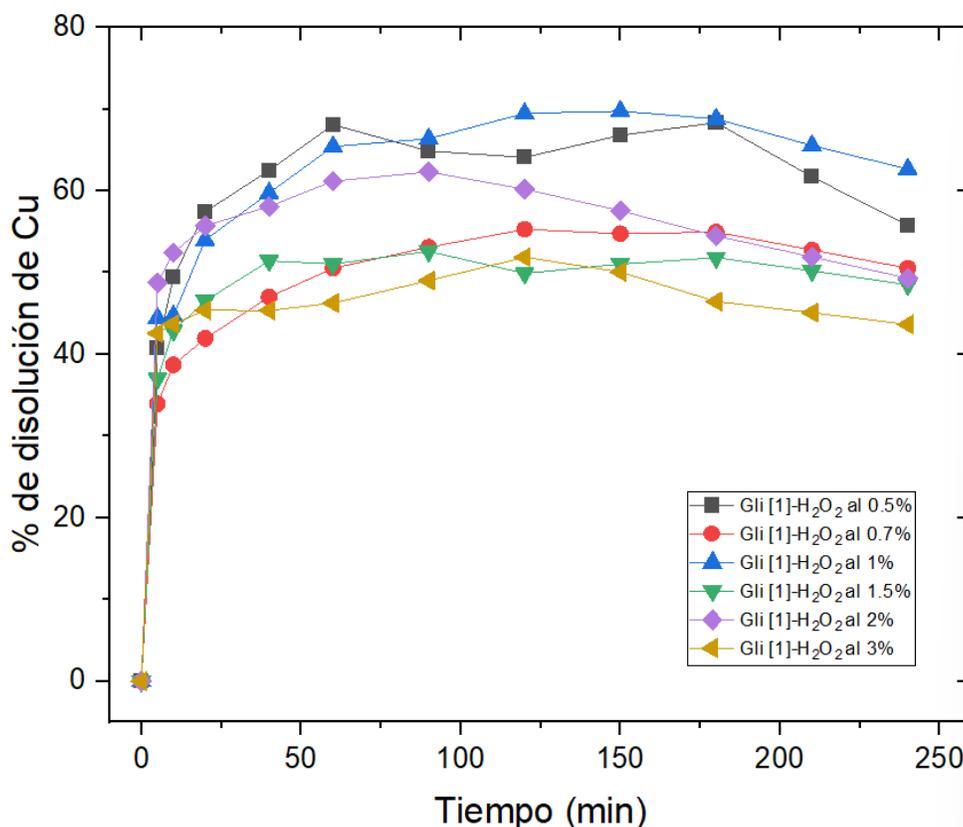


Figura 23. Curvas de disolución de Cu en las pruebas de lixiviación, sistema Gli-H₂O₂-MC. (Ver valores de porcentajes de disolución en las Fig. A.33 a A.38 del apéndice A)

Estos hallazgos sugieren un comportamiento similar entre el H_2O_2 y el $KMnO_4$ en términos de la disolución de cobre, logrando porcentajes de disolución idénticos. Sin embargo, aunque la diferencia entre los resultados obtenidos mediante el uso de ambos agentes oxidantes fue mínima, el H_2O_2 demostró ser ligeramente más efectivo que el $KMnO_4$ en este contexto experimental.

Estos resultados confirmaron que la presencia de H_2O_2 aumentó los porcentajes de disolución de cobre en la muestra MC. Este hallazgo proporciona



información valiosa para comprender y seleccionar los agentes óptimos en el proceso de extracción de cobre en muestras minerales.

9.3.4 Lixiviación sistema Gli-O₃-Mineral.

Para continuar con la fase experimental, se incorporó el agente oxidante ozono (O₃). Se realizaron pruebas de lixiviación para ambas muestras minerales variando los flujos de ozono (0.2, 0.5, 0.7, 1, 1.5 y 2 L/min).

La Figura 24 ilustra el avance de la disolución en función del tiempo de reacción para la muestra MM. El experimento destacado, realizado con un flujo de 2 L/min, alcanzó el mayor porcentaje de disolución de cobre, logrando un 30.41% después de 210 minutos.

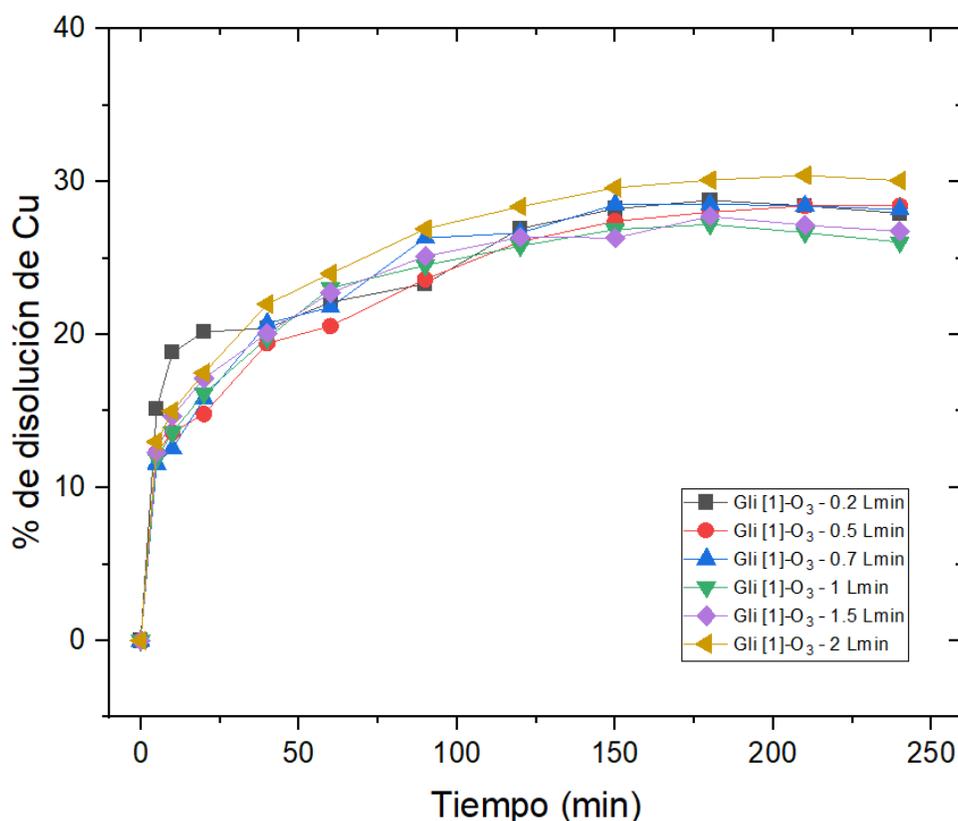


Figura 24. Curvas de disolución de Cu en las pruebas de lixiviación, sistema Gli-O₃-MM.
(Ver valores de porcentajes de disolución en las Fig. A.39 a A.44 del apéndice A)



Se llevaron a cabo experimentos para analizar el impacto del flujo de ozono en la lixiviación del cobre presente en la muestra MC, siguiendo las condiciones experimentales detalladas previamente. Los resultados, presentados en la Figura 25, indicaron que el flujo óptimo del agente oxidante fue de 2 L/min, logrando una disolución de cobre del 51.92% en un lapso de 210 minutos. Este resultado reflejó un incremento del 7.26% en comparación con los valores obtenidos mediante la utilización exclusiva de glicina, demostrando así la influencia positiva del agente oxidante en la mejora del proceso de lixiviación del cobre.

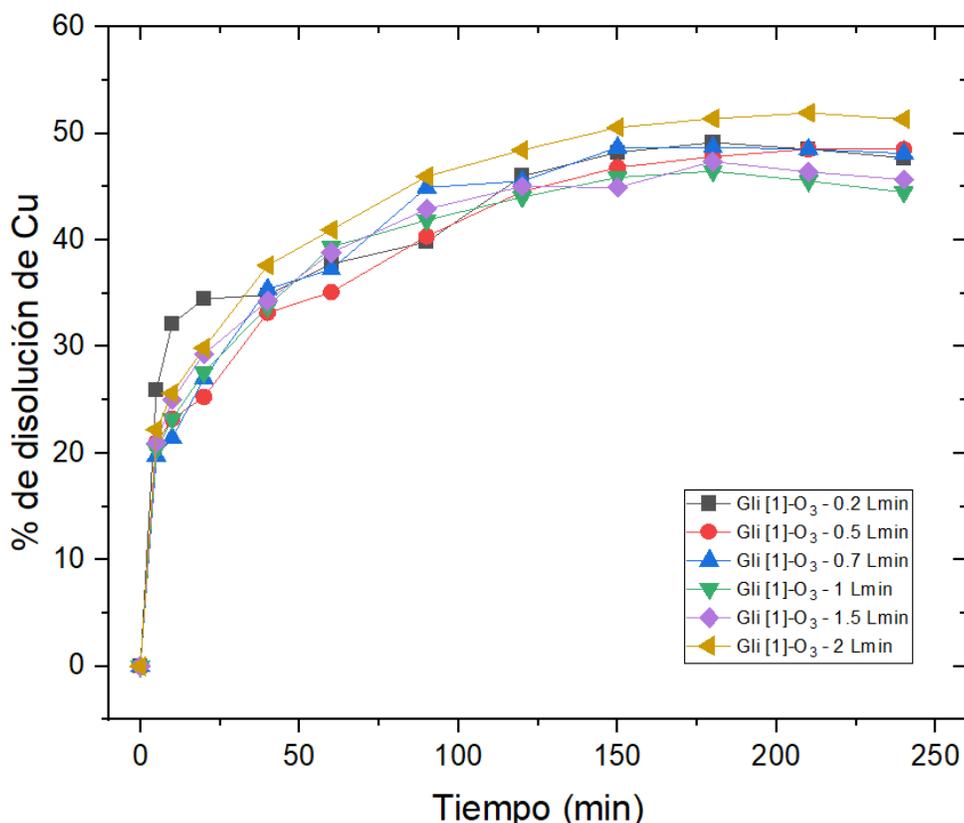


Figura 25. Curvas de disolución de Cu en las pruebas de lixiviación, sistema Gli-O₃-MC.

(Ver valores de porcentajes de disolución en las Fig. A.45 a A.50 del apéndice A)

Los resultados derivados de la utilización de ozono como agente oxidante revelan mejoras en el proceso de lixiviación del cobre. A pesar de ello, este avance no presenta un aumento sustancial. Por consiguiente, se sugiere una investigación más exhaustiva sobre el tema, considerando el control de la solubilidad del ozono en los experimentos. Esto permitirá determinar el porcentaje efectivo del agente



oxidante inyectado en los procesos experimentales, brindando una comprensión más precisa sobre su influencia en la disolución del cobre y su interacción con el agente lixivante.

9.4 Reacciones propuestas para los sistemas experimentales.

Según los resultados derivados de la caracterización química mineralógica y el análisis de los experimentos de lixiviación, se proponen las siguientes reacciones que explican la formación del complejo $(\text{Cu}(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COO})_2)$, considerado como el más estable según la literatura (Tanda et al., 2017).

Estas reacciones propuestas se llevaron a cabo considerando el balance de masa, la solubilidad de los productos a diferentes valores de pH y los estados de oxidación del cobre. El objetivo fue generar el complejo más estable, y dichas reacciones se respaldan con los resultados más favorables obtenidos en las pruebas de lixiviación, como se presenta en las Tablas 10 y 11.

La Tabla 10 presenta las reacciones relacionadas con el sistema Gli-MC, donde se destaca la formación del complejo diglicinato de cobre en todos los sistemas, logrando el mejor resultado en el caso del sistema Gli-H₂O₂-MC, con un 69.8% de disolución de valores de cobre a una concentración de 1 molar de glicina y 1% de H₂O₂ después de sólo 150 minutos. Este porcentaje supera los valores obtenidos mediante otras técnicas alternativas para la disolución de valores de cobre a partir de minerales oxidados (Carreño, 2022).



Tabla 10. Reacciones propuestas para el sistema [Gli] 1 M - MC.

Tratamiento	Reacción	Resultados
Gli / MC	$2\text{Cu}_2\text{O} + 4\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{Cu}(\text{OH})_2$ $2\text{Cu}_2\text{O} + 4\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Cu}(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COO})_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ (Tanda et al., 2017)	44.7% a [1] Molar de glicina en 180 min
Gli / KMnO ₄ / MC	$3\text{Cu}_2\text{O} + 12\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{KMnO}_4 \rightarrow 6\text{Cu}(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COO})_2 + 2\text{MnO}_2 + 2\text{KOH} + 5\text{H}_2\text{O}$	69.7% a [1] molar de glicina y 0.05 molar de KMnO ₄ en 180 min
Gli / H ₂ O ₂ / MC	$2\text{Cu}_2\text{O} + 4\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 4\text{Cu}(\text{OH})_2 + \text{O}_2$ $\text{Cu}_2\text{O} + 4\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Cu}(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COO})_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	69.8% a [1] molar de glicina y 1% de H ₂ O ₂ en 150 min
Gli / O ₃ / MC	$\text{Cu}_2\text{O} + \text{O}_3 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Cu}(\text{OH})_2 + \text{O}_2$ $\text{Cu}_2\text{O} + 4\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH} + \text{O}_3 \rightarrow 2\text{Cu}(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COO})_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	51.9% a [1] molar de glicina y 2 L/min de O ₃ en 210 min

En el sistema Gli-MC, se obtiene un máximo porcentaje de disolución del 44.7%, atribuido a la dependencia de la formación de Cu⁺ a Cu²⁺ para generar el complejo de interés. Este factor ejerce una alta influencia la implementación de los ambientes oxidantes, ya que esta condición estará presente en todos los sistemas, conduciendo a resultados del 69.7% de disolución de cobre al emplear KMnO₄ como oxidante, donde el permanganato de potasio facilita la formación de Cu₂O a Cu(OH)₂ y, de este modo, disponer del Cu⁺² para asociarse al ion glicinato. Este proceso es consistente en todos los sistemas de Gli-MC-oxidante.

La Tabla 11 presenta las reacciones correspondientes al sistema Gli-MM, donde se destaca la formación del complejo diglicinato de cobre en todos los sistemas. El mejor resultado se obtiene en el caso del sistema Gli-MM-H₂O₂, con un



96.3% de disolución de valores de cobre a una concentración de 1 molar de glicina y 0.7% de H₂O₂ después de solo 60 minutos. Estos resultados superan a otros métodos alternativos, como la lixiviación con soluciones de tartrato (Gutiérrez, 2020) y soluciones de ácido cítrico (Herrera, 2019).

Tabla 11. Reacciones propuestas para el sistema [Gli] 1 M - MM.

Tratamiento	Reacción	Resultados
Gli / MM	$(\text{CuCO}_3)\text{Cu}(\text{OH})_2 + 4\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{NaOH} \rightarrow 2\text{Cu}(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COO})_2 + 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{NaCO}_3$	84.8% a 1 Molar de glicina en 120 min
Gli / KMnO ₄ / MM	$(\text{CuCO}_3)\text{Cu}(\text{OH})_2 + 4\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{KMnO}_4 \rightarrow 2\text{Cu}(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COO})_2 + 2\text{MnO}_2 + \text{K}_2\text{CO}_3 + 6\text{OH}$	74.5% a 1 molar de glicina y 0.1 molar de KMnO ₄ en 120 min
Gli / H ₂ O ₂ / MM	$(\text{CuCO}_3)\text{Cu}(\text{OH})_2 + 4\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Cu}(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COO})_2 + 3\text{H}_2\text{O} + 2\text{OH} + \text{CO}_2$	96.3% a 1 molar de glicina y 0.7% de H ₂ O ₂ en 60 min
Gli / O ₃ / MM	$(\text{CuCO}_3)\text{Cu}(\text{OH})_2 + 4\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH} + \text{O}_3 + 2\text{NaOH} \rightarrow 2\text{Cu}(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COO})_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{CO}_3 + 6\text{OH}$	30.4% a 1 molar de glicina y 2 L/min de O ₃ en 210 minutos



En el sistema Gli-MM, se alcanza un porcentaje máximo de disolución de cobre del 84.8%, atribuido a que el metal de interés se encuentra presente como Cu^{2+} , favoreciendo la formación del complejo diglicinato de cobre. En el caso del sistema Gli- KMnO_4 -MM, donde el rendimiento se ve afectado, logrando un 74.5%, debido a la formación de condiciones alcalinas que propician la polimerización de la glicina, impidiendo la disposición de esta para formar el complejo de interés. Esto se propone porque se observó que el residuo formado no tiene las características de un polvo, sino más bien de una pasta, como se muestra en la Figura 26.



Figura 26. Residuos del sistema Gli- KMnO_4 -MM

Para el sistema Gli- H_2O_2 -MM, se favorece el rendimiento de la reacción, ya que el peróxido de hidrógeno es un oxidante débil con mayor control en la concentración y solubilidad total. Por último, en el sistema Gli- O_3 -MM, los resultados se ven afectados debido a la oxidación de la glicina a ácido fórmico, que puede ir seguida de una oxidación a dióxido de carbono (Dueguet et al., 1980).

9.5 Caracterización de los residuos experimentales mediante MEB- EDS.

Los residuos obtenidos a partir de la etapa experimental fueron analizados con el objetivo de determinar los elementos presentes y ampliar el panorama acerca de los productos obtenidos presentes en los residuos minero metalúrgicos.

9.5.1 Residuos de la muestra MC.

Las figuras 27, 28 y 29 presentan los resultados obtenidos de la caracterización de los residuos obtenidos a partir de los experimentos de lixiviación para el sistema Gli-Oxidante-MC.

Mediante la aplicación de contrastes en escala de grises, se generaron las microfotografías presentes en las Figuras 27 b y d, correspondientes a los residuos sólidos obtenidos del sistema Gli-KMnO₄-MC, en estas imágenes, se aprecia una superficie lisa con bordes definidos. Según los resultados del microanálisis de Rayos X presentados en las Figuras 27 a y c, se determinó que los residuos están compuestos por O, Na, K, Mn, Cu, Fe y Ca.

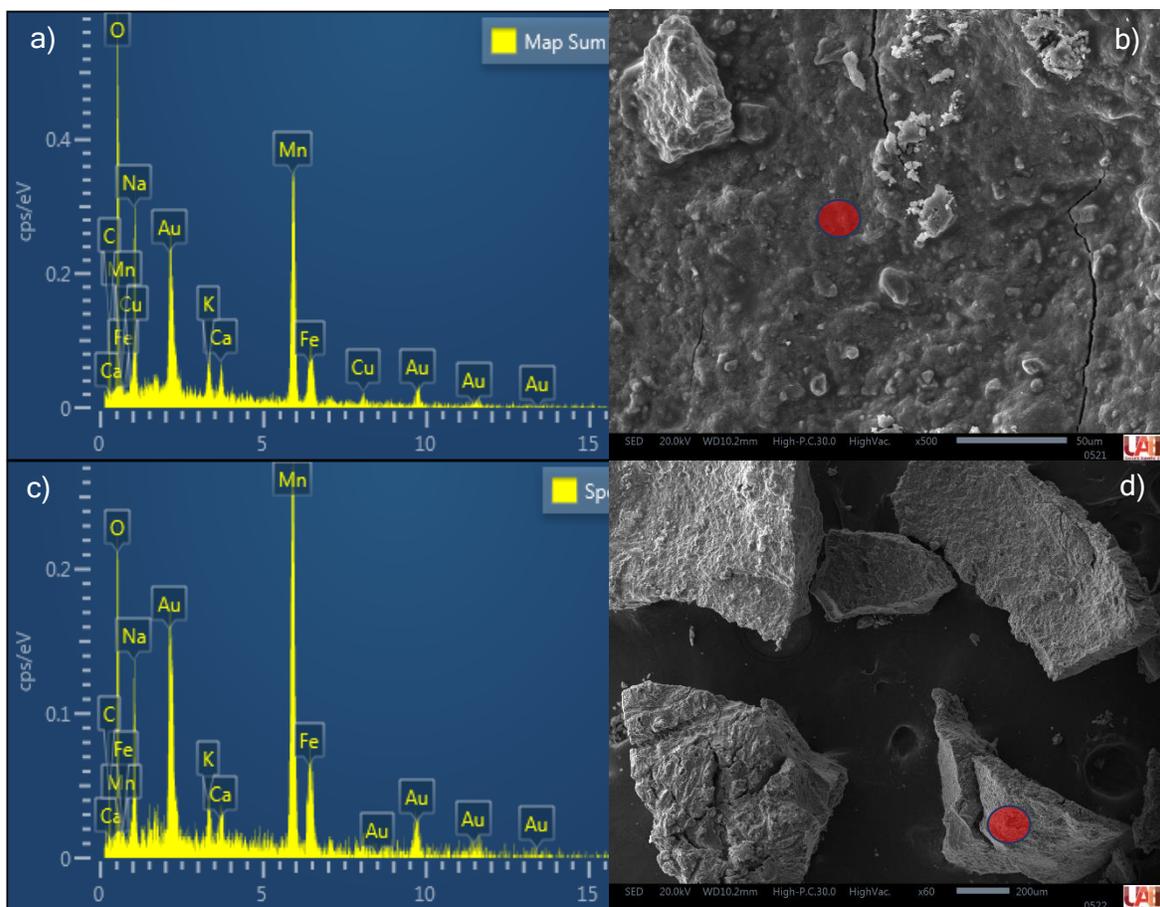


Figura 27. Fotomicrografías de MEB (b y d) y espectros EDS (a y c) correspondientes a los residuos del sistema Gli-KMnO₄-MC.

A través del análisis puntual presentado en la Figura 27d, se obtuvo el espectro (Figura 27c) donde se observa la presencia de elementos como Mn y K provenientes del agente oxidante empleado en este sistema, además existen contenidos de Na derivados del NaOH empleado para el ajuste de pH y por último cabe señalar la presencia de Cu y Fe procedentes de la muestra mineral empleada en esta fase experimental.

En relación con los residuos del sistema Gli-H₂O₂-MC, cabe destacar que, de acuerdo con los componentes del mineral identificados por la técnica de DRX, se logró observar de manera congruente los componentes esperados en los residuos del sistema, evidenciados por los espectros EDS (Figura 28 a-d), identificando elementos tales como O, Fe, C, Cu, Ca y Si. Cabe señalar la presencia de Fe, lo que indica la concentración de dicho metal en los residuos.

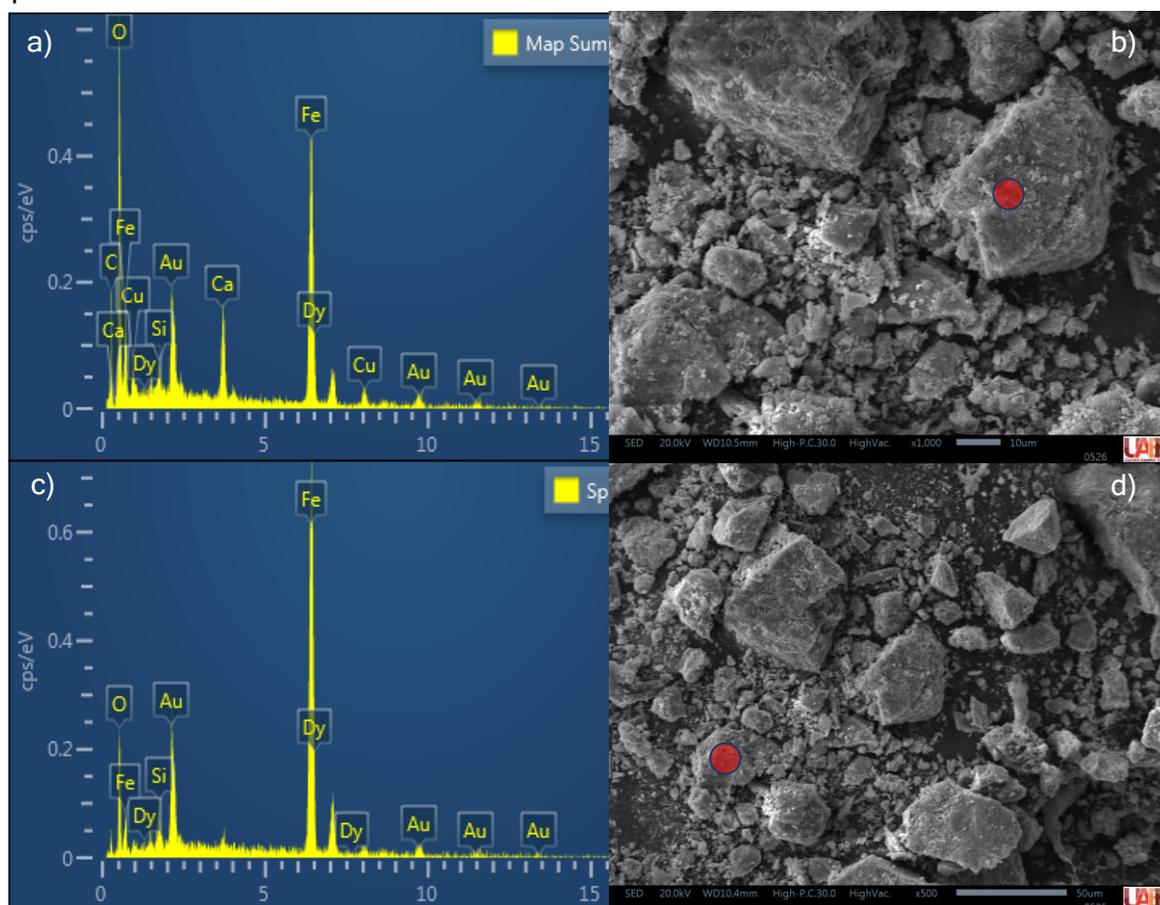


Figura 28. Fotomicrografías de MEB (b y d) y espectros EDS (a y c) correspondientes a los residuos del sistema Gli-H₂O₂-MC.

De manera similar, se analizaron los residuos del sistema Gli-O₃-MC, destacan especialmente la presencia de hierro, lo cual indica una concentración significativa de valores de hierro en los residuos (ver Figura 29 a-d). Estos resultados, se encuentran respaldados por los diagramas Eh-pH correspondientes que revelan la ausencia de complejos de hierro con glicina en las condiciones propuestas para este proyecto.

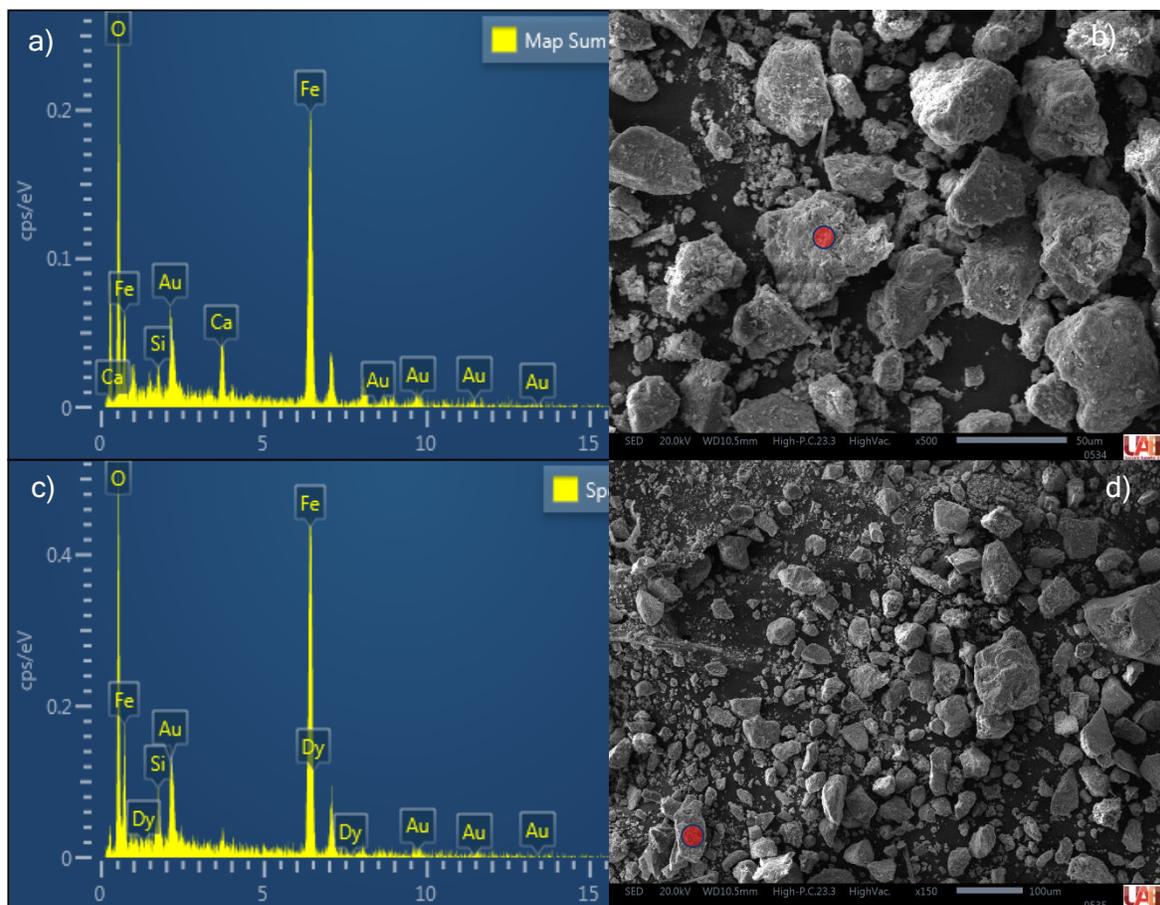


Figura 29. Fotomicrografías de MEB (b y d) y espectros EDS (a y c) correspondientes a los residuos del sistema Gli-O₃-MC.

9.5.2 Residuos de la muestra MM.

Las figuras 30, 31 y 32 exhiben los resultados derivados de la caracterización de los residuos procedentes de los ensayos de lixiviación en el sistema Gli-Oxidante-MM. Mediante la aplicación de contrastes en escala de grises, se generaron las micrografías presentes en las Figuras 30 b y d. En estas imágenes,

se aprecia una textura ligeramente rugosa con grietas, las cuales de acuerdo a los resultados del microanálisis de Rayos X presentados en las Figuras 30 a y c, se componen de O, Na, K, Mn, Fe y Ca.

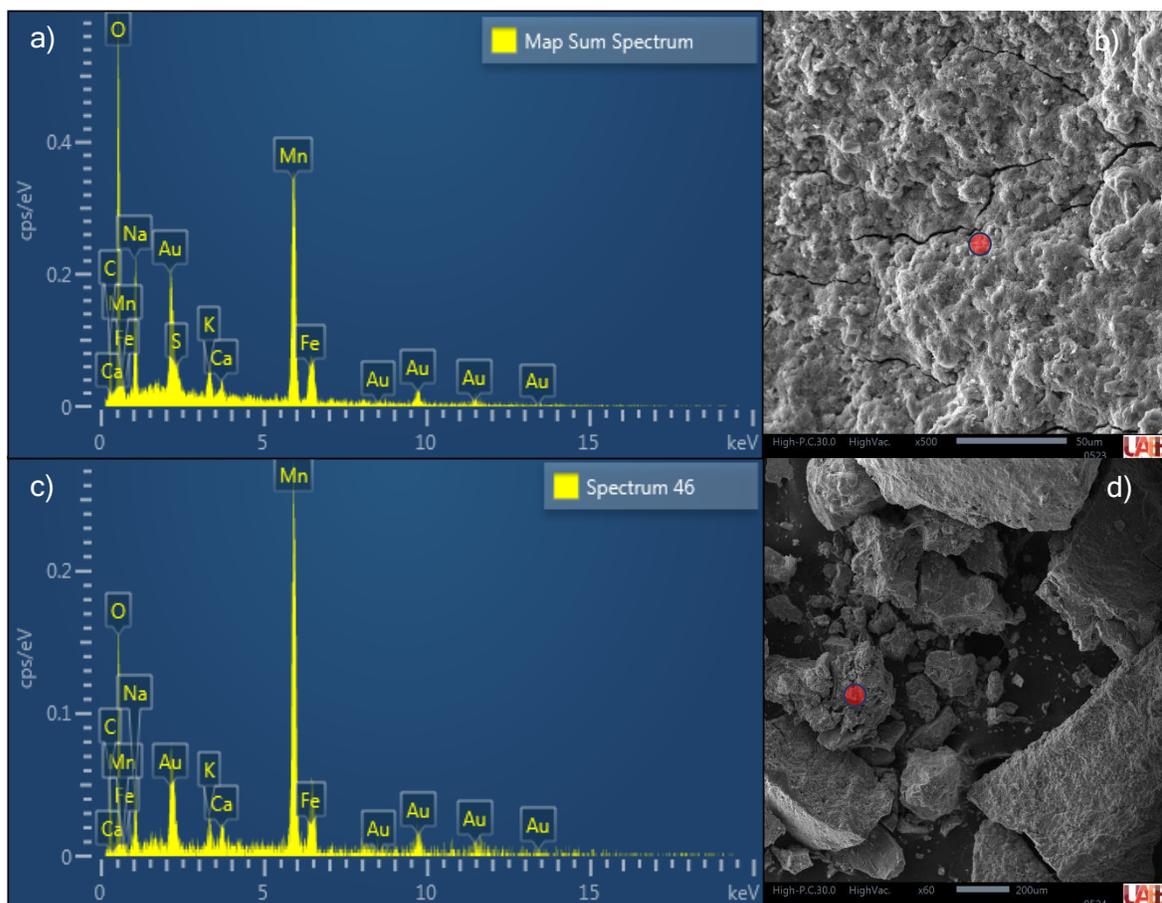


Figura 30. Fotomicrografías de MEB (b y d) y espectros EDS (a y c) correspondientes a los residuos del sistema Gli-KMnO₄-MM.

Se realizó análisis puntual en diversas áreas de la muestra con el fin de identificar algunos de elementos asociados a los residuos. A partir de los espectros EDS obtenidos (Figuras 30 a y c), se identificó la presencia de elementos derivados de los reactivos empleados en este sistema, tales como KMnO₄, NaOH y la muestra MM. Destacando que no se observó la presencia de Cu, lo que es un indicativo de la eficiencia del sistema.

En relación con los residuos del sistema Gli-H₂O₂-MM, se obtuvieron fotomicrografías y espectros EDS (Figura 31 a-d) donde no se observa la presencia

de cobre en ninguna de las muestras analizadas para este sistema, esto debido a los porcentajes de disolución (96.3%) alcanzados en este método. Por otro lado, se observaron residuos con diferentes tamaños de partícula y textura rugosa, compuestos por O, Fe, Si, Al, y Dy.

Los elementos identificados mediante esta técnica corresponden a los reactivos empleados para este sistema, a excepción del Dy, el cual pertenece a la familia de las tierras raras atribuido a la diversidad mineralógica existente en la muestra MM.

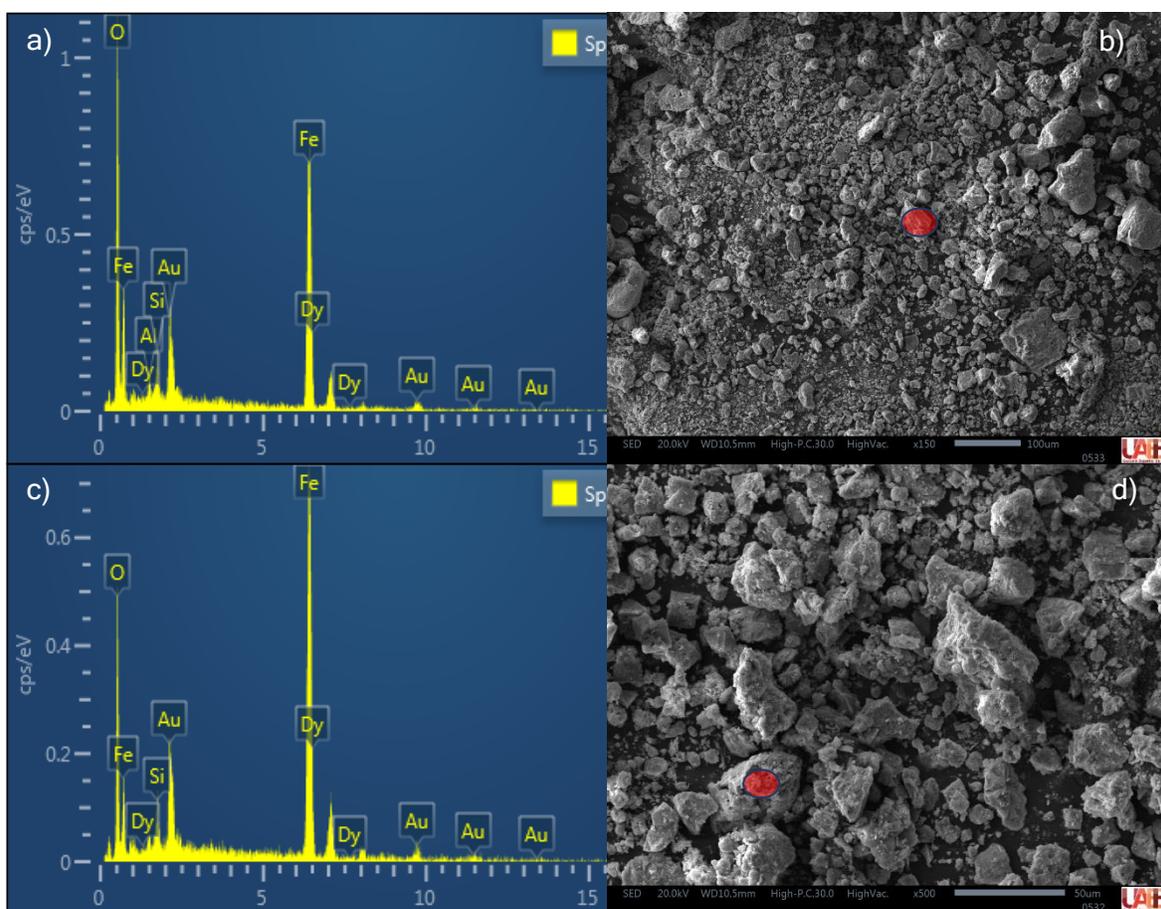


Figura 31. Fotomicrografías de MEB (b y d) y espectros EDS (a y c) correspondientes a los residuos del sistema GliH₂O₂-MM.

De manera similar, se identificaron los elementos presentes en los residuos del sistema Glicina-O₃-MM (Figura 32 a-d), entre los que se encuentra O, C, Fe, Cu, Ca, Si, y Dy. Se destaca especialmente la presencia de Dy lo cual confirma la

presencia de este elemento observado previamente en los residuos correspondientes al sistema Gli-H₂O₂-MM.

Además, se observó la presencia de hierro, lo cual indica una concentración de valores de hierro en los residuos, es decir a el sistema es capaz de lixiviar por un lado los contenidos de cobre y por el otro, es capaz de concentrar en los residuos los valores de Fe.

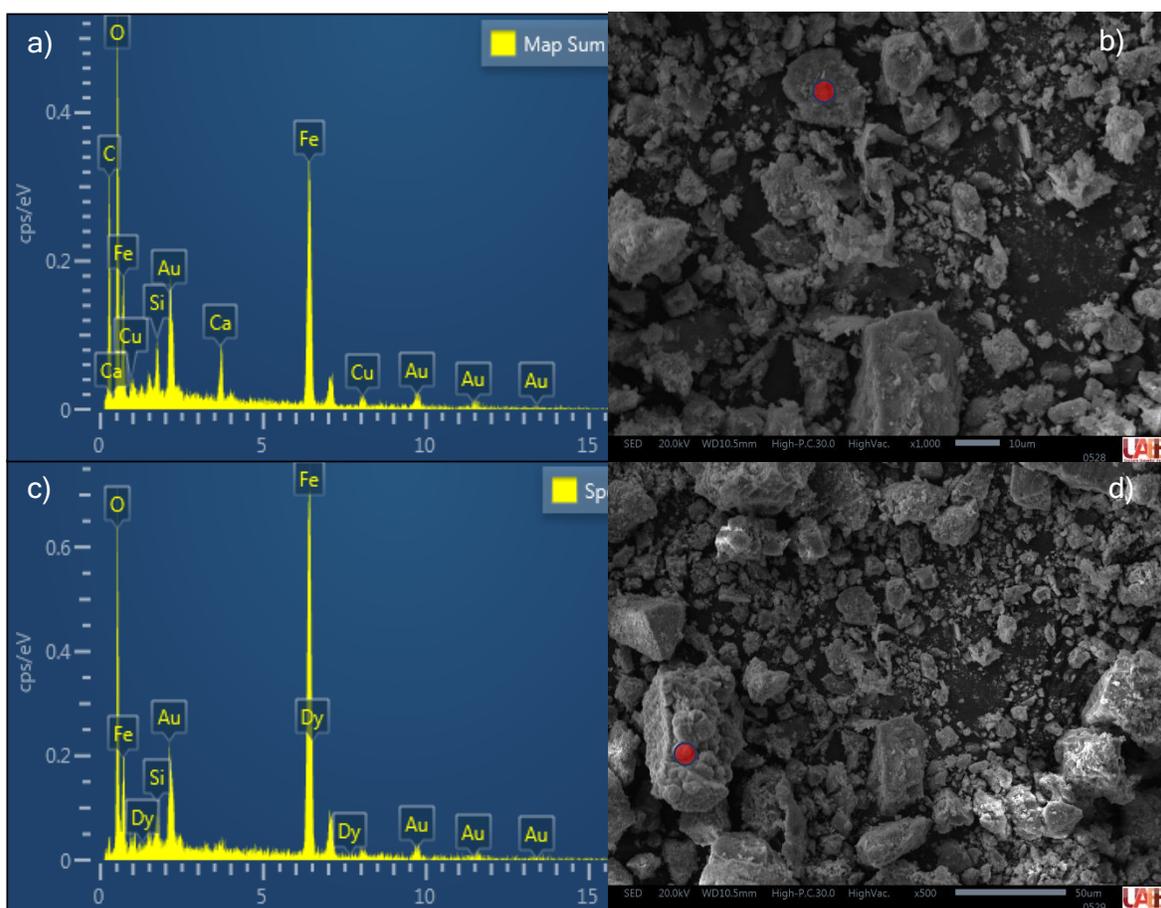


Figura 32. Fotomicrografías de MEB (b y d) y espectros EDS (a y c) correspondientes a los residuos del sistema Glicina-O₃-MM.



CONCLUSIONES

- La caracterización química mineralógica confirmó de manera concluyente la presencia de las especies minerales relacionadas al metal de interés, específicamente cuprita (Cu_2O) y malaquita ($((\text{CuCO}_3)\text{Cu}(\text{OH})_2)$).
- Los diagramas termodinámicos revelaron que la formación teórica del complejo diglicinato de cobre es posible en un amplio rango de pH, independientemente de la temperatura en el intervalo de 25 a 60 °C.
- La técnica de FTIR comprobó la formación del complejo diglicinato de cobre ($\text{Cu}(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COO})_2$) en soluciones acuosas, en las condiciones propuestas para los sistemas de lixiviación.
- Se estableció que la concentración de glicina 1 M es la indicada para la lixiviación de las muestras minerales y la posterior implementación los ambientes oxidantes.
- Mediante el análisis de resultados derivados del uso de permanganato de potasio (KMnO_4), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y ozono (O_3) como agentes oxidantes, se determinó que el peróxido de hidrógeno es el agente oxidante más eficaz. Logró disolver el 69.7% de Cu en 150 minutos con una concentración de H_2O_2 al 1% en la muestra MC, y el 96.3% de Cu en solo 60 minutos con una concentración del agente oxidante del 0.7% en la muestra MM.
- Se presentaron propuestas de reacciones, concluyendo que, para la muestra MC, todos los ambientes oxidantes favorecen la disolución de valores de cobre. En cambio, para la muestra MM, la implementación del permanganato de potasio resultó perjudicial provocando un fenómeno de polimerización de glicina, y por otro lado el ozono genera la oxidación del agente lixivante, impidiendo la formación del complejo diglicinato de cobre.



- La caracterización de los residuos obtenidos de los experimentos de lixiviación aportó un valor significativo al proyecto al revelar que, junto con la lixiviación de valores de cobre, el hierro permanece en los residuos sólidos.



APÉNDICE A

Los resultados obtenidos de los experimentos realizados para el estudio de la influencia de diferentes variables sobre la determinación del ambiente oxidativo idóneo se presentan en el listado de figuras que se muestra a continuación, en los cuales se especifican el porcentaje de disolución de cobre en cada prueba y el tiempo al cual se logró dicho resultado dando seguimiento al control químico.

Sistema malaquita glicina:

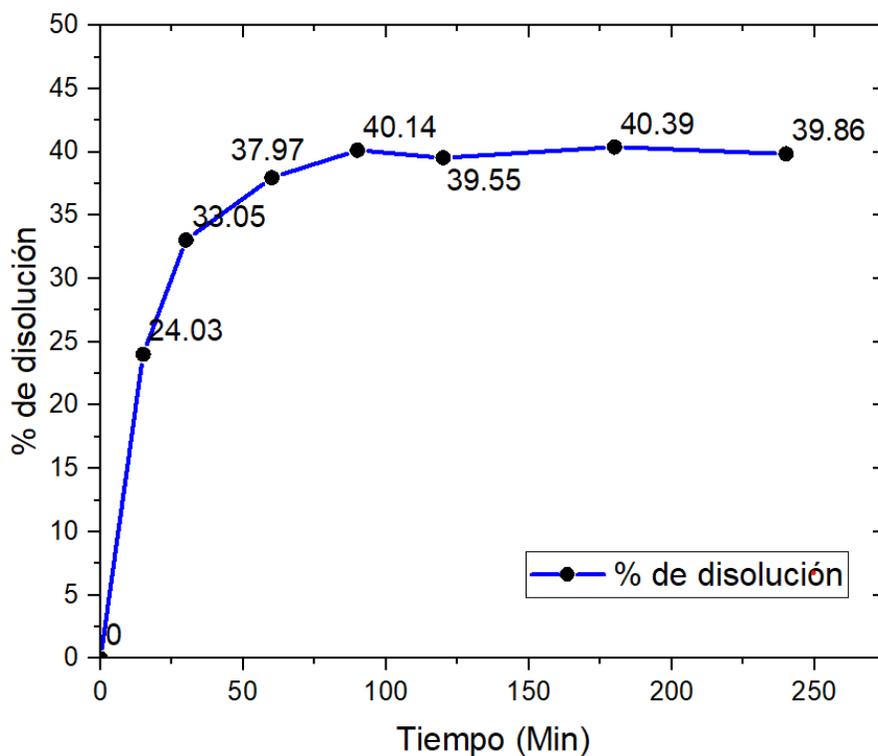


Figura A.1 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [0.1] molar

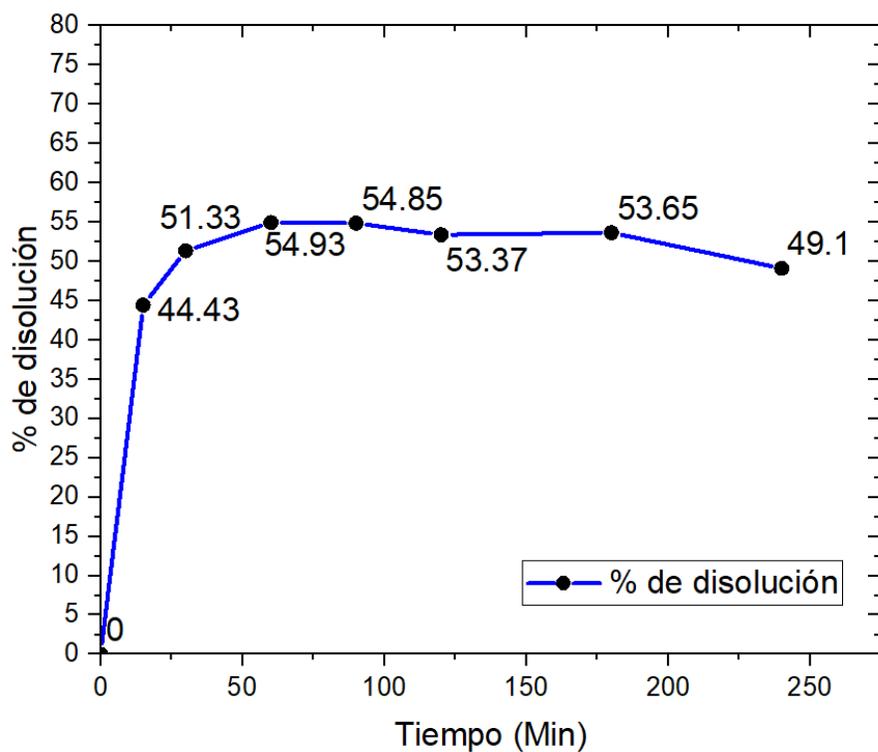


Figura A.2 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [0.3] molar

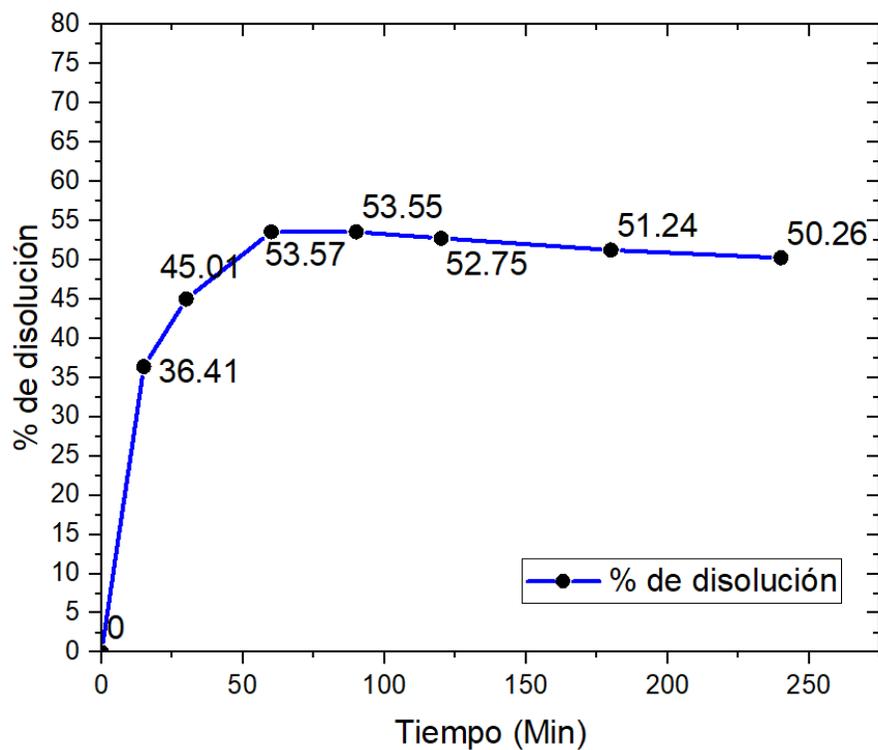


Figura A.3 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [0.5] molar

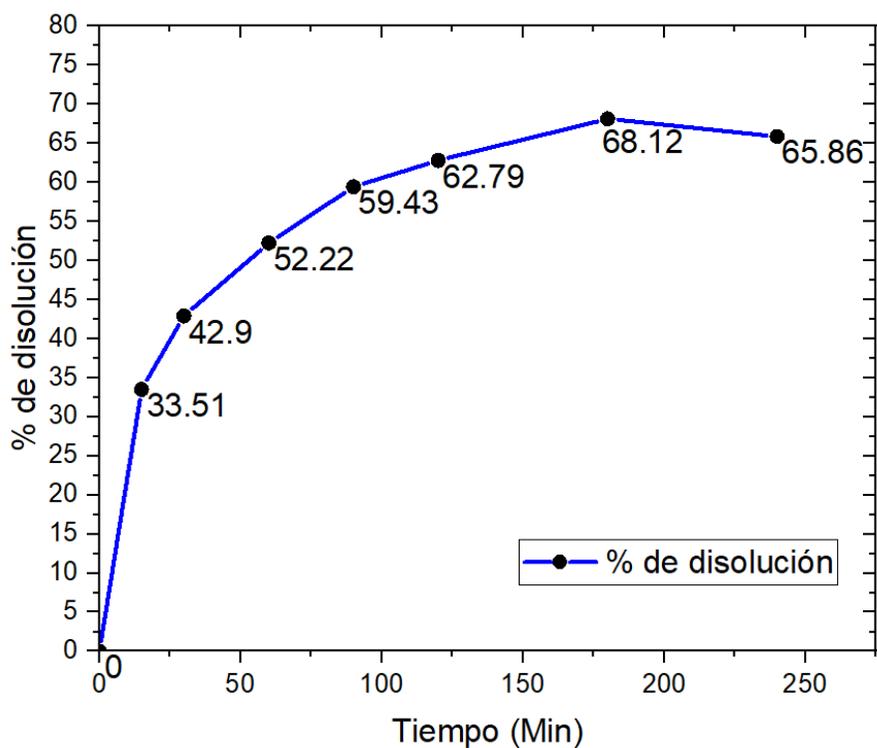


Figura A.4 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [0.7] molar

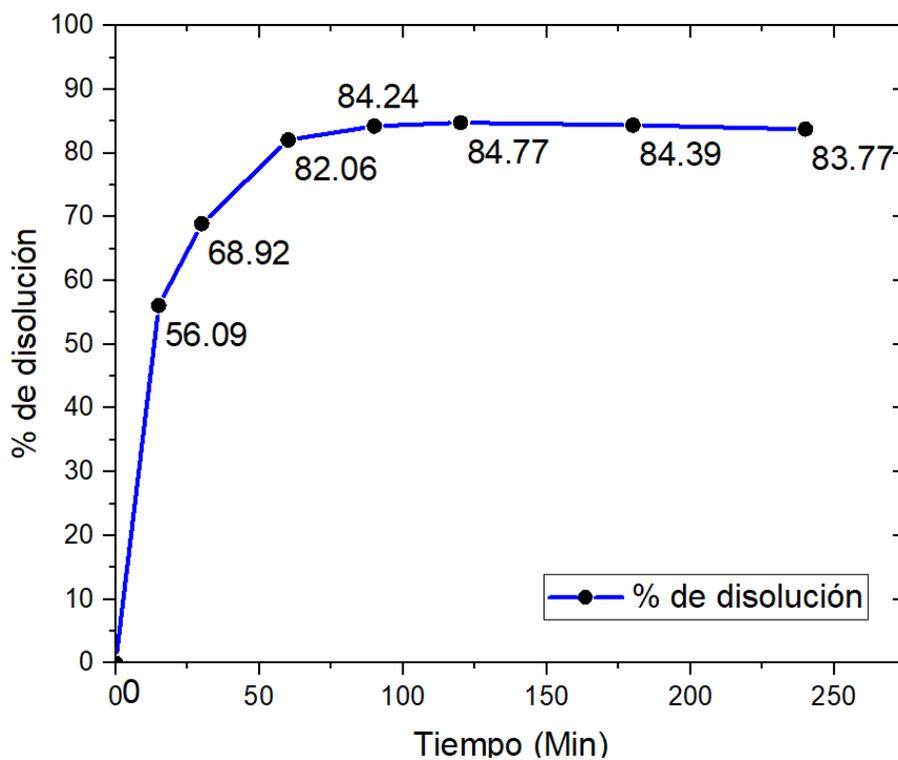


Figura A.5 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [1] molar

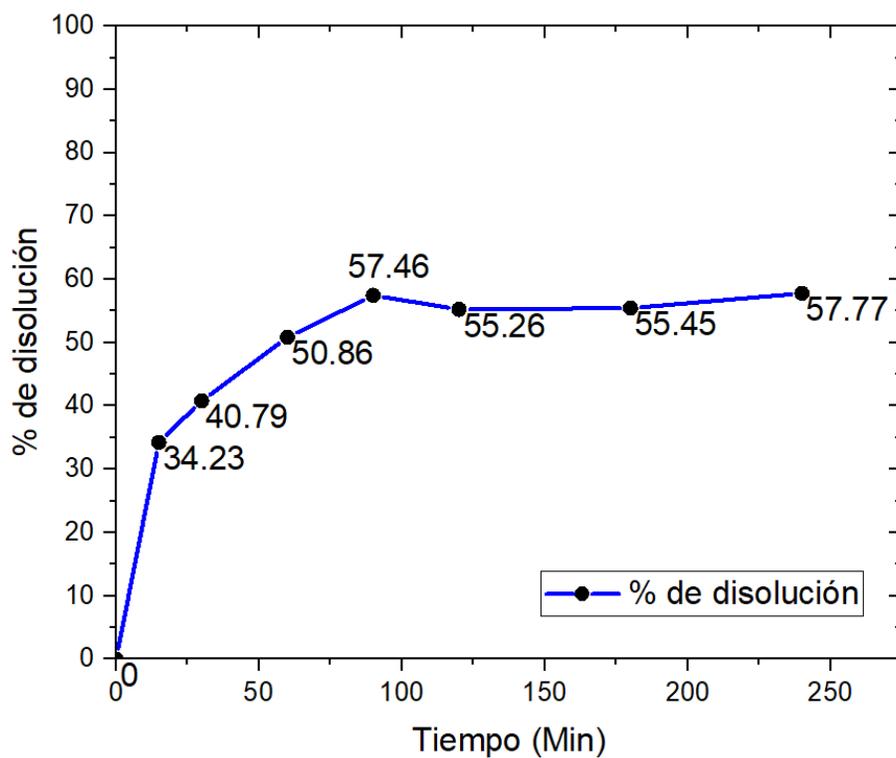


Figura A.6 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [1.5] molar

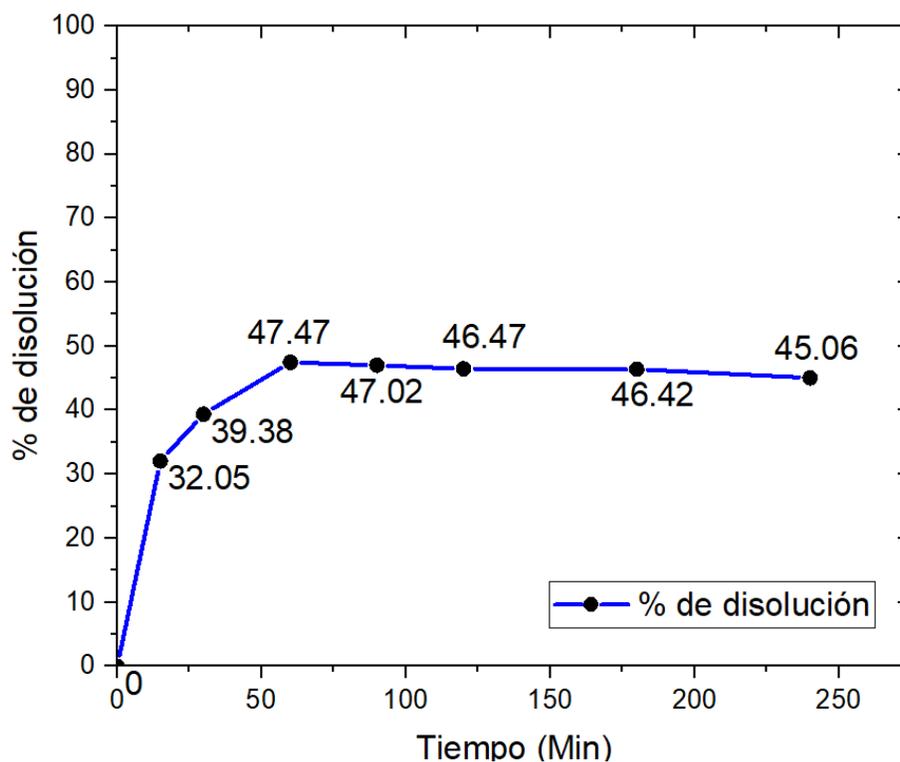


Figura A.7 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [2] molar



Sistema cuprita glicina:

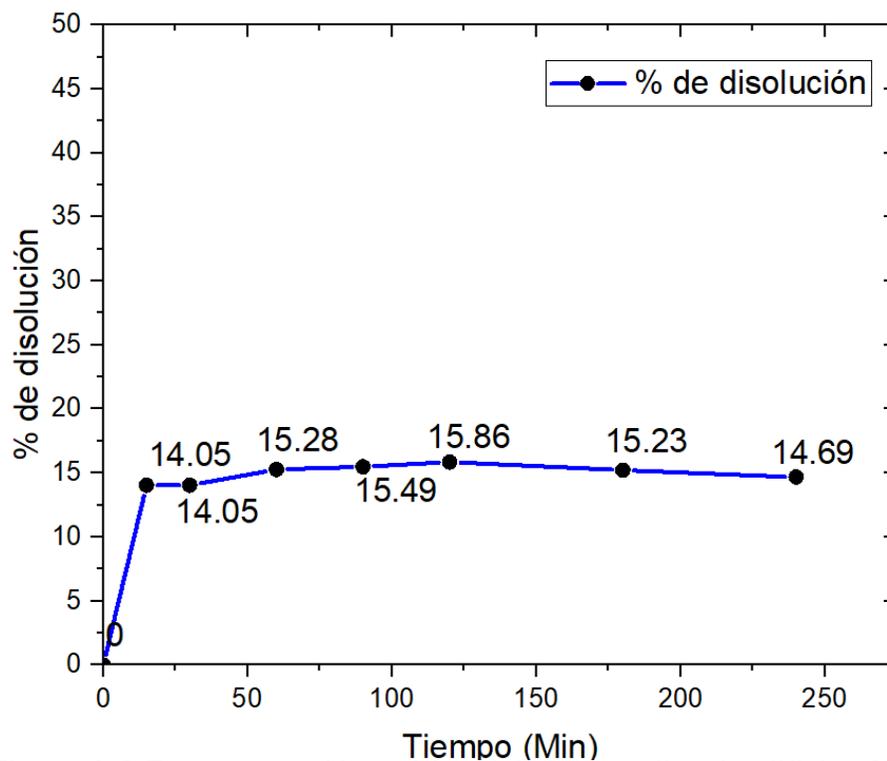


Figura A.8 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [0.1] molar

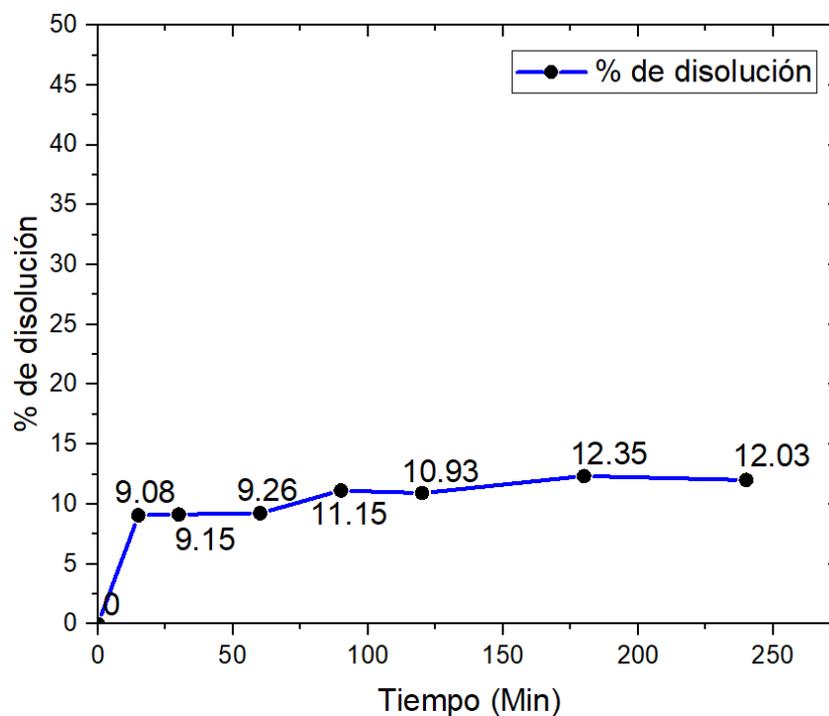


Figura A.9 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [0.3] molar

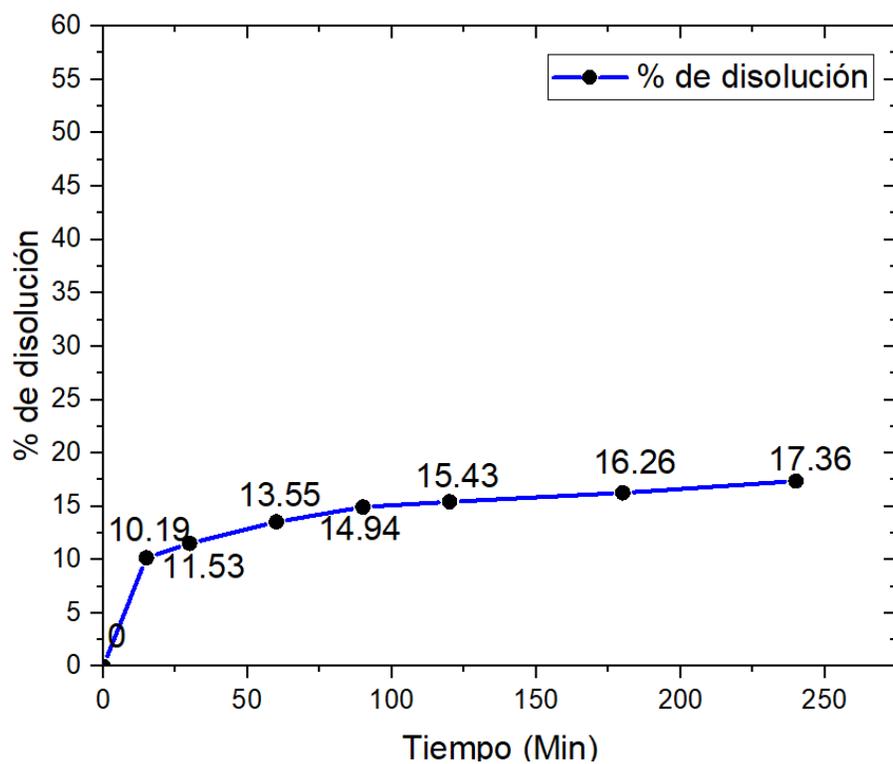


Figura A.10 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [0.5] molar

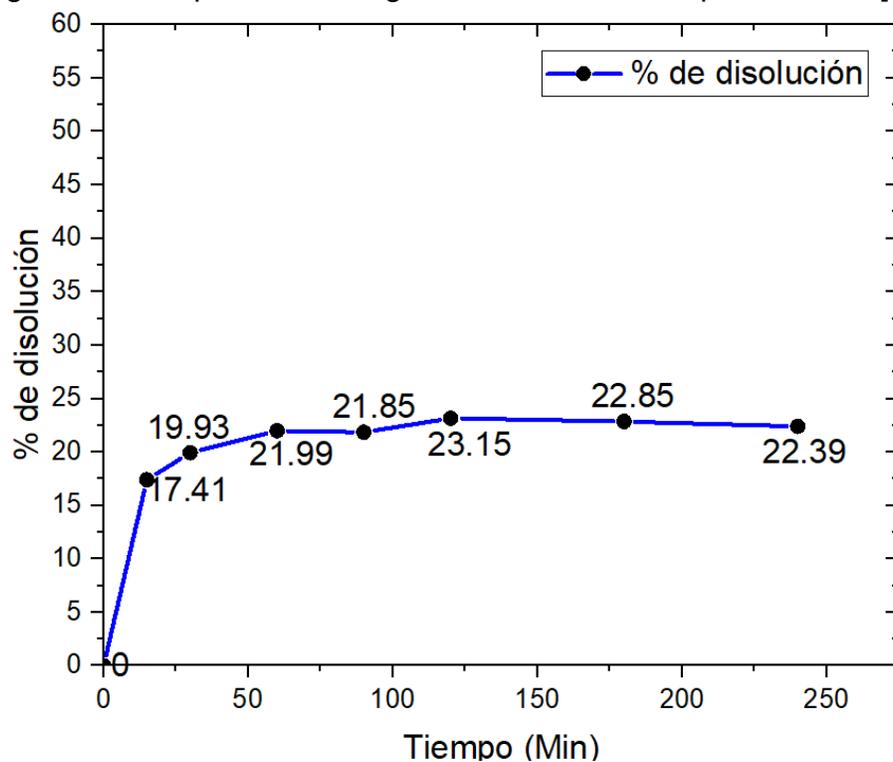


Figura A.11 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [0.7] molar

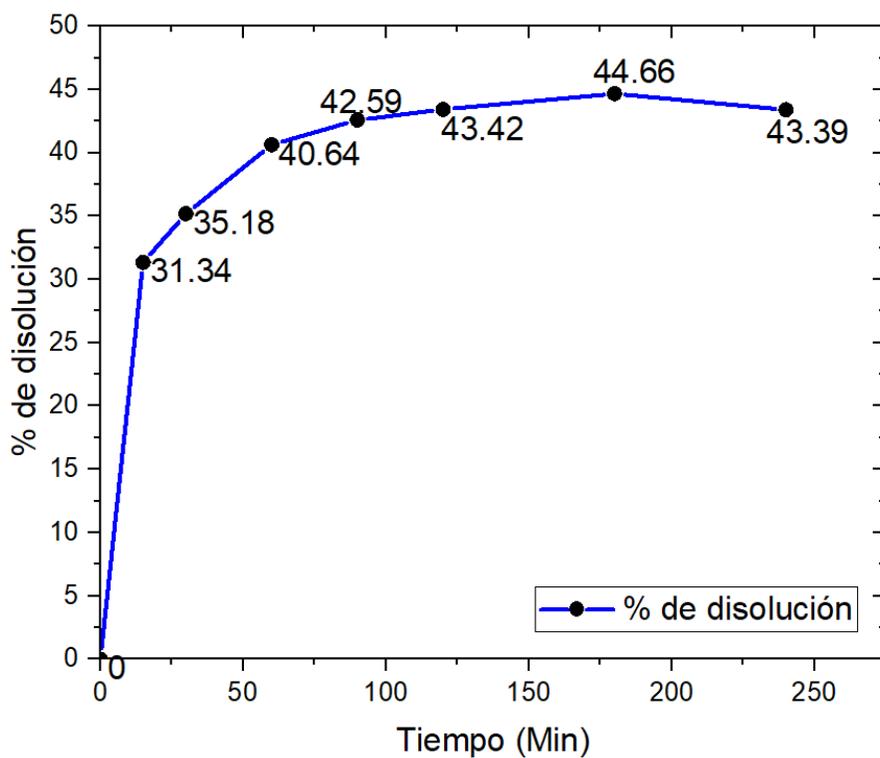


Figura A.12 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [1] molar

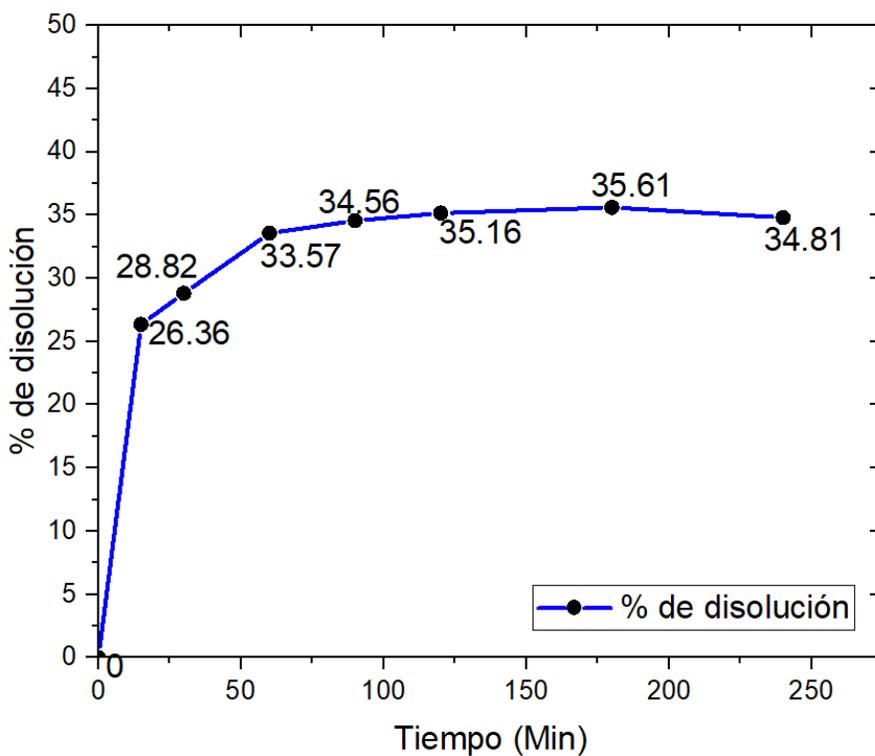


Figura A.13 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [1.5] molar

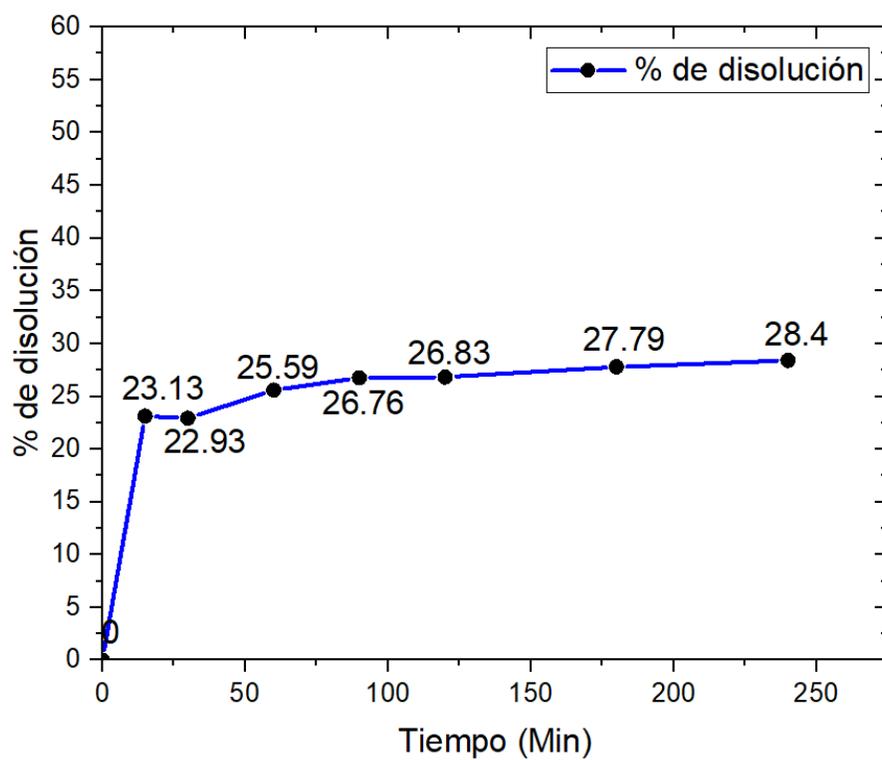


Figura A.14 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [2] molar



Sistema malaquita-Glicina-KMnO₄:

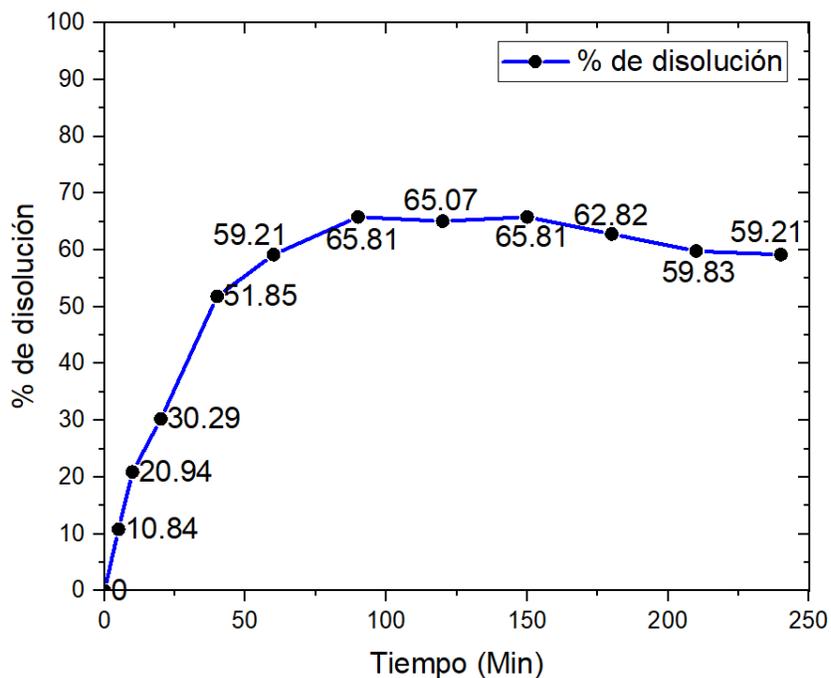


Figura A.15 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [1] molar-
KMnO₄ [0.005] molar

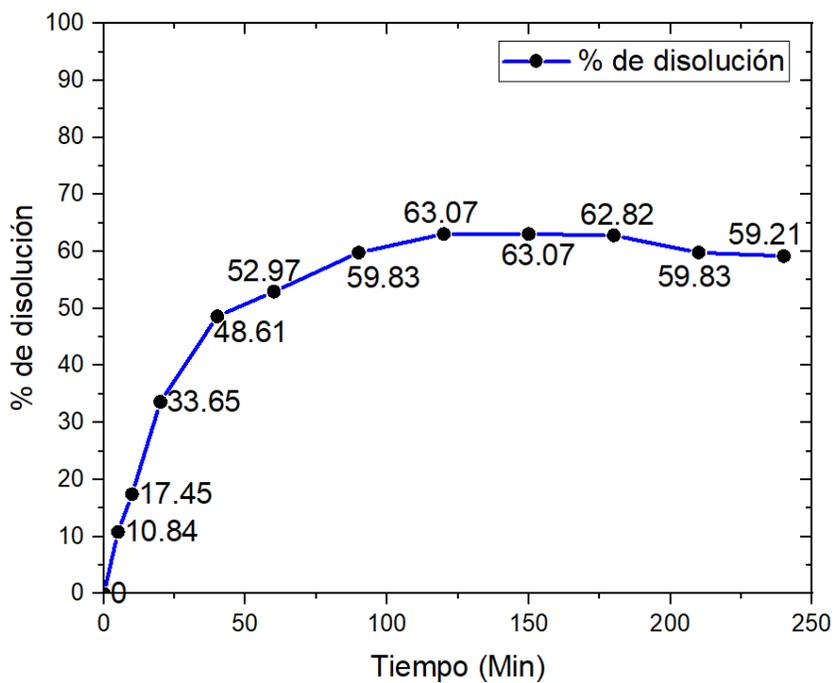


Figura A.16 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [1] molar-
KMnO₄ [0.01] molar

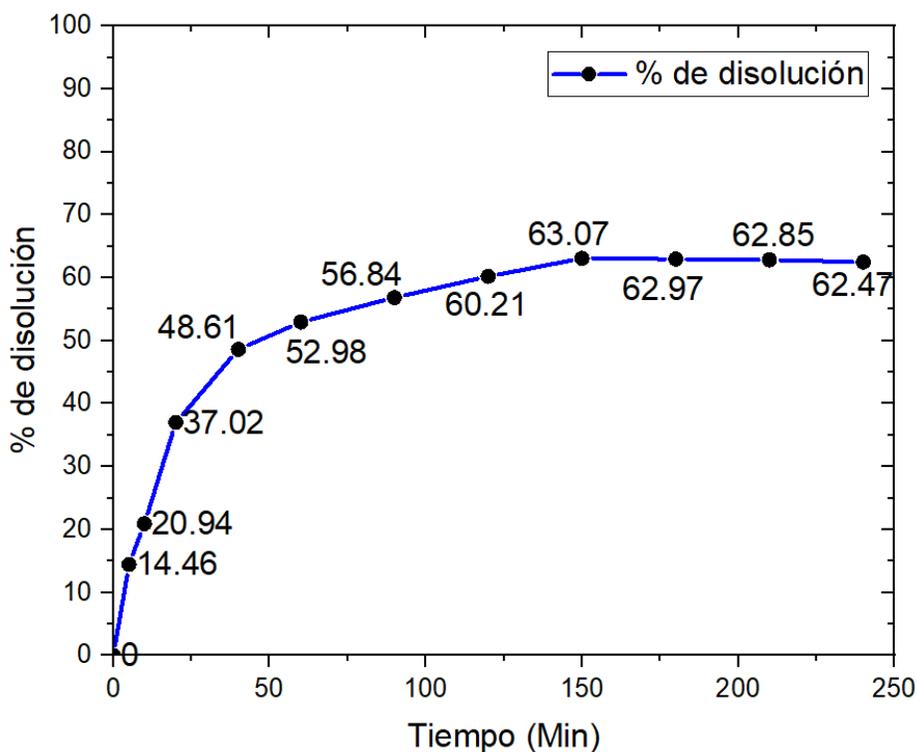


Figura A.17 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [1] molar-
 KMnO_4 [0.03] molar

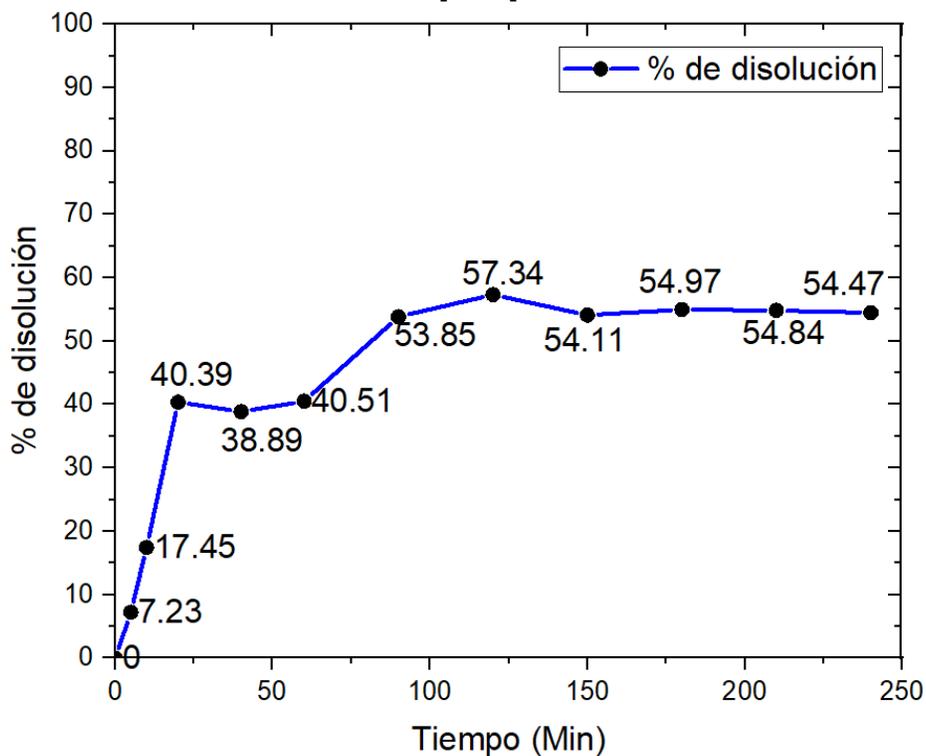


Figura A.18 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [1] molar-
 KMnO_4 [0.05] molar

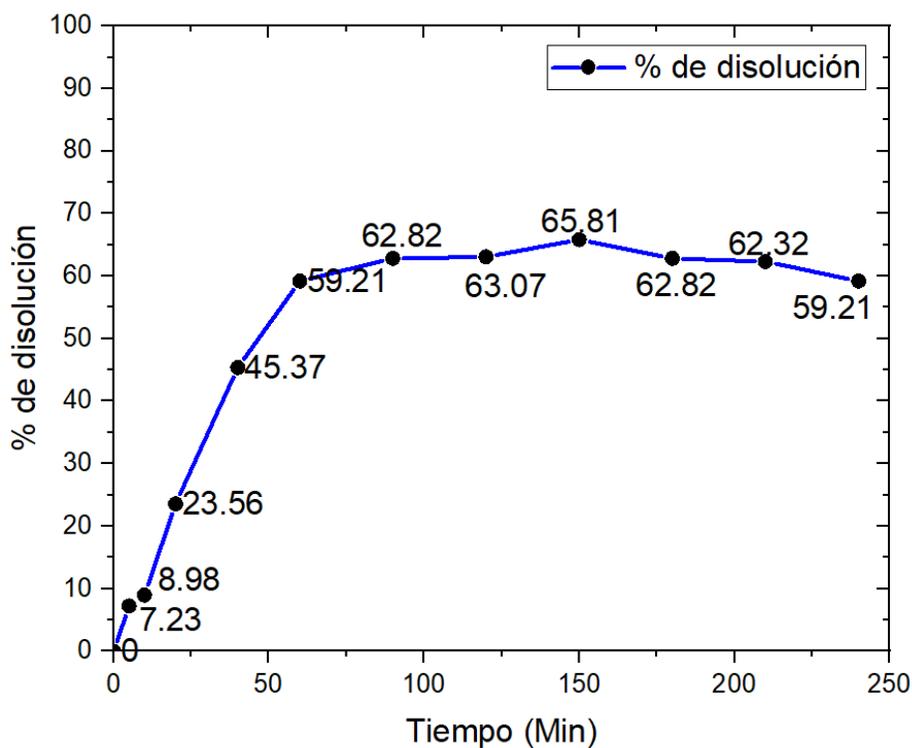


Figura A.19 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [1] molar-
 KMnO_4 [0.07] molar

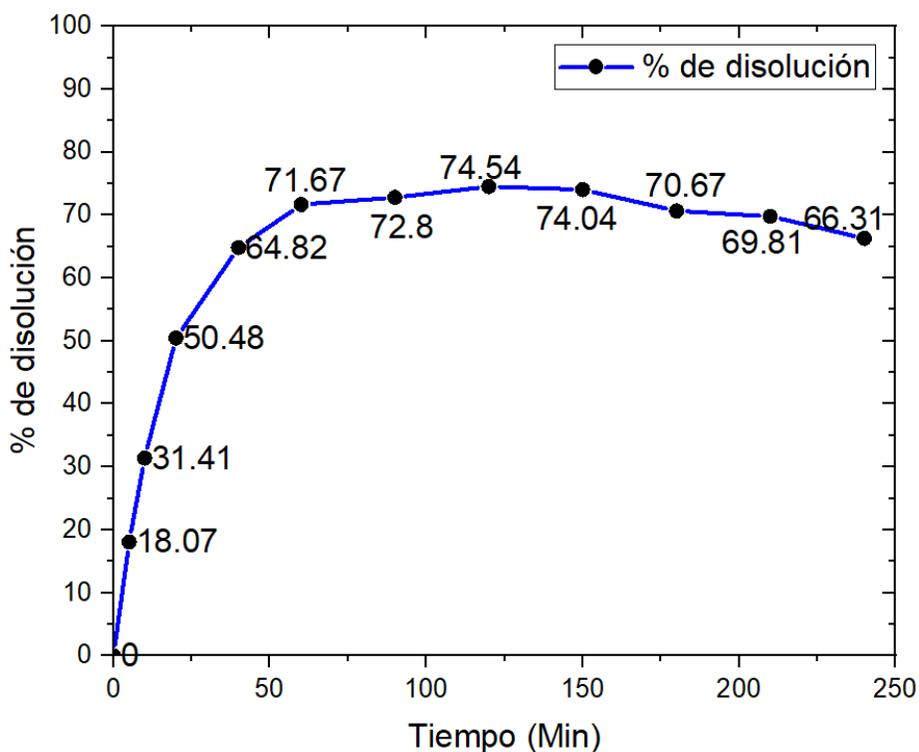


Figura A.20 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [1] molar-
 KMnO_4 [0.1] molar



Sistema Cuprita-Glicina-KMnO₄:

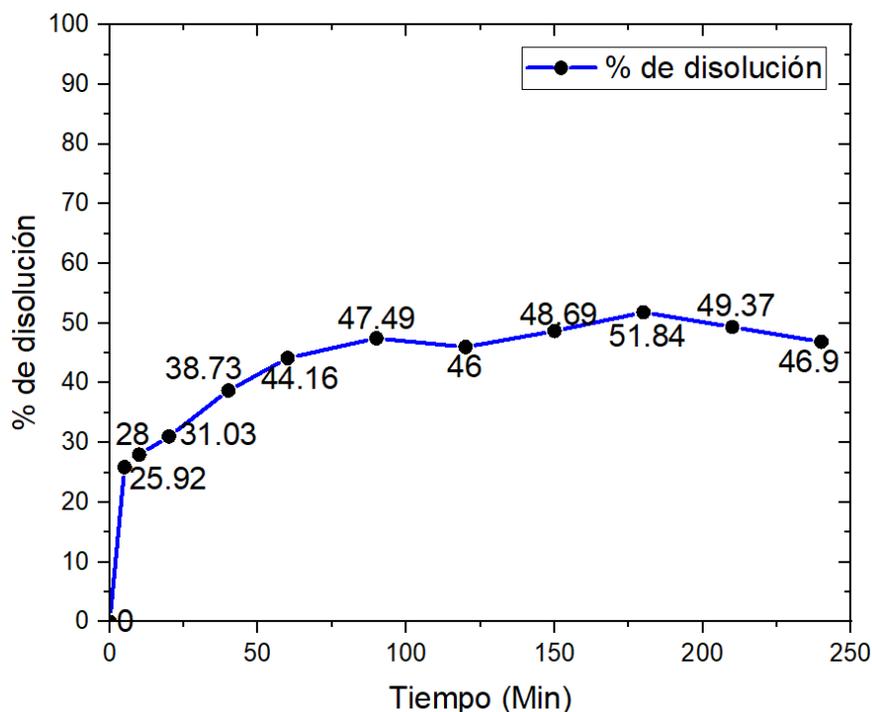


Figura A.21 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [1] molar-
KMnO₄ [0.005] molar

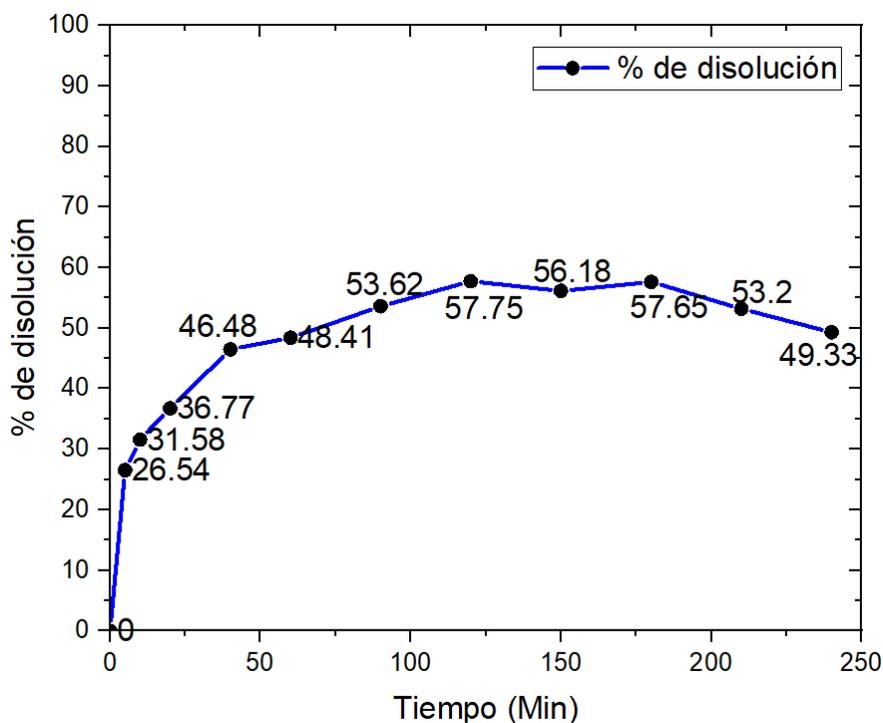


Figura A.22 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [1] molar-
KMnO₄ [0.01] molar

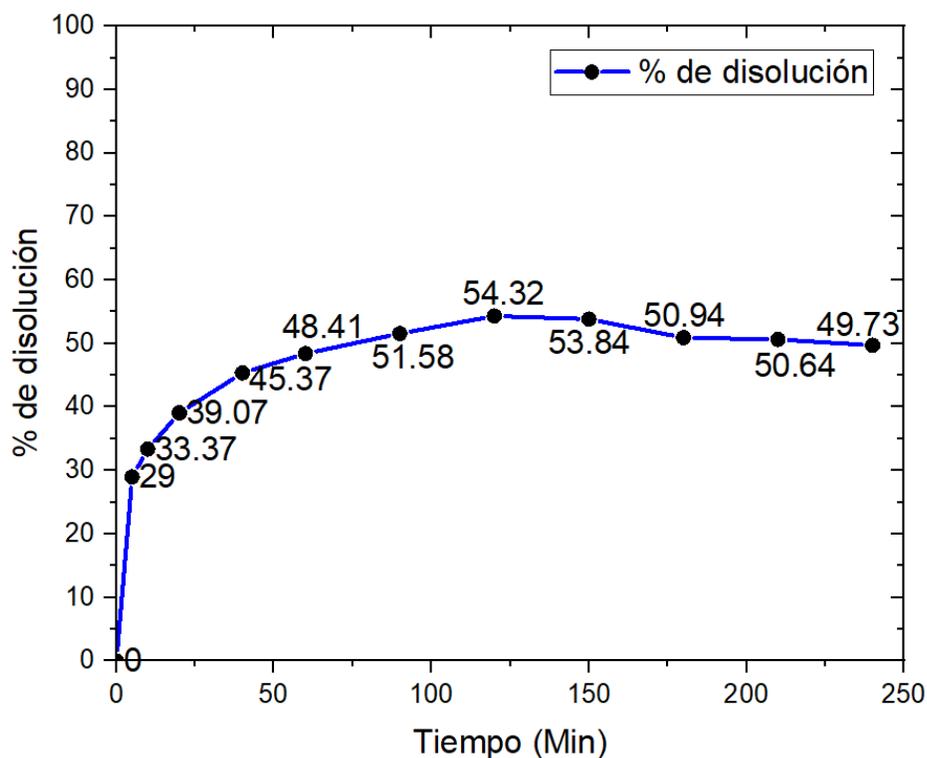


Figura A.23 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [1] molar-
 KMnO_4 [0.03] molar

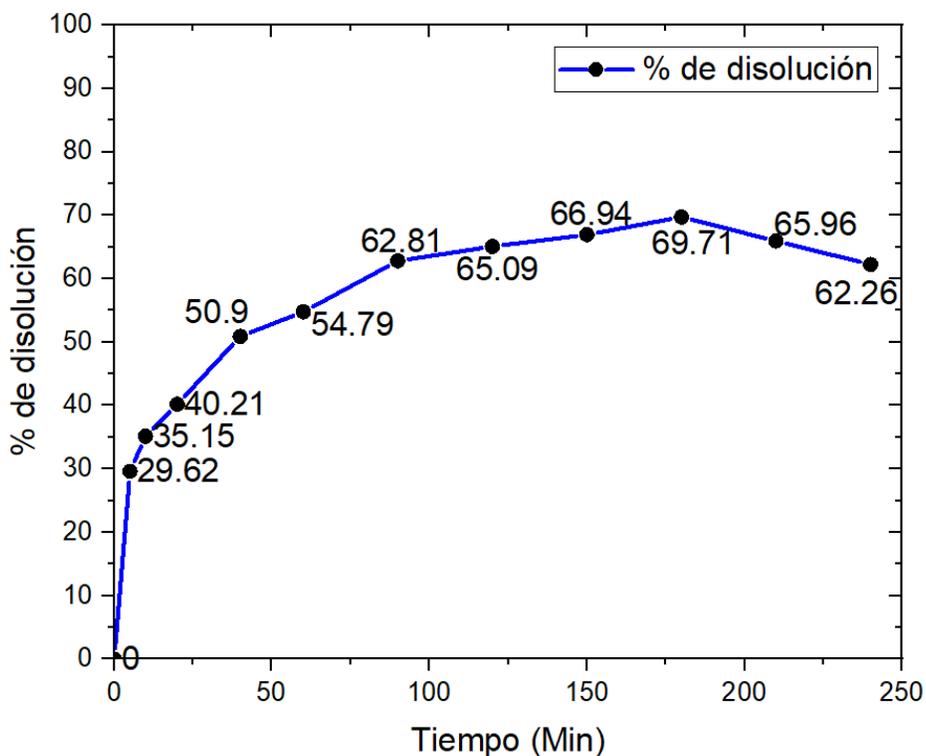


Figura A.24 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [1] molar-
 KMnO_4 [0.05] molar

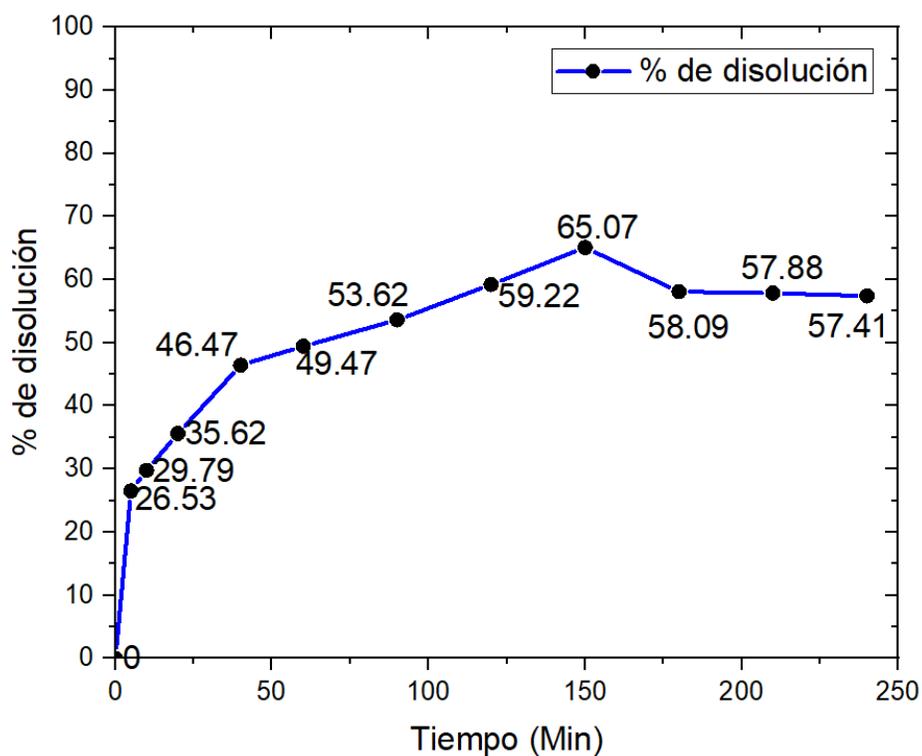


Figura A.25 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [1] molar-
 KMnO_4 [0.07] molar

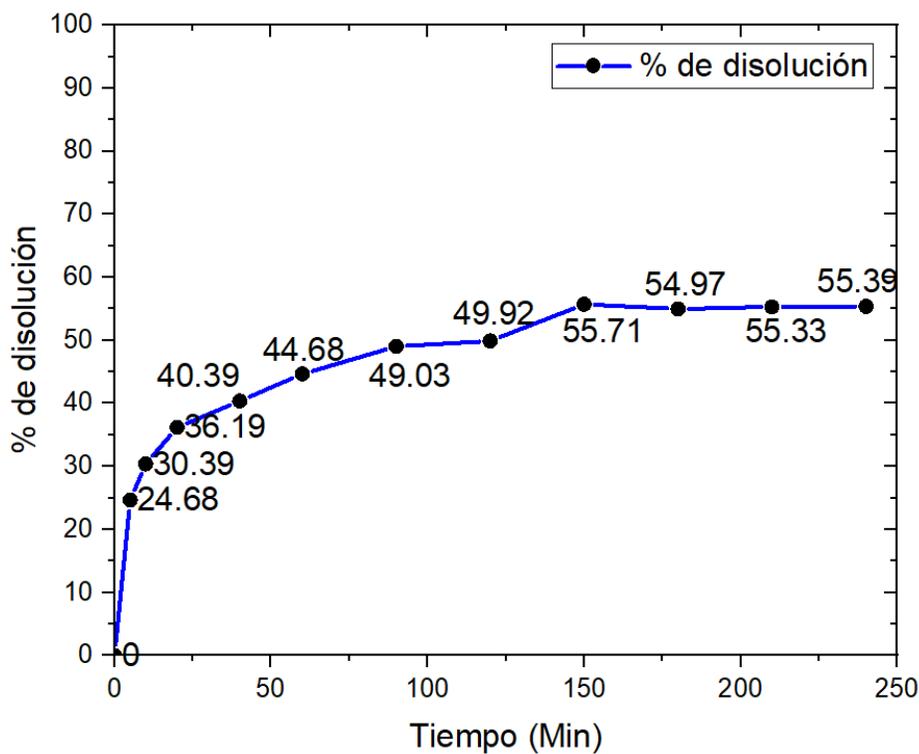


Figura A.26 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [1] molar-
 KMnO_4 [0.1] molar



Sistema malaquita-Glicina-H₂O₂:

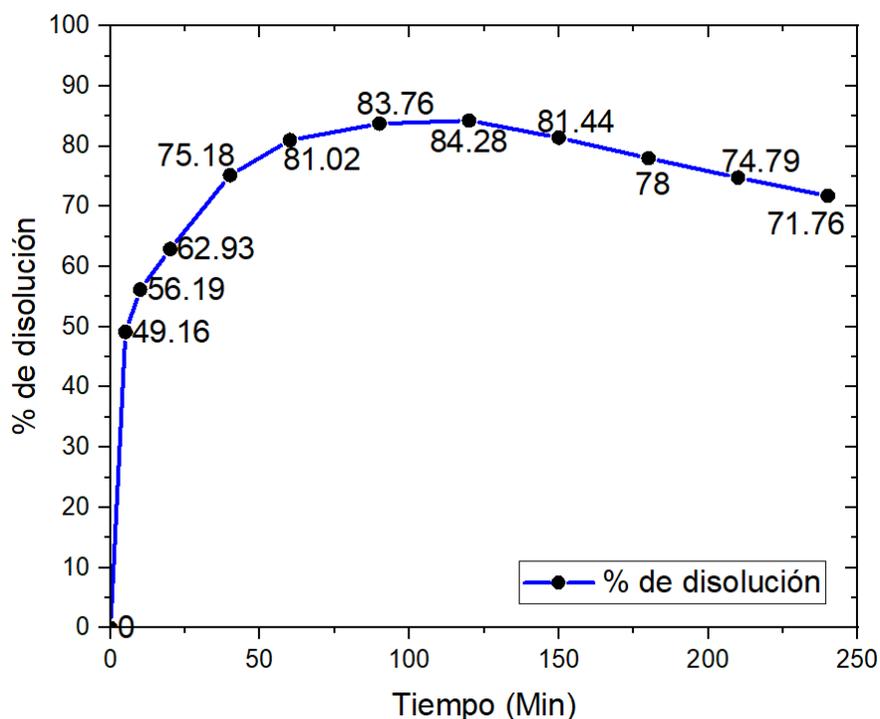


Figura A.27 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [1] molar-
H₂O₂ al 0.5%

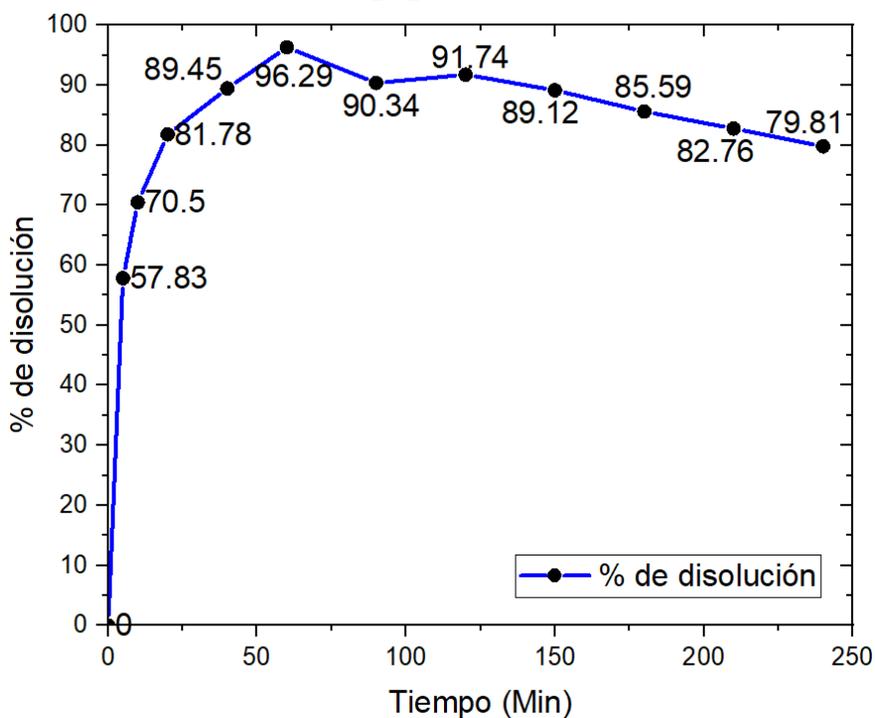


Figura A.28 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [1] molar-
H₂O₂ al 0.7%

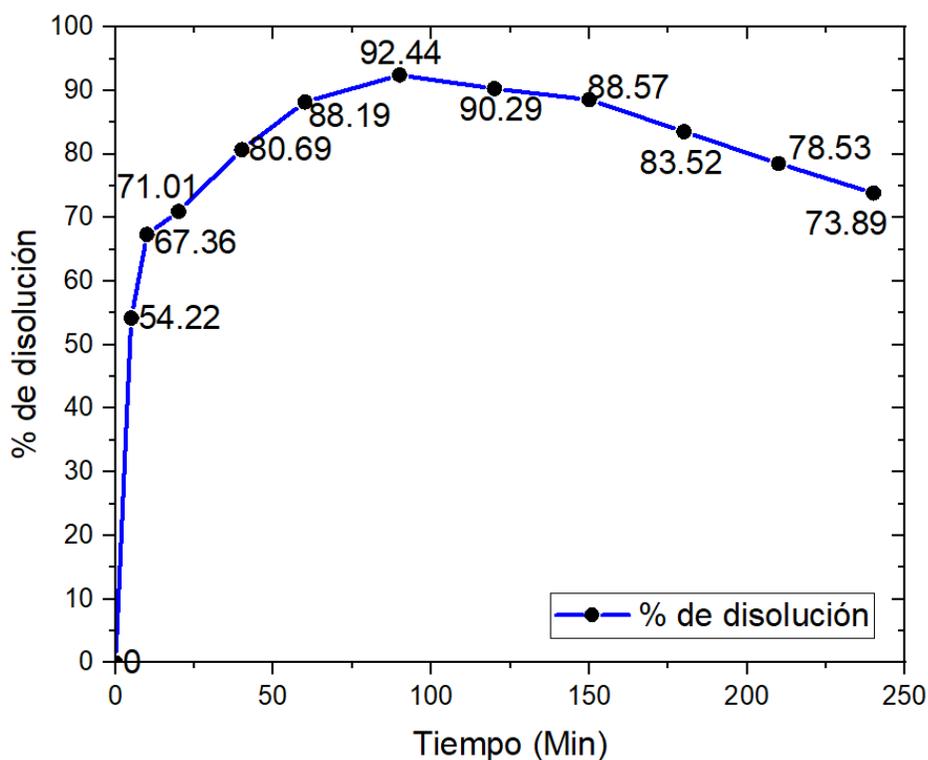


Figura A.29 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [1] molar- H_2O_2 al 1%

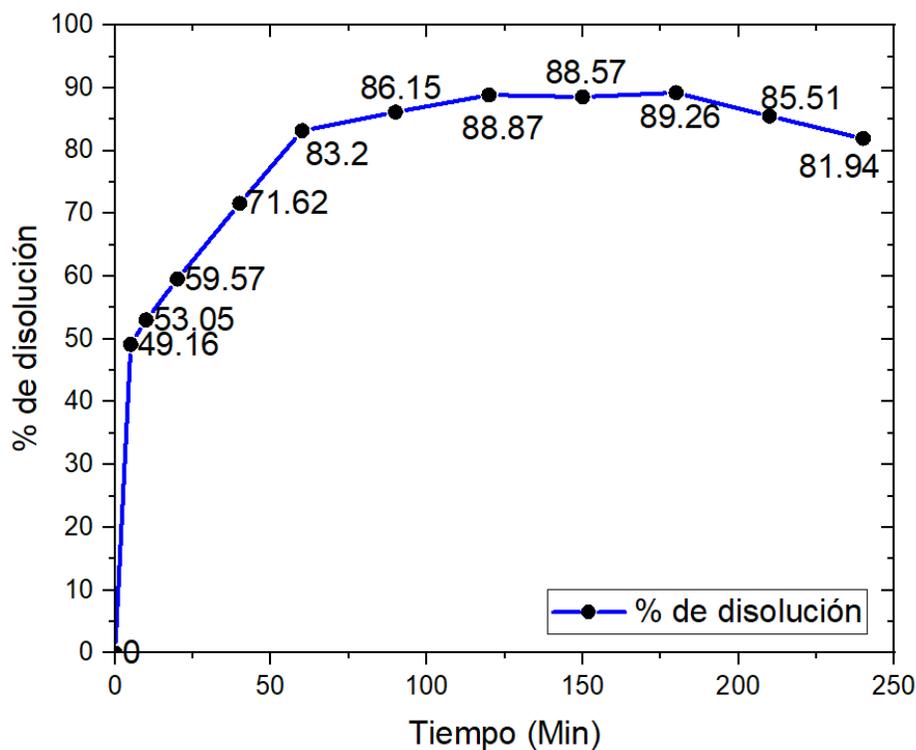


Figura A.30 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [1] molar- H_2O_2 al 1.5%

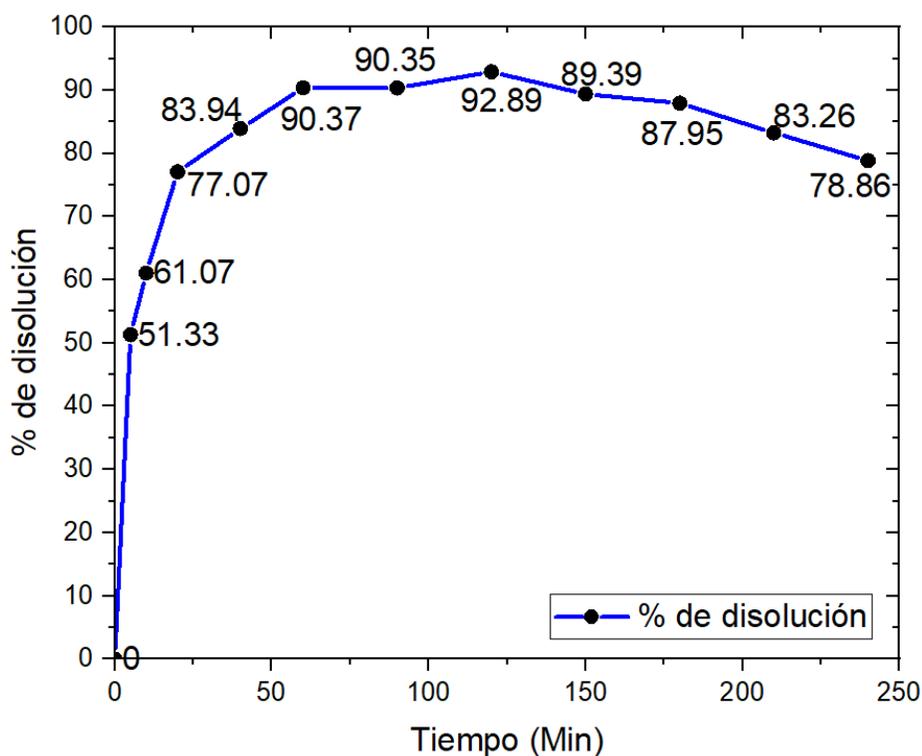


Figura A.31 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [1] molar-
 H_2O_2 al 2%

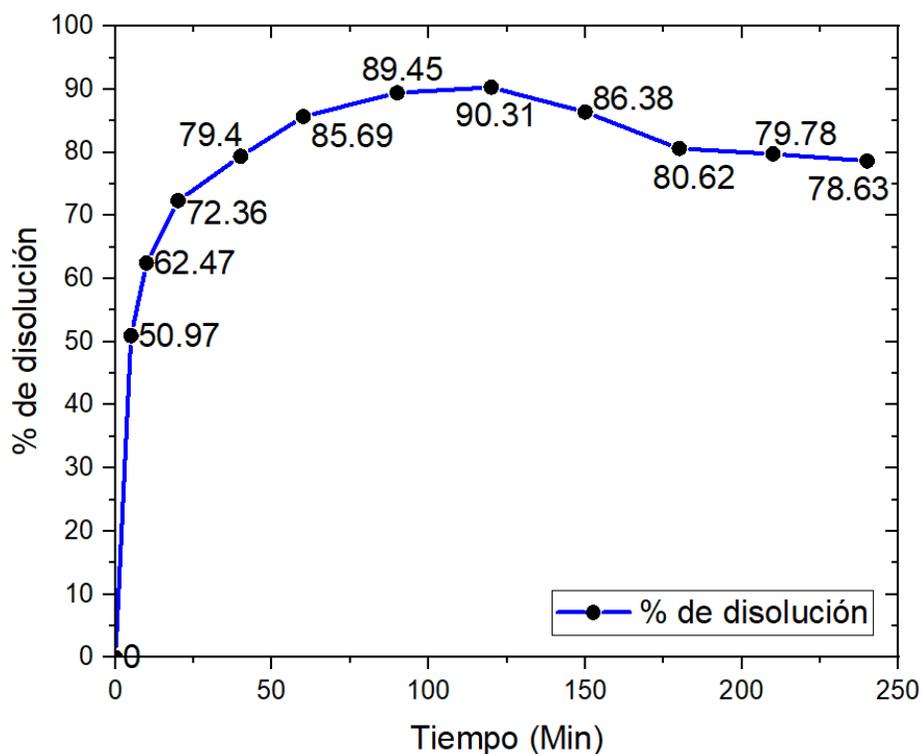


Figura A.32 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [1] molar-
 H_2O_2 al 3%



Sistema Cuprita-Glicina-H₂O₂:

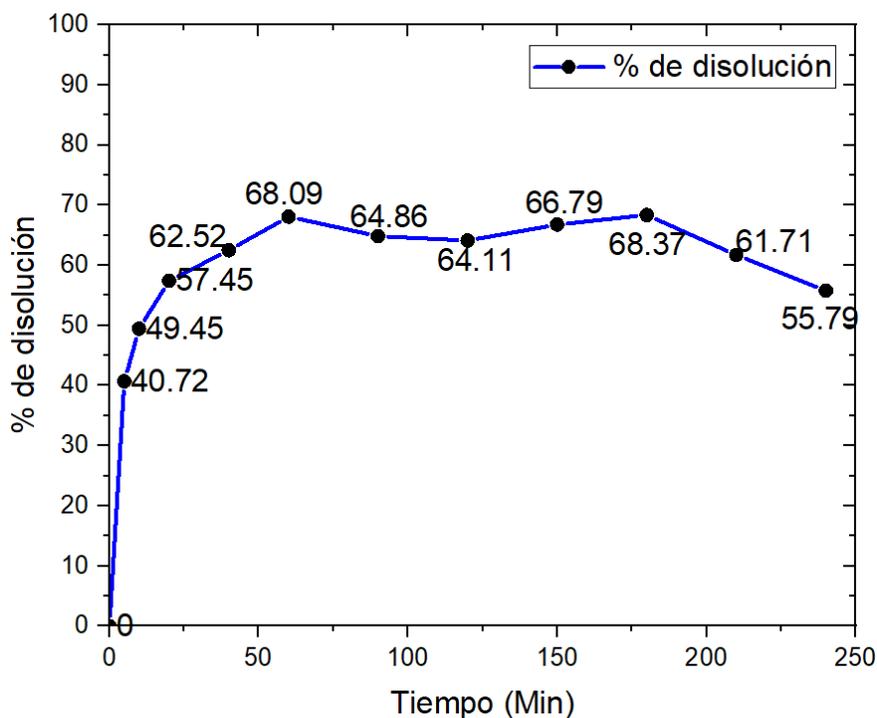


Figura A.33 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [1] molar-
H₂O₂ al 0.5%

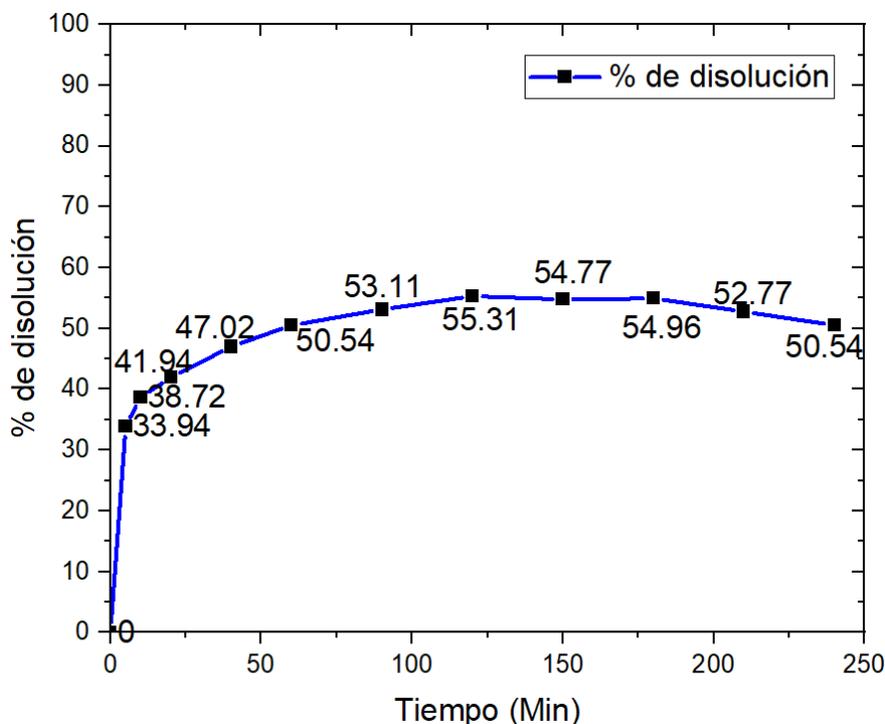


Figura A.34 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [1] molar-
H₂O₂ al 0.7%

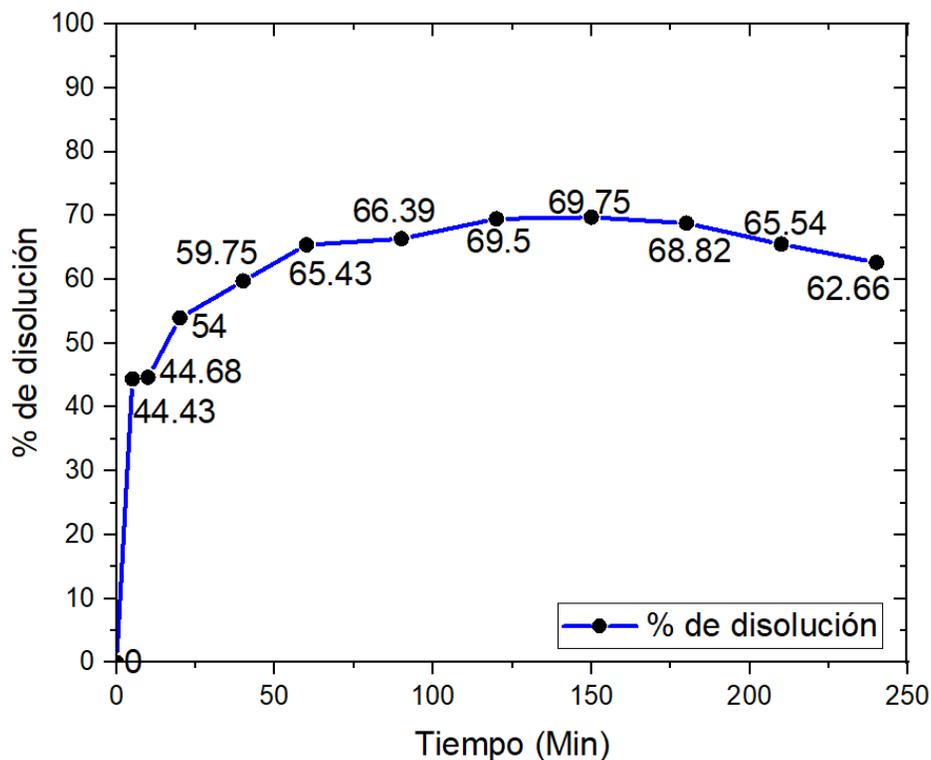


Figura A.35 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [1] molar-
 H_2O_2 al 1%

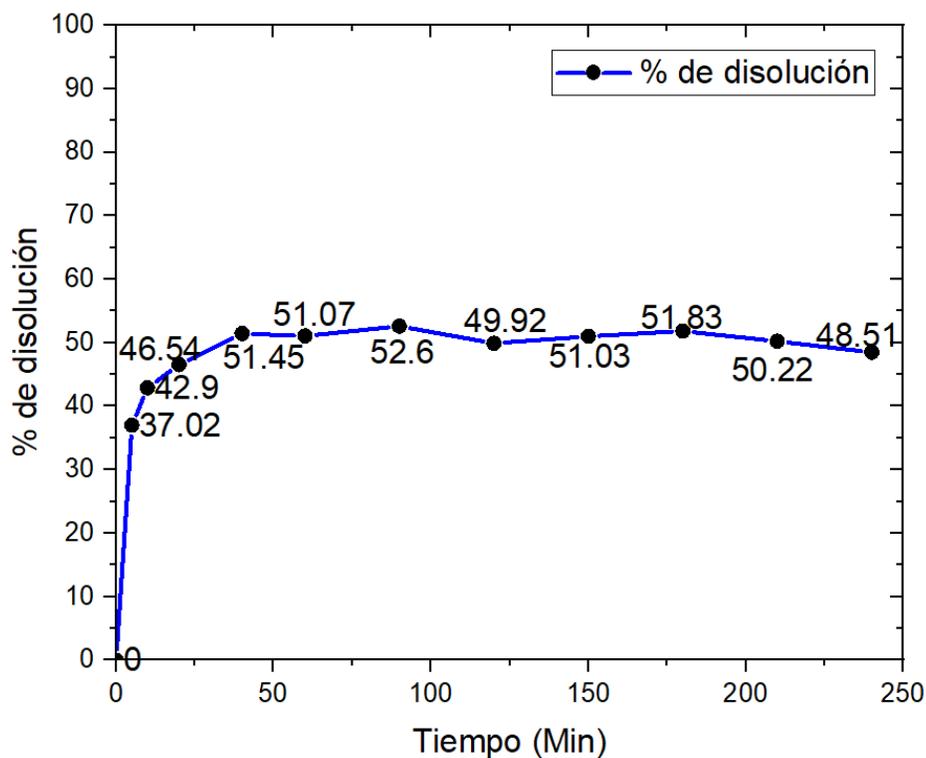


Figura A.36 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [1] molar-
 H_2O_2 al 1.5%

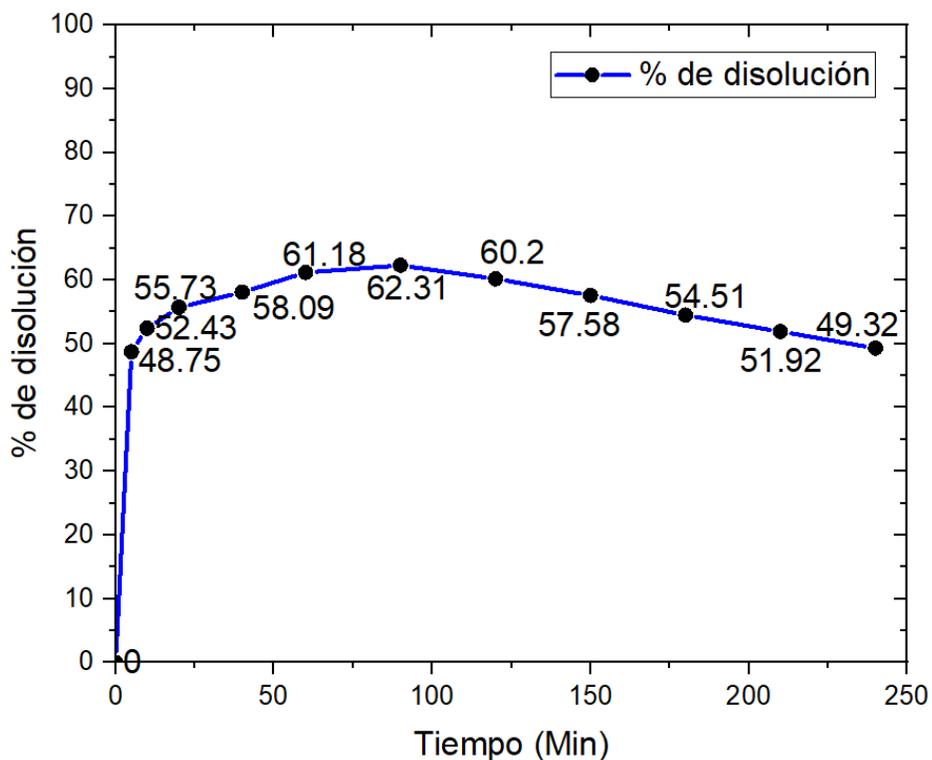


Figura A.37 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [1] molar-
H₂O₂ al 2%

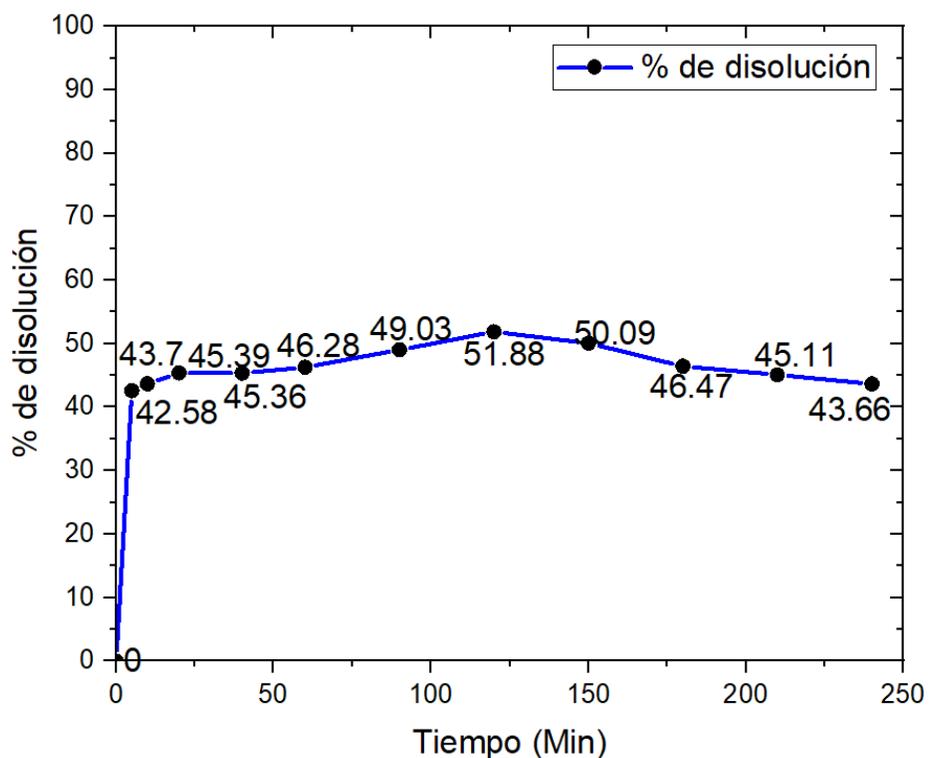


Figura A.38 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [1] molar-
H₂O₂ al 3%



Sistema malaquita-Glicina-H₂O₂:

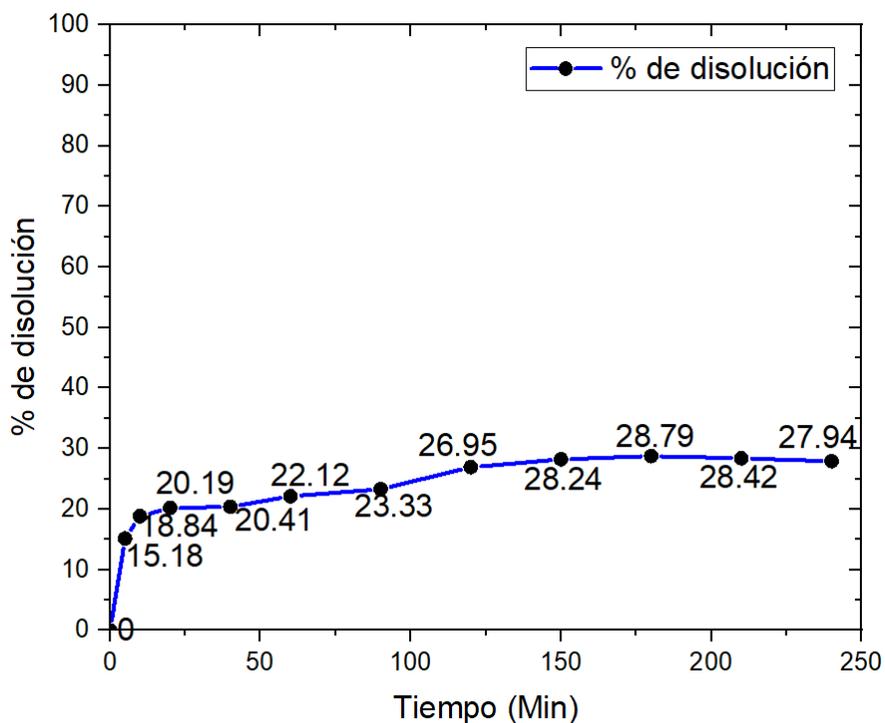


Figura A.39 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [1] molar-
O₃ 0.2 L/min

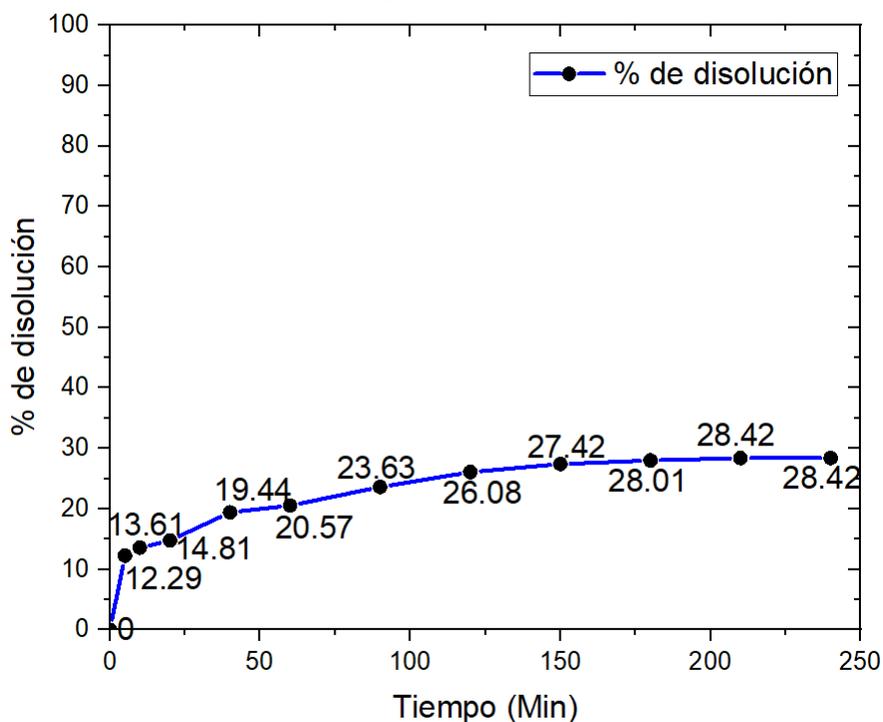


Figura A.40 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [1] molar-
O₃ 0.5 L/min

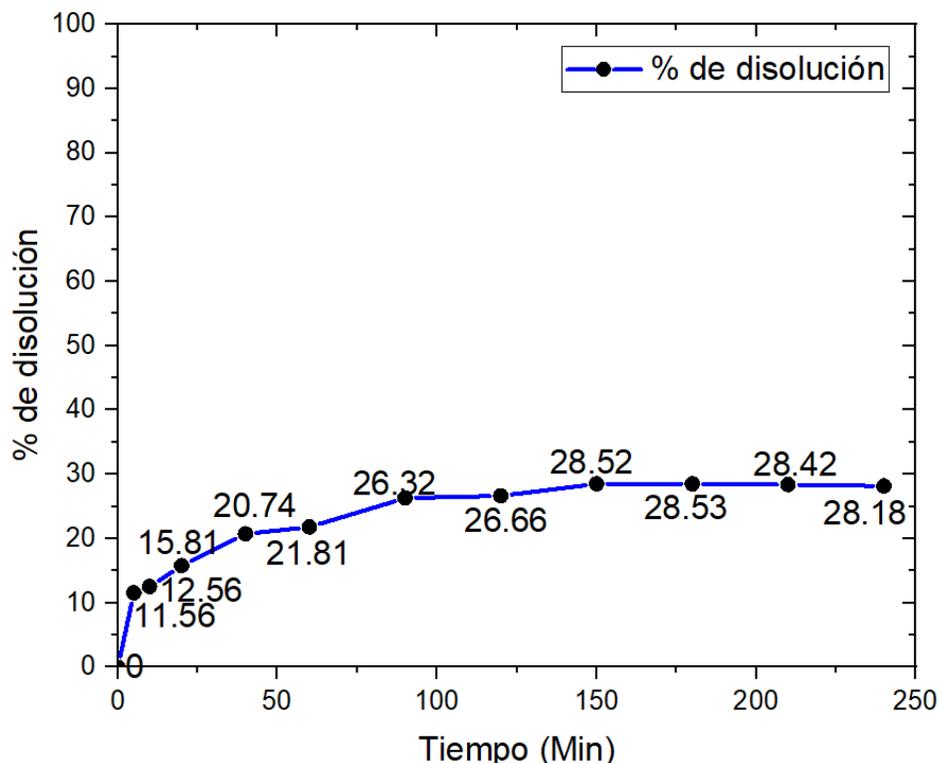


Figura A.41 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [1] molar-
O₃ 0.7 L/min

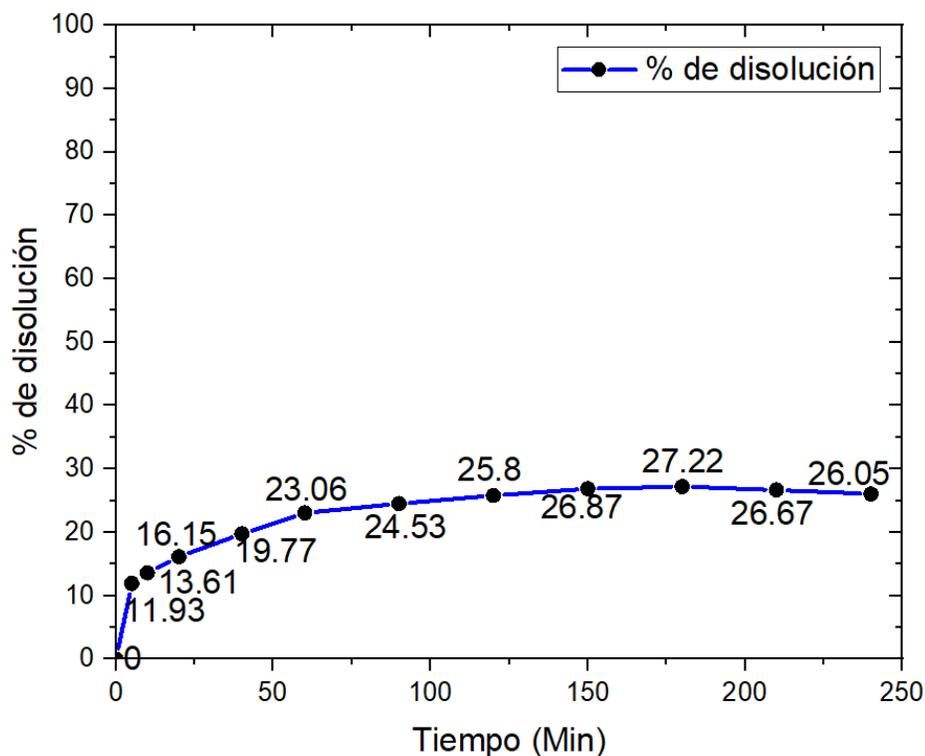


Figura A.42 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [1] molar-
O₃ 1 L/min

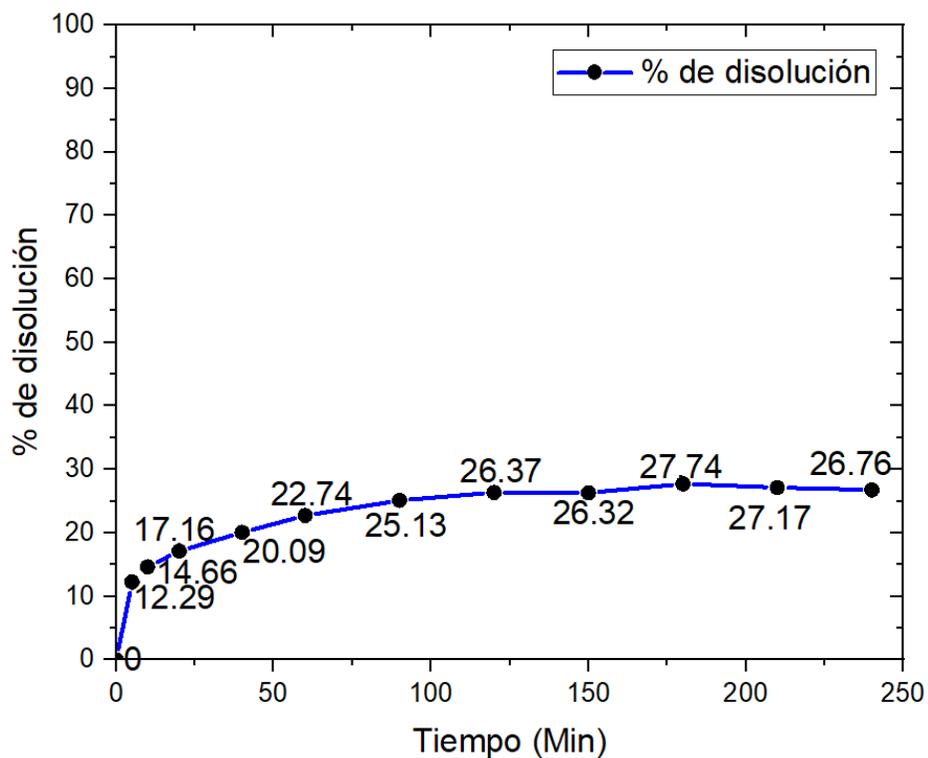


Figura A.43 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [1] molar-
O₃ 1.5 L/min

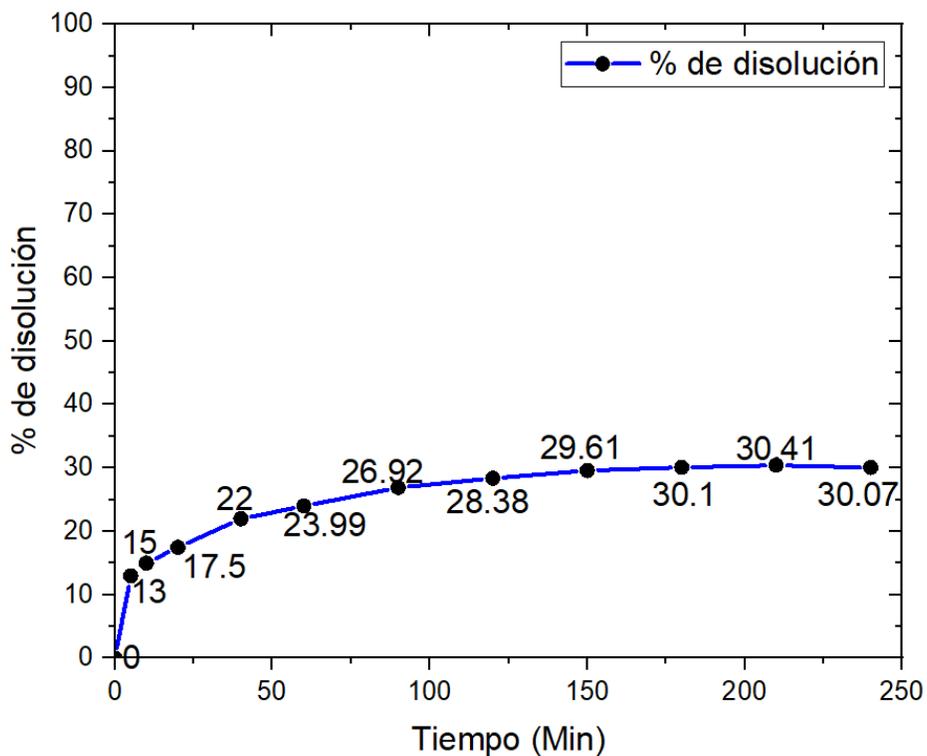


Figura A.44 Representación gráfica del sistema Malaquita-Glicina [1] molar-
O₃ 2 L/min



Sistema Cuprita-Glicina-H₂O₂:

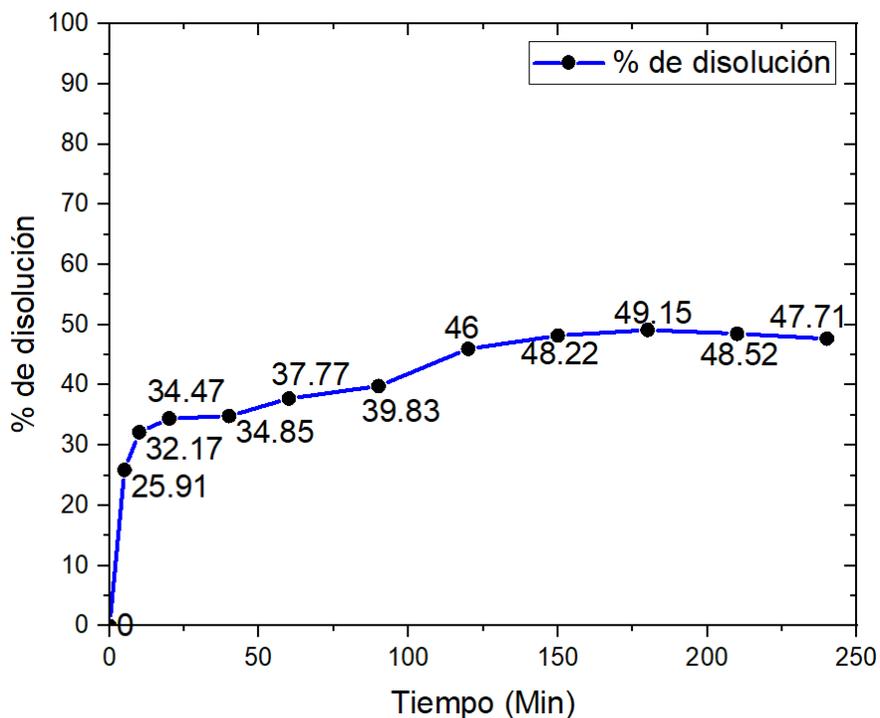


Figura A.45 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [1] molar-
O₃ 0.2 L/min

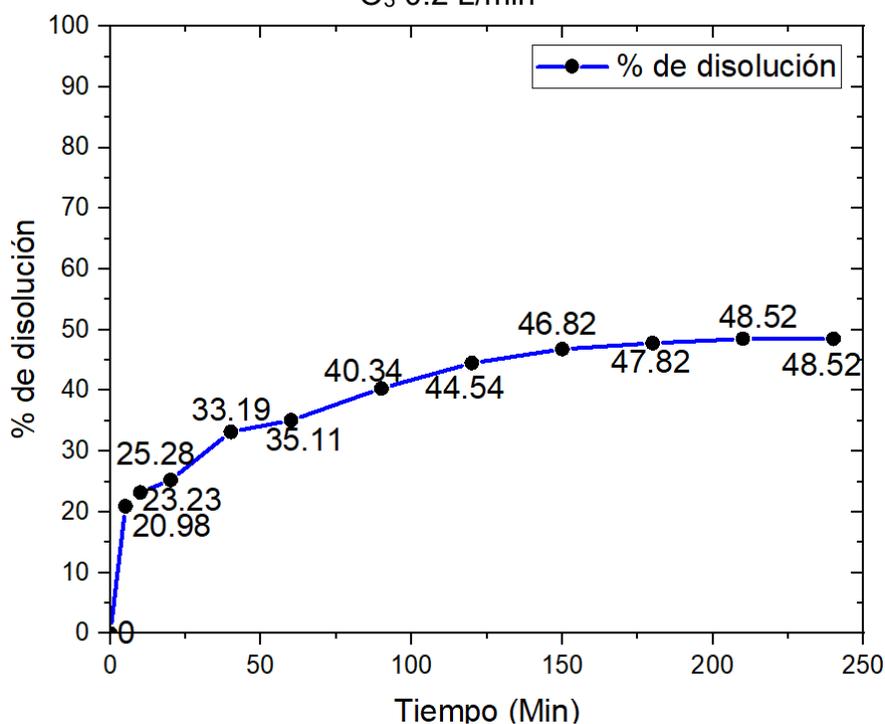


Figura A.46 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [1] molar-
O₃ 0.5 L/min

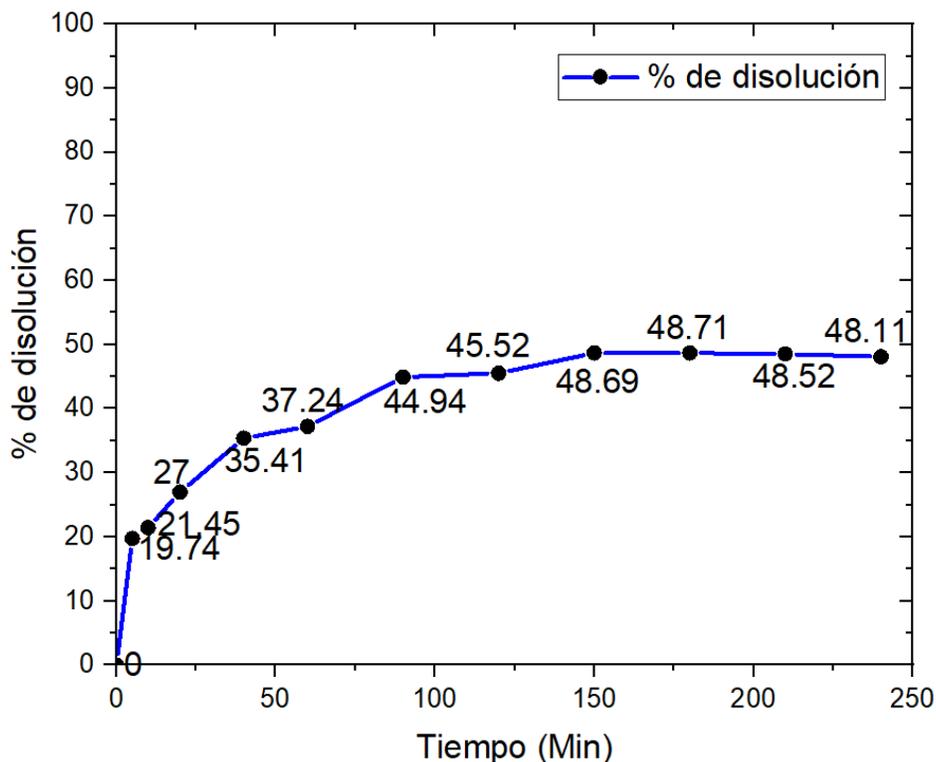


Figura A.47 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [1] molar-
O₃ 0.7 L/min

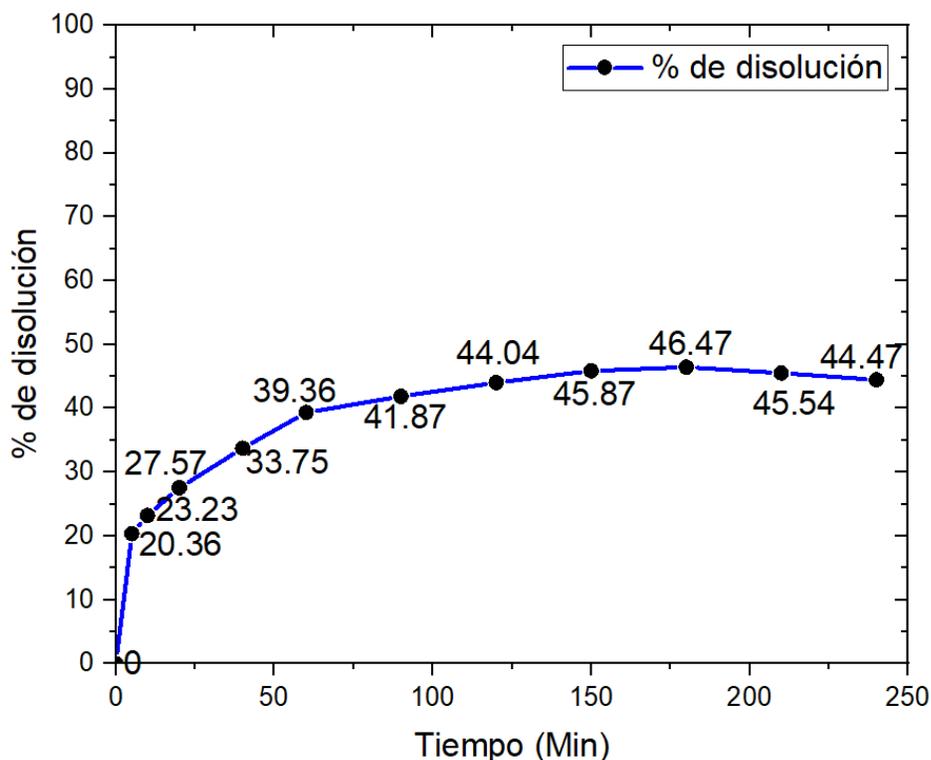


Figura A.48 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [1] molar-
O₃ 1 L/min

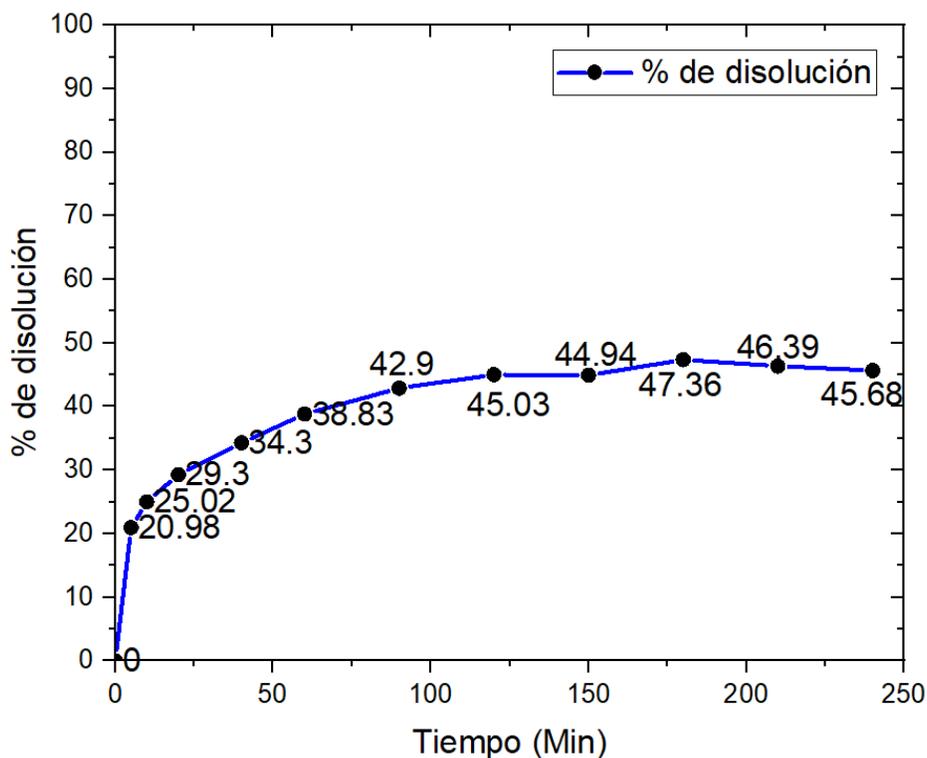


Figura A.49 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [1] molar-
O₃ 1.5 L/min

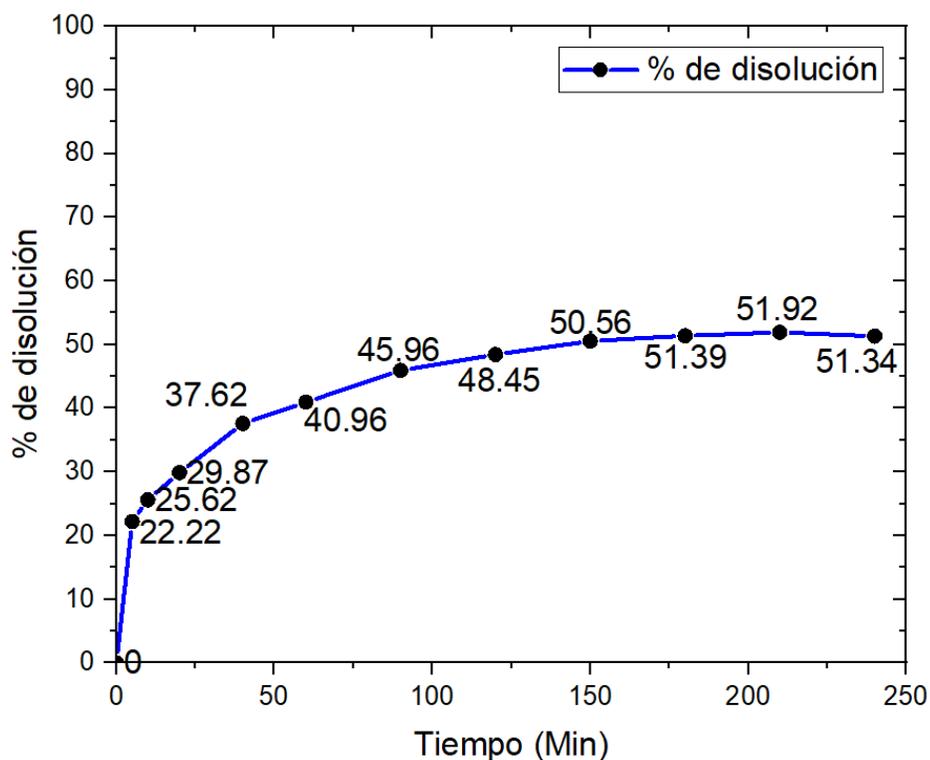


Figura A.50 Representación gráfica del sistema Cuprita-Glicina [1] molar-
O₃ 2 L/min



REFERENCIAS

Anchapuri Calderon, J. G. (2019). Lixiviación de minerales óxidos de cobre con reactivo glicina para recuperación de cobre del yacimiento Pucará Puno.

Apaza Meza, M. R. (2018). Estudio y determinación de los parámetros óptimos para la lixiviación de concentrados de minerales de oro empleando el tiosulfato de sodio como agente lixivante.

Arias Dousdebés, V. (2018) Recuperación de oro a partir de minerales auríferos, con glicina como agente lixivante. Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria. Escuela Politécnica Nacional.

Ballester, A., Sancho, S. y Verdeja, L. (2013) Metalurgia Extractiva Quinta Edición. Síntesis. ISBN 9788477388029. 2013.

Belen J. & T. Cano de Terrones (2022) Proceso alternativo de lixiviación selectiva mediante el uso del sistema glicina — peróxido y su adsorción en carbón activo para industrias minero metalúrgicas con la finalidad de optimizar la recuperación de cobre y plata. Vicerrectorado de Investigación. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

C. Guillermo Perea Solano (2016) Evaluación de una metodología alternativa a la cianuración para la disolución de oro utilizando solventes orgánicos. Facultad de Minas. Departamento de Materiales y Minerales. Universidad Nacional de Colombia.

Zhang, Y. (2015). Análisis ambiental de la producción de cobre (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

Carreño Espíndola, M. J. (2022). Estudio de lixiviación de minerales oxidados y sulfurados de cobre como alternativa a procesos de concentración en contexto de escasez hídrica (Doctoral dissertation, Universidad de Talca (Chile). Facultad de



Ingeniería).

Castillo Sánchez, I. D. (2018). Técnicas alternativas para la extracción de oro sin el uso de mercurio y su potencial aplicación a pequeña escala y minería artesanal en Colombia.

Sacher, W., & Báez, M. (2011). Revisión crítica parcial del estudio de impacto ambiental para la fase de beneficio del proyecto minero de cobre Mirador de la empresa Ecuacorriente. Quito: Acción Ecológica.

Centenera, C. P., de la Rosa, P. R., Herrero, E. C., García, F. C., Osuna, R. G., Ruano, A. P., & Aragón, E. G. (2018). El hierro en los yacimientos de Navalvillar y Navalahija (Colmenar Viejo), durante la antigüedad tardía. siglos VII y VIII DC. In Actas RAM 2015: Reunión de Arqueología Madrileña (pp. 137-145). Ilustre Colegio Oficial de Doctores y Licenciados en Filosofía y Letras y en Ciencias de la Comunidad de Madrid.

Chávez Gutiérrez, E. R. (2020). Recuperación de cobre a partir de la malaquita utilizando soluciones de tartrato mediante proceso de lixiviación.

Chemuta, T., (2017). Glycine as a lixiviant for the leaching of low-grade coppergold ores. Western Australian: School of Mines.

Newman, El (1995). Aportes de fósforo a los ecosistemas terrestres. Revista de Ecología, 713-726.

Contreras, L. Caracterización mineralógica del proceso metalúrgico y su impacto en la producción de concentrado de Cu y Mo en CMDIC. Universidad de Chile. 2015. 23-27

Cowley, J. M., (1981) Diffraction Physics, 2nd Ed., North Holland. Pag. 65-78.

Dávila, R. (2021) Lixiviación de concentrado de plomo con ion de citrato en ambiente oxidante de peróxido de hidrógeno. Universidad Interdisciplinaria de



Ingeniería Metalúrgica.

Eksteen, J., et al., (2017). Towards industrial implementation of glycine-based leach and adsorption technologies for gold-copper ores. *Canadian Metallurgical Quarterly*. Vol. 57 (4), p. 1-9.

Escamilla, C. O., Rojas, E. R., Castilleja, J. M., & Bahena, J. R. Caracterización mineralógica aplicada al proceso de beneficio de minerales. XXVI Conv. Int. Minería, 295-300.

Finar, I.L., (1963). *Organic Chemistry Vol.1*. Longman Group limited, London, p. 322-323

González Ochoa, J. M. (2013). Análisis estructural de la Sierra del Fraile y sistemas de mineralización del distrito minero La Paz, SLP. REPOSITORIO NACIONAL CONACYT.

Gonzalez, L., et al., (2005). Liberation of amino acids by heterotrophic nitrogen fixing bacteria. *AminoAcids*. Vol. 28, p. 363–367.

Gutiérrez, C. G. (1963). Geología y paragénesis del distrito Minero de Matehuala, San Luis Potosí, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 30(1), 29–61. <http://www.jstor.org/stable/44173984>

Haque, A., Zeng, Y., Demopoulos, G., and Li, Z., (2017). Modeling of glycine solubility in aqueous HCl–MgCl₂ system and its application in phase transition of glycine by changing media and supersaturation. *Journal of Crystal Growth*. Vol 467, p. 116-125.

Hernández, J. (2019) Desarrollo del proceso de degradación de cianuro procedente de la lixiviación de plata a partir de oxidación con ozono cloruro de sodio. Universidad Autónoma Metropolitana.

Kyung, W., Echarrí, J. y Llorente, C. Servicio de microscopía electrónica de



barrido y microanálisis del Laboratorio de Investigaciones de Metalurgia Física – Facultad de ingeniería – UNLP. 2013.

M. Arnulfo Ramírez Garzón (2018) Tiosulfato de sodio y glicina-tiosulfato de sodio en la lixiviación de un mineral oxidado con valores metálicos de oro y plata. División de Ingeniería. Universidad de Sonora.

M. Roxana Garza (2020) Cianuración de oro y plata asistida con glicina. Facultad de Metalurgia. Universidad Autónoma de Coahuila.

Mendoza, H. H., Gonzalez, A. J. B., & Vargas, C. A. P. (2007). Caracterización composicional de sílice de Ramiriquí Boyacá. *Scientia et technica*, 1(36).

México Minero (2018) Tipos de minerales <https://mexicominero.org/tipos-de-minerales/cobre/#:~:text=Es%20la%20materia%20prima%20m%C3%A1s,%2C%20instrumentos%20musicales%2C%20entre%20otros.>

Nebeal Faris, Rahul Ram, Miao Chen, James Tardio, Mark I. Pownceby, Lathe A. Jones, Scott McMaster, Nathan A.S. Webster, Suresh Bhargav (2017) The effect of thermal pre-treatment on the dissolution of chalcopyrite (CuFeS₂) in sulfuric acid media. *Hydrometallurgy*. Vol. 169. Pag. 68-78. ISSN 0304-386X

Oraby, E., and Eksteen, J., (2015). Gold leaching in cyanide straved copper solutions in the presenceof glycine. *Hydrometallurgy*. Vol. 156, p. 81-88.

Oraby, E.A., and Eksteen, J.J., (2015). The leaching of gold, silver and their alloys in alkaline glycine- peroxide solutions and their adsorption on carbon. *Hydrometallurgy*. Vol. 152, p. 199-203.

P. Berenice López (2009) Turismo y patrimonio minero en el municipio de Mapimí, Durango. Colegiode Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.

Palacios, S y Pura, A. Importancia de la caracterización de los yacimientos para su aprovechamiento sostenible: El ejemplo de Misky, Perú. Departamento de



Ingeniería y Recursos Naturales, Universidad Politécnica de Catalunya, 2011. ISBN 978-99920-1-794-4. Pág. 281 — 290.

Perea, G., (2016). Evaluación de una metodología alternativa a la cianuración para la disolución de oro utilizando solventes orgánicos. Medellín: Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales.

Pérez, E., (2012) Técnicas de caracterización petrológicas (I): Microscopía Óptica de Polarización (MOP) y Difracción de Rayos X (DRX). Instituto de geociencias. Pag. 23-25.

Quille Calizaya, G. (2010). Cinética de lixiviación de minerales de cobre malaquita y azurita con ácidos orgánicos.

Rocha Castro, E., (2000) Principios Básicos de Espectroscopía. Editorial UACH. México. Pag. 123 – 203.

Roxana G., F.R. Carrillo Pedroza., Guadalupe P., Jesús S., Isaías A. & Josué C. (2021) Efectos del medio de pretratamiento y lixiviación sobre la eficiencia de extracción de Au y Ag de un subproducto de la lixiviación de cuprita. DYNA. Revista de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. ISSN 0012-7353. Vol. 88. No. 218. Pág. 119-126.

Surján Arellano, M. J. E. (2009). Geología, Alteración Hidrotermal y Mineralización en el Prospecto Cuprífero Cerro Oveja, Comuna de Isla de Maipo, Región Metropolitana.

Svanberg, S., (1992) Atomic and Molecular Spectroscopy: Basic Aspects and Practical Applications, 2ª Edición. Springer. Pág. 24-27.

Tanda, BC, Eksteen, JJ y Oraby, EA (2017). Una investigación sobre el comportamiento de lixiviación de minerales de óxido de cobre en soluciones acuosas alcalinas de glicina. Hidrometalurgia , 167 , 153-162.



Vargas, C., Arancibia, A., & Navarro, P. (2013). Caracterización y estudio de la lixiviación ácida de relaves antiguos provenientes del proceso de flotación de minerales sulfurados de cobre. *Revista Remetallica*, (20).

Yucra Torres, C. D. (2021). Evaluación de la rentabilidad de la producción de cobre de pequeños mineros mediante la instalación de una planta de sulfato de cobre, Pacocha-ITE, 2020

Zorilla, C. (2013) La minería de cobre y sus impactos en el Ecuador. Infominraría. Global Response