



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

Unidad Saltillo

**“Efecto de una oxidación con diferentes oxidantes en la
recuperación de oro y plata en minerales que contienen telurio”**

Tesis que presenta

Ing. Alexis Gabriela Ávila Madero

Para obtener el grado de

Maestra en Ciencias

En la especialidad de

Ingeniería Metalúrgica

Directora de Tesis:

Dra. Fabiola Constanza Nava Alonso

Ramos Arizpe, Coahuila.

Septiembre de 2024.

Dedicatorias

En primer lugar, a Dios, quien me ha otorgado la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para superar cada desafío que he encontrado en este camino. Su guía y apoyo constante han sido fundamentales en cada etapa de este proceso, iluminando mi camino y dándome la serenidad para avanzar incluso en los momentos más difíciles.

A mi amado esposo, Roberto, quiero dedicar un agradecimiento especial. Tu amor incondicional, tu infinita paciencia y el aliento constante que me has brindado han sido pilares fundamentales en este proceso. En los momentos más desafiantes, tu apoyo inquebrantable y tu confianza en mis capacidades me dieron la fuerza y el impulso necesarios para seguir adelante. No solo has sido mi compañero de vida, sino también mi fuente de motivación y mi mayor inspiración. Gracias por estar siempre a mi lado, creyendo en mí y acompañándome en cada paso de este viaje. Y hoy, al mirar atrás, me llena de orgullo decir: ¡Lo hemos logrado juntos! Este éxito es el reflejo de nuestro esfuerzo compartido y de la increíble fortaleza de nuestro vínculo.

A mis queridos padres, Alejandro y Chayito, no hay palabras suficientes para expresar mi gratitud por todo lo que han hecho por mí. Su amor y apoyo han sido el faro que me ha guiado en los momentos de incertidumbre y el pilar que ha sostenido mis aspiraciones. Gracias por creer en mí, incluso cuando yo misma dudaba, y por estar siempre a mi lado, celebrando cada paso hacia el éxito. Este logro es tanto mío como suyo, y siempre llevaré con orgullo el legado de su amor y dedicación en cada uno de mis triunfos.

A mis queridos hermanos Alfredo, Rocio y Alex †, a quienes llevo siempre en mi corazón, quiero expresar mi más sincero agradecimiento. Ustedes han sido mi fuente constante de inspiración y fortaleza. Su apoyo incondicional, su presencia en cada etapa de mi vida, y el amor fraternal que hemos compartido han sido fundamentales para llegar hasta aquí. Gracias por estar siempre ahí, por alentarme en los momentos de duda y por celebrar cada uno de mis logros como si fueran propios. Su apoyo me ha dado la confianza y el valor para perseguir mis sueños, y por ello les estaré eternamente agradecida.

A mis queridos sobrinit@s, quiero dedicarles con todo mi amor este esfuerzo importante, por que aunque mi camino me llevó lejos de casa, quiero que sepan que siempre han estado en mi corazón, sin importar la distancia que nos separara. Su presencia en mi vida, aunque no siempre física, ha sido un pilar de fortaleza y un recordatorio constante de por qué persigo mis sueños con tanto empeño. Estan siempre en mis pensamientos y en mi corazón, por ser una fuente constante de motivación y alegría, a pesar de la distancia. Siempre llevaré con orgullo y cariño el vínculo especial que compartimos.

A mi suegra Lupita, por su apoyo y comprensión. Su ayuda incondicional y sus palabras de aliento han sido cruciales para que pudiera concentrarme en mis estudios y avanzar hacia este importante objetivo. Este logro también es un testimonio de su generosidad y apoyo, y estoy profundamente agradecida por todo lo que ha hecho por mí.

Agradecimientos

A mi directora de tesis Dra. Fabiola Nava, por su invaluable guía y paciencia. Gracias por compartir su conocimiento y por su compromiso constante con mi formación académica. Su vocación para la enseñanza y su pasión por ayudar a sus estudiantes se reflejan en cada interacción que tuvimos. Aprecio profundamente el tiempo que ha invertido en mi formación, así como su constante aliento y motivación. Este logro no sería posible sin su guía y dedicación, y siempre llevaré con gratitud el impacto positivo que ha tenido en mi trayectoria académica.

A Lupita Rocamontes, agradezco profundamente por su apoyo constante, tu orientación y amabilidad han sido fundamentales para poder llevar adelante este proyecto, facilitando cada paso en el camino con eficiencia y una sonrisa. Tu compromiso con el bienestar de los estudiantes hace la diferencia y se refleja en el éxito de quienes, como yo, han tenido la fortuna de contar con tu ayuda.

A mis compañeros, les agradezco por compartir este camino de aprendizaje y esfuerzo. Su apoyo y colaboración hicieron que cada día fuera más llevadero, y sin duda, el haber trabajado juntos en este viaje académico es algo que siempre recordaré con cariño.

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por otorgarme la beca que hizo posible la realización de esta maestría. Su apoyo financiero y su confianza en mi proyecto fueron esenciales para alcanzar este importante logro en mi carrera académica.

Finalmente, quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Saltillo (CINVESTAV) por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado en una institución de tan alto prestigio académico y científico. Agradezco a los Doctores y personal administrativo, cuyo apoyo y dedicación hicieron posible mi formación profesional. Su compromiso con la excelencia y la investigación ha sido una fuente constante de inspiración a lo largo de este camino.

ÍNDICE

RESUMEN	<i>vi</i>
ABSTRACT	<i>viii</i>
1. OBJETIVOS	<i>1</i>
1.1 OBJETIVO GENERAL	1
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
2. INTRODUCCIÓN	<i>2</i>
3. ANTECEDENTES	<i>4</i>
3.1 Generalidades del oro y telurio	4
3.2 Telururos de oro y plata.....	7
3.3 Usos del telurio	8
3.4 Minerales refractarios.....	8
3.5 Tratamientos oxidativos para minerales refractarios	10
3.5.1 Pirometalurgia	10
3.5.2. Hidrometalurgia.....	12
3.6 Método tradicional de recuperación por cianuración.....	16
4. JUSTIFICACIÓN	<i>19</i>
5. HIPÓTESIS	<i>19</i>
6. METODOLOGÍA	<i>20</i>
6.1 Materiales utilizados (especie sintética, Ag ₂ Te, y mineral del Estado de Sonora)	21
6.2 Equipo y reactivos	22
6.3 Procedimiento para la descomposición oxidativa del telururo de plata (Ag ₂ Te).....	23
6.4 Procedimiento para la descomposición oxidativa del mineral del Estado de Sonora ..	25
6.5 Procedimiento para la cianuración.....	25
6.6 Metodología experimental.....	26
6.6.1 Especie sintética telururo de plata (Ag ₂ Te).....	26
6.6.2 Pruebas con el mineral del Estado de Sonora	31
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	<i>33</i>
7.1 Oxidación de la especie sintética telururo de plata (Ag ₂ Te)	33

<i>a) Pruebas preliminares de oxidación y de Ag_2Te con H_2O_2</i>	<i>33</i>
<i>b) Cianuración del mineral pretratado Ag_2Te con H_2O_2 en ambiente alcalino</i>	<i>39</i>
<i>c) Medición de potencial redox en solución con adiciones consecutivas de H_2O_2, sin mineral en ambiente alcalino y ácido</i>	<i>41</i>
<i>d) Medición de ORP y O_2 disuelto en solución con H_2O_2, sin mineral, a $pH=3$ con HCl.....</i>	<i>44</i>
<i>e) Medición de ORP y O_2 dis sin mineral, para diferentes oxidantes.....</i>	<i>45</i>
<i>Permanganato de potasio ($KMnO_4$)</i>	<i>46</i>
<i>Persulfato de potasio ($K_2S_2O_8$).....</i>	<i>47</i>
<i>Hipoclorito de sodio ($NaClO$)</i>	<i>48</i>
<i>Ácido perclórico ($HClO_4$).....</i>	<i>49</i>
<i>f) Estudio de la oxidación de telururo de plata sintético con persulfato de potasio</i>	<i>52</i>
7.2 Pruebas con el mineral del Estado de Sonora	62
<i>a) Cianuración estándar del mineral de Sonora sin pretratamiento</i>	<i>63</i>
<i>b) Oxidación de mineral de Sonora con persulfato de potasio.....</i>	<i>64</i>
<i>c) Cianuración del mineral de Sonora después del tratamiento oxidativo</i>	<i>65</i>
8. CONCLUSIONES	68
9. REFERENCIAS	70

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Yacimientos de interés por telurio en Sonora (Aguayo et al., 1996).</i>	5
<i>Figura 2. Esquema de clasificación de menas de oro (Yannopoulos, 1990).</i>	9
<i>Figura 3. Especie sintética Ag_2Te.</i>	21
<i>Figura 4. Mineral de Sonora, México.</i>	22
<i>Figura 5. Arreglo experimental del equipo utilizado para la descomposición oxidativa Ag_2Te.</i>	24
<i>Figura 6. Arreglo experimental del equipo utilizado para la cianuración del mineral.</i>	26
<i>Figura 7. Metodología experimental del tratamiento oxidativo del Ag_2Te.</i>	27
<i>Figura 8. Pruebas de cianuración del Ag_2Te oxidado con H_2O_2.</i>	27
<i>Figura 9. Evaluación del potencial oxidante de soluciones con adiciones continuas de H_2O_2.</i>	28
<i>Figura 10. Medición de pH y Oxígeno disuelto en soluciones de H_2O_2 a pH 3, sin sólidos.</i>	29
<i>Figura 11. Metodología experimental para medición del poder oxidante de diferentes reactivos.</i>	30
<i>Figura 12. Evaluación del persulfato de potasio como oxidante.</i>	31
<i>Figura 13. Sistema experimental de la cianuración del mineral fresco y oxidado.</i>	32
<i>Figura 14. Perfil de Ag y Te disuelto para la oxidación del telururo de plata con peróxido de hidrógeno pH=10.5 ajustado con NaOH.</i>	34
<i>Figura 15. DRX obtenido de los sólidos del tratamiento con H_2O_2 a pH 10.5 ajustado con NaOH.</i>	35
<i>Figura 16. Perfil de Ag y Te disuelto para la oxidación del telururo de plata con peróxido de hidrógeno a pH 3 ajustado con HCl.</i>	36
<i>Figura 17. DRX obtenido de los sólidos del tratamiento con H_2O_2 a pH 3 ajustado con HCl.</i>	37
<i>Figura 18. Perfil de Ag y Te disuelto para la oxidación del telururo de plata con peróxido de hidrógeno pH 3 ajustado con H_2SO_4.</i>	38
<i>Figura 19. Perfil de Ag y Te disuelto para la oxidación del telururo de plata con peróxido de hidrógeno a pH 3 ajustado con HNO_3.</i>	39
<i>Figura 20. Disolución de Ag y Te en la cianuración del telururo de plata oxidado con H_2O_2.</i>	41

<i>Figura 21. Comportamiento de ORP con adiciones consecutivas de H₂O₂ a pH 10.5.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 22. Comportamiento de ORP a pH 3 ajustado con adiciones consecutivas de H₂O₂.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 23. Comportamiento de ORP y O₂ en ambiente ácido con H₂O₂.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 24. Comportamiento de ORP y O₂ con oxidante (KMnO₄).....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 25. Comportamiento de ORP y O₂ con oxidante (K₂S₂O₈).....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 26. Comportamiento de ORP y O₂ con oxidante (NaClO).....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 27. Comportamiento de ORP y O₂ con oxidante (HClO₄).</i>	<i>50</i>
<i>Figura 28. Perfil de Ag y Te disuelto de la oxidación del telururo de plata con persulfato de potasio con una concentración de 4 g en 100 mL de solución (0.15 M) pH 3 ajustado con HCl.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 29. Diagrama de distribución de especies de un sistema Ag₂Te – K₂S₂O₈ - Cl.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 30. Perfil de Ag y Te disuelto de la oxidación del telururo de plata con persulfato de potasio con una concentración 0.15 M a pH 3 sin adición de ácido.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 31. Diagrama de distribución de especies de un sistema Ag₂Te – K₂S₂O₈</i>	<i>59</i>
<i>Figura 32. Perfil de pH y oxígeno disuelto de la oxidación del telururo de plata con persulfato de potasio con una concentración de 0.15 M a pH 3 sin adición de ácido.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 33. DRX obtenido de los sólidos de la oxidación de Ag₂Te con K₂S₂O₈ a pH 3 con HCl.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 34. Caracterización de MEB del residuo sólido (500 x) de la prueba de la Figura 26.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 35. Perfil del Au, Ag y Te disuelto de la cianuración del mineral de Sonora sin tratamiento previo.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 36. Perfil del Au, Ag y Te disuelto de la oxidación del mineral de Sonora con K₂S₂O₈</i>	<i>65</i>
<i>Figura 37. Perfil del Au, Ag y Te disuelto de la cianuración del mineral industrial oxidado.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 38. Caracterización de residuo sólido en MEB (250 x).</i>	<i>67</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Minerales de Au/Ag-Te y su contenido de oro (Marsden & House, 2006; Aguayo et al., 1996).</i>	6
<i>Tabla 2. Solubilidad de diferentes persulfatos (Evonik Leading Beyond Chemistry, 2024).</i>	15
<i>Tabla 3. Potencial oxidante de algunos agentes oxidantes (Hassaan et al., 2017).</i>	16
<i>Tabla 4. Composición química del mineral industrial de Sonora (Rodríguez-Chávez, 2023).</i>	22
<i>Tabla 5. Equipos para la experimentación.</i>	23
<i>Tabla 6. Reactivos químicos utilizados.</i>	23

RESUMEN

La disminución de los yacimientos de oro convencionales ha generado una problemática significativa para la industria de metales preciosos, obligándola a explorar y procesar yacimientos más complejos y menos accesibles. Entre estos yacimientos complejos destacan aquellos que contienen telururos, minerales en los que el oro y la plata están químicamente unidos al telurio. Esta unión química complica la recuperación de los metales preciosos mediante los métodos tradicionales de extracción, que han sido eficaces en yacimientos más sencillos.

La presencia de estos yacimientos con telururos no es un fenómeno aislado, sino que se ha detectado en diversas regiones del mundo, incluyendo el estado de Sonora en México, así como en países con importantes industrias mineras como Australia y Canadá. Estos depósitos representan tanto un desafío como una oportunidad para la industria minera.

La dificultad principal de procesar yacimientos conteniendo telururos de oro y/o plata radica en que los métodos convencionales de recuperación de los metales preciosos no son efectivos para separar estos metales del telurio. Esto exige la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías y procesos que puedan abordar esta complejidad. A su vez, estos esfuerzos pueden abrir nuevas posibilidades para la industria minera, no solo en términos de recuperación de oro y plata, sino también en la obtención de telurio, un elemento valioso para la industria de la energía solar.

Este estudio se centró primeramente en la oxidación del telururo de plata (Ag_2Te), una especie sintética, con el fin de evaluar alternativas de tratamiento en un entorno controlado y sin la interferencia de otras especies presentes en los minerales. Dado que el telururo de plata es uno de los telururos de oro/plata más estables, encontrar las condiciones adecuadas para su recuperación implicaría que otros telururos también pueden ser tratados de manera similar.

Se evaluaron diversos reactivos oxidantes a diferentes concentraciones y niveles de pH, monitoreando parámetros como potencial redox, pH, temperatura y oxígeno disuelto durante

los experimentos. El resultado más favorable para la disolución de plata y telurio se obtuvo utilizando persulfato de potasio (0.15 M) a un pH de 3 (ajustado naturalmente por la adición del persulfato sin adición de ningún ácido). Bajo estas condiciones, se alcanzó un porcentaje de disolución de plata del 59.53% y de telurio del 34.86%.

Los parámetros óptimos obtenidos de la oxidación de la especie sintética se aplicaron al tratamiento de un mineral proveniente de Sonora. Una cianuración estándar al mineral sin ningún tratamiento oxidativo permite disolver un 33.57% de oro, un 52.95% de plata y nada de telurio, con lo que se demuestra que es un mineral refractario en cuanto a la disolución de oro y plata. Si este mineral se somete a una oxidación con persulfato a un pH de 3 (0.15 M), se obtienen disoluciones de 4.25% de oro, 29.34% de plata y 31.89% de telurio. Si a este mineral oxidado se le hace una cianuración, a las mismas condiciones que al mineral sin pretratamiento, se tienen unas disoluciones de 43.38% de disolución de oro y un 54.65% de plata. No se tiene telurio disuelto, lo que sugiere que en la oxidación el telurio precipitará como dióxido de telurio (TeO_2). Sumando el oro disuelto en la oxidación y el disuelto en la posterior cianuración se tiene un 47.63%, lo que representa un aumento considerable comparado con el 33.57% de la cianuración del mineral sin tratar. Este estudio preliminar permite considerar a la oxidación con persulfato de un mineral conteniendo telururos de oro/plata como una alternativa interesante de pretratamiento para este tipo de minerales.

ABSTRACT

The decline of conventional gold deposits has created a significant problem for the precious metals industry, forcing it to process more complex ores and less accessible deposits. Among these complex deposits are those containing tellurides, minerals in which gold and silver are chemically bound to tellurium. This chemical bond complicates the recovery of precious metals with traditional extraction methods, which have been effective in simpler deposits.

The presence of these telluride deposits is not an isolated phenomenon but has been detected in various regions around the world, including the state of Sonora in Mexico, as well as in countries with significant mining industries such as Australia and Canada. These deposits represent both a challenge and an opportunity for the mining industry.

The main difficulty of processing gold deposits containing gold/silver tellurides lies in the fact that conventional gold and silver recovery methods are not an effective way of separating these metals from tellurium. This requires the research and the development of new technologies and processes that can deal with this complexity. In turn, these efforts offer great potential for the mining industry, not only in terms of gold and silver recovery but also in obtaining tellurium, a valuable element for the solar energy industry.

This study initially focused on the oxidation of silver telluride (Ag_2Te), a synthetic species, to evaluate treatment alternatives in a controlled environment without the interference of other species present in the ores. Since silver telluride is one of the most stable gold/silver tellurides, finding the appropriate conditions for its recovery could imply that other tellurides can also be treated similarly.

Various oxidizing reagents were evaluated at different concentrations and pH levels, monitoring parameters such as redox potential, pH, temperature, and dissolved oxygen during the experiments. The most favorable result for the dissolution of silver and tellurium was obtained using potassium persulfate (0.15 M) at a pH of 3, naturally obtained with the addition of persulfate without the need to adjust it with any acid. Under these conditions, a silver dissolution percentage of 59.53% and a tellurium dissolution percentage of 34.86% were obtained.

The optimal parameters obtained from the oxidation of the synthetic species were applied to the oxidative treatment of the mineral from Sonora. A standard cyanidation of the mineral without any oxidative treatment permits to dissolve 33.57% gold, 52.95% silver and no tellurium, demonstrating that it is a refractory mineral in terms of the gold and silver recoveries. If this mineral is submitted to a persulfate oxidation at a pH of 3 (0.15 M), a dissolution of 4.25% gold, 29.34% silver and 31.89% tellurium is obtained. If a cyanidation is carried out on this oxidized mineral, under the same conditions as the mineral without pretreatment, a gold and silver dissolution of 43.38% and 54.65% is obtained respectively. There is no dissolved tellurium, which suggests that in the oxidation the tellurium is precipitated as tellurium dioxide (TeO_2). The gold dissolved in oxidation and the one dissolved in the subsequent cyanidation give 47.63%, which represents a considerable increase compared to the 33.57% gold dissolution obtained in the cyanidation of the untreated mineral. This is a preliminary study but allows to consider the persulfate oxidation of a mineral containing gold/silver tellurides as an interesting pretreatment alternative for this type of minerals.

1. OBJETIVOS

El trabajo de tesis está centrado en el problema que representa la recuperación de los metales preciosos (oro y plata) cuando éstos vienen ligados al telurio (telururos), como es el caso en cada vez más yacimientos en el estado de Sonora, así como en otras partes del mundo como Australia y Canadá. Se cuenta con muestras de minerales que contienen estas especies, pero el trabajo se iniciará utilizando una especie sintética, el telururo de plata (Ag_2Te), para poder evaluar las alternativas de tratamiento sin tener el efecto de otras especies que están presentes en los minerales industriales y que podrían afectar los resultados. Se eligió esta especie porque es uno de los telururos más estables; si se encuentran las condiciones para separar el telurio del oro/plata en esta especie, se podría asumir que los otros telururos también podrán ser tratados de igual manera, y se evaluará el sistema propuesto con los minerales industriales.

1.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la eficiencia de un pretratamiento oxidativo para romper los enlaces químicos telurio-metal precioso en una especie sintética (Ag_2Te) y en un mineral del estado de Sonora para lograr una recuperación efectiva de los metales preciosos en el proceso de cianuración que normalmente se utiliza en la industria.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la oxidación de telururo de plata sintético (Ag_2Te) utilizando diferentes oxidantes. Se evaluará el efecto del pH (ácido o básico), del tipo de ácido (sulfúrico nítrico o clorhídrico) y de la concentración del oxidante, en la disolución de Au, Ag y Te.
- Seleccionar un mineral del Estado de Sonora que contiene telururos de oro/plata, y evaluar su refractariedad en el proceso de cianuración para la recuperación de los metales preciosos.
- Realizar una oxidación a este mineral utilizando las condiciones óptimas encontradas para la especie sintética. Evaluar su respuesta a la cianuración una vez oxidado.

2. INTRODUCCIÓN

México ha sido reconocido históricamente como un país rico en yacimientos de metales preciosos. Es el primer productor mundial de plata, con 3,746 toneladas y el séptimo país en producción de oro con 77 toneladas en 2023 (U.S. Geological Survey, 2024; Prontuario Estadístico de la Minería). La producción de joyería de oro es una parte importante de la industria manufacturera en el país.

El estado de Sonora actualmente es uno de los estados más importantes en términos de producción de oro en el país (Panorama Minero del Estado de Sonora, Dirección de Operación Geológica, 2020). La minería de oro en Sonora ha sido una actividad económica significativa, y continúa siendo una importante fuente de empleo y de generación de riqueza en la región, además en Sonora se han reportado especies de oro y plata asociadas al teluro (Aguayo et al., 1996) las cuales son refractarias a la cianuración, es decir, presentan dificultades para su recuperación sin un tratamiento oxidativo previo.

La recuperación de metales preciosos de minerales refractarios ha enfrentado grandes retos en los últimos años debido a la disminución de depósitos fáciles de explotar, lo que obliga al tratamiento de yacimientos mineralógicamente complejos, en los que los metales preciosos pueden estar ocluidos en otras especies, o pueden estar formando compuestos que no son recuperables con el cianuro, que es el método tradicionalmente usado para la extracción de los metales preciosos. Este tipo de minerales que no pueden ser recuperados por el proceso de cianuración se denominan minerales refractarios.

Los minerales refractarios se caracterizan porque no puede extraerse más del 80% del oro (o plata) con lixiviación convencional con cianuro, incluso tras una molienda fina, por lo que se requiere un pretratamiento para poder tratar estos minerales (Gudyanga et al., 1999). Este tipo de pretratamientos consisten generalmente en una oxidación. Sin embargo, para el caso de los minerales que contienen telururos (oro y/o plata ligados al teluro) no existe actualmente una alternativa eficiente, y la información sobre su tratamiento es muy limitada (Zhang et al., 2010).

En el presente proyecto se estudiará el proceso de extracción de metales preciosos a partir de minerales que contienen, además del oro o plata en su estado elemental, compuestos de estos metales ligados al telurio. El desarrollo de un proceso que separe el telurio de los metales preciosos permitiría, además de liberar el oro y la plata, ofrecer una fuente de telurio para la industria de la energía solar. La demanda de telurio para la fabricación de celdas solares de película ultradelgada de telururo de cadmio está aumentando significativamente, lo que impulsa el crecimiento de esta industria (Ávila-Madero et al., 2023).

Se propone un pretratamiento oxidativo y evaluar la eficiencia del oxidante con el fin de romper los enlaces químicos (AuAg-Te) y lograr una recuperación efectiva de los metales preciosos cuando éstos vienen ligados al telurio.

3. ANTECEDENTES

3.1 Generalidades del oro y teluro

El oro es un elemento químico con el símbolo Au (del latín “aurum”) conocido por la humanidad durante milenios. Este metal destaca por su maleabilidad y ductilidad, lo que permite su conformación en diversas formas. Además de ser un metal blando, su resistencia a la corrosión y su escasa tendencia a oxidarse lo convierten en un material duradero. Su característico brillo dorado y su excelente conductividad eléctrica son rasgos distintivos.

A lo largo de la historia, el oro ha sido utilizado principalmente con propósitos ornamentales y monetarios, encontrando también aplicaciones industriales en sectores como la electrónica, la medicina, la joyería y la industria aeroespacial, gracias a sus propiedades eléctricas y su resistencia a la corrosión. Asimismo, su uso en la fabricación de lingotes y monedas lo consolida como una reserva de valor.

El oro se encuentra en depósitos naturales, tanto en forma de pepitas o partículas en rocas y sedimentos, como en depósitos aluviales y subterráneos. Su extracción se realiza mediante diversas técnicas, como la minería a cielo abierto, la minería subterránea y la extracción de placeres, seguida de un proceso de refinación para obtener oro puro tras la eliminación de impurezas.

El método más común para cuantificar el oro presente en un mineral es el ensaye a fuego (o copelación). Aunque este método es antiguo, sigue siendo popular en la actualidad porque generalmente proporciona resultados rápidos y precisos sobre la cantidad de oro en una muestra, y porque utiliza un peso de muestra relativamente grande (30-50 g). Se ha reportado que la presencia del teluro dificulta la cuantificación de oro en el método de copelación (Santos-Munguía, 2019).

El teluro es un elemento escaso en la naturaleza y su concentración promedio en la corteza terrestre es del orden de 0.002 ppm (Aguayo et al., 1996). Fue descubierto por Franz-Joseph

Müller von Reichenstein en 1782 en Transilvania, Rumania, aunque este descubrimiento fue confirmado hasta 1819, por Jöns Jakob Berzelius.

Según Aguayo et al., 1996, durante más de cinco décadas, la única área conocida por la presencia de minerales de telurio en México fue la mina La Bambolla, ubicada en las proximidades del poblado de Moctezuma, Sonora. Descubierta en 1936, entre ese año y 1945 se extrajeron alrededor de 2,900 toneladas de mineral con concentraciones de telurio que oscilaban entre 10 y 20 kg/t y 4 a 12 g de oro/t. En 1989, se identificó una segunda área con especies de telurio en el yacimiento de San Francisco, situado a 145 kilómetros al norte de Hermosillo (Figura 1), donde se registró una ley de oro de 1.76 g/t.

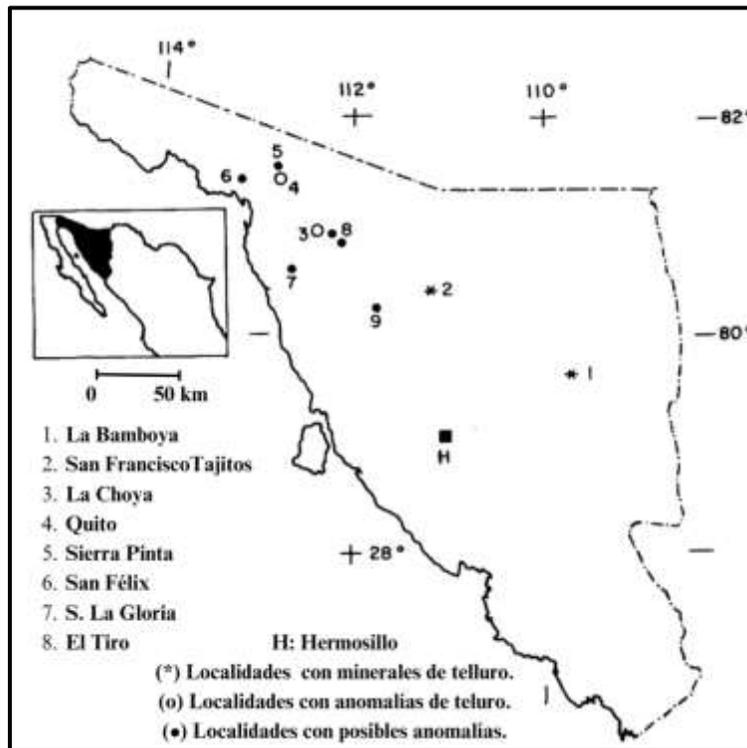


Figura 1. Yacimientos de interés por telurio en Sonora (Aguayo et al., 1996).

El telurio, además de encontrarse en estado nativo y asociado a elementos como el hierro o el plomo, también puede formar minerales con los metales preciosos, como la calaverita (AuTe_2), la silvanita (AuAgTe_4) y la petzita (Ag_3AuTe_2), entre otros (Marsden & House, 2006; Aguayo et al., 1996) como se muestra en la Tabla 1. Estos minerales son considerados

complejos debido a que no pueden ser procesados por el método tradicional de extracción de oro y plata, que es la cianuración (Henley et al., 2001).

Tabla 1. Minerales de Au/Ag-Te y su contenido de oro (Marsden & House, 2006; Aguayo et al., 1996).

Mineral	Fórmula	Sistema cristalino	Contenido Au, wt-%
Calaverita	AuTe ₂	Monoclínico	39.2 - 42.8
Krennerita	(Au, Ag)Te ₂	Ortorrómbico	30.7- 43.9
Silvanita	(Au,Ag) ₂ Te ₄	Monoclínico	24.2 - 29.9
Montbrayita	Au ₂ Te ₃	Triclínico	38.6 - 44.3
Petzita	Ag ₃ AuTe ₂	Cúbico	19.0 - 25.2
Hessita	Ag ₂ Te	Monoclínico	-

También se encuentran muchos minerales de telururo no asociados al oro, sobre todo coloradoita (HgTe), altaíta (PbTe) y hessita (Ag₂Te) (Ellis, 2005).

En el siglo XIX, se descubrieron compuestos de telurio con propiedades semiconductoras, sentando las bases para el desarrollo de dispositivos electrónicos modernos. Desde el siglo XX, el telurio se ha aplicado en la industria electrónica, particularmente en dispositivos de detección infrarroja y celdas solares (Ávila, 2019.). Hoy en día, también se utiliza en aleaciones para mejorar la resistencia a la corrosión.

Según Ellis (2005), el telurio puede afectar el resultado del análisis de oro en los minerales al reducir la tensión superficial del metal precioso durante el proceso de copelación, lo que resulta en pérdidas de oro en la copela, el recipiente refractario utilizado para recoger el metal precioso tras el proceso de fusión. Esto resulta en pérdidas de oro en la copela. Para evitar esto, es crucial asegurar la eliminación del telurio durante la fusión del ensayo de fuego, lo cual se logra mediante condiciones fuertemente oxidantes. Además, reducir el peso de la muestra puede ayudar a aumentar la proporción de fundente/muestra, lo que mejora las posibilidades de una fusión exitosa y una separación limpia de dos fases.

En la actualidad, los minerales que contienen telurio siguen siendo objeto de interés debido a que la disminución de los yacimientos de oro convencionales ha obligado a la industria de los metales preciosos a tener que recuperar oro y plata de yacimientos más complejos, como es el caso de los telururos.

3.2 Telururos de oro y plata

Los telururos tienen cada vez más importancia económica. Además del oro metálico, son los únicos minerales de oro que son relevantes en términos económicos. Estos minerales suelen encontrarse asociados con oro nativo y con sulfuros. Entre los telururos que se han detectado con mayor frecuencia se encuentran la calaverita (AuTe_2) y la silvanita (AgAuTe_4). Estos minerales contienen una cantidad significativa de oro; en estos minerales fue donde se descubrió por primera vez el telurio (Habashi, 2016).

La calaverita tiene alrededor del 40% de oro en su composición, mientras que la krennerita ($\text{Au, Ag} \text{Te}_2$) (Tabla 1) tiene una composición similar, pero también suele contener algo de plata asociada. La silvanita, por su parte, contiene aproximadamente un 25% de oro y también contiene plata. Estos minerales son importantes debido a su contenido de oro y su asociación con otros minerales valiosos como la plata. Su extracción y procesamiento son parte de la industria minera y tienen un valor económico significativo.

A pesar de que se han reportado estudios utilizando calaverita y silvanita sintéticas, las cuales han mostrado bajas tasas de extracciones de oro (Lu & Lawson, 1994), existen telururos de oro que se han explotado comercialmente en solo unas pocas regiones del mundo. Entre estas destacan Kalgoorlie en Australia Occidental, Vatukoula en Fiyi, Cripple Creek en Colorado y Kirkland Lake en Ontario (Ellis, 2005).

Los resultados de un tratamiento de flotación realizado por Zhang et al., 2010 demostraron que es posible flotar los telururos de oro en comparación con otros minerales refractarios que contienen oro y la tecnología de bio-oxidación parece ser más adecuada para la oxidación del concentrado de flotación.

3.3 Usos del telurio

El telurio tiene diversas aplicaciones, desde la fabricación de celdas solares hasta mejoras en aleaciones de acero, cobre, plomo y hierro. En la industria química, se utiliza como agente de vulcanización y acelerador en el procesamiento de caucho, y tiene un papel importante en la producción de fibra sintética, cerámica, vidrio y medicina, actuando como agente antiviral, antimicrobiano y antiinflamatorio (Santos-Munguía et al., 2016).

3.4 Minerales refractarios

El término "mineral refractario" define aquellos materiales que, cuando se someten a un proceso de cianuración convencional, muestran bajas recuperaciones (< 80%) o un alto consumo de reactivos (Weir & Berezowsky, 1984).

La clasificación de los minerales de oro refractarios se basa en el grado de refractariedad, que se determina por la proporción de oro recuperado. Según su grado de refractariedad, y según la clasificación modificada por Asamoah et al., (2014), los tipos de minerales de oro refractarios se dividen en las siguientes categorías:

- Molienda libre: Más del 95% de recuperación de oro. No refractarios.
- Levemente refractario: Entre 80 y 95% de recuperación de oro.
- Moderadamente refractario: Entre 50 y 80% de recuperación de oro.
- Altamente refractario: Menos del 50% de recuperación de oro.

Esta clasificación se basa en la eficacia con la que el oro presente en los minerales puede ser económicamente recuperado mediante cianuración. La presencia de estos minerales refractarios requiere pretratamientos especiales, generalmente procesos de oxidación, para mejorar la recuperación del oro contenido en el mineral (Abrantes & Costa, 1996).

La refractariedad de los minerales que contienen metales preciosos puede deberse a varias razones, entre ellas existen las físicas y químicas (Figura 2). Los factores físicos que contribuyen a la refractariedad incluyen la presencia de oro encapsulado en minerales de

sulfuro, la ocurrencia de oro finamente disperso en la matriz mineral y la presencia de minerales que forman una matriz refractaria al cianuro (cuarzo). Por otro lado, los factores químicos pueden incluir la presencia de minerales como la pirita (sulfuro de hierro) o la arsenopirita (sulfuro de hierro y arsénico) que pueden consumir al cianuro o al oxígeno que son necesarios para disolver a los metales preciosos (Yannopoulos, 1990).

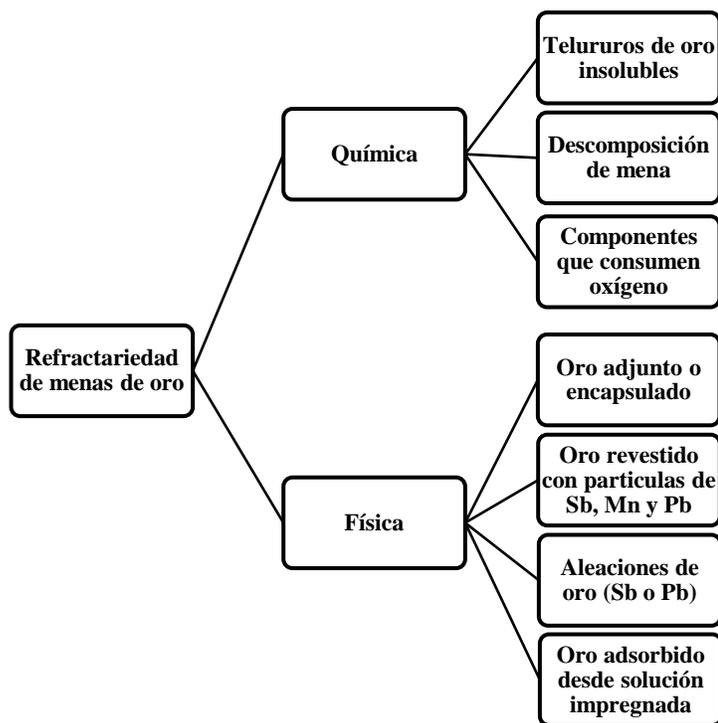


Figura 2. Esquema de clasificación de menas de oro (Yannopoulos, 1990).

En el caso del telururo de oro, la refractariedad se debe a que el telurio forma compuestos muy estables con el oro (o con la plata), que no son solubles en cianuro, o que presentan una velocidad de disolución muy lenta, lo que dificulta su extracción mediante este proceso (Jackman & Sarbutt, 1990).

En el campo del tratamiento de minerales de oro y plata refractarios, se han realizado avances significativos en tres áreas principales: la oxidación hidroquímica o atmosférica en medio ácido o alcalino, la oxidación biológica o bioquímica, y la oxidación a presión a altas temperaturas, también en medio ácido o alcalino (Parga & Carrillo, 1996).

Celep et al., (2009) investigaron la cianuración de un mineral refractario de oro y plata. Las pruebas de lixiviación mostraron que la extracción de oro y plata es consistentemente baja, con recuperaciones del 47% y 19.2%, respectivamente, en un período de lixiviación de 24 horas. Incluso la molienda fina (hasta 38 μm) no mejora la recuperación de estos metales. El enfoque de lixiviación diagnóstica proporcionó información sobre la causa de la refractariedad del mineral, identificando factores que dificultan la extracción efectiva de oro y plata. La lixiviación diagnóstica tiene como objetivo identificar las fases minerales que contienen oro y entender las causas de la baja recuperación de metales preciosos en la lixiviación convencional. Al aplicar secuencialmente diferentes reactivos químicos para una disolución selectiva, es posible determinar cuáles minerales son responsables de la refractariedad y, así, identificar opciones de pretratamiento para mejorar la recuperación de oro y plata.

3.5 Tratamientos oxidativos para minerales refractarios

El procesamiento de minerales refractarios sulfurados puede seguir dos enfoques principales; uno se utiliza altas temperaturas (pirometalurgia), mientras que el otro emplea soluciones acuosas (hidrometalurgia) para liberar el oro y facilitar su recuperación mediante cianuración (Chaguayo & Alejandro, 2012).

3.5.1 Pirometalurgia

El método tradicional más comúnmente utilizado para el tratamiento de minerales refractarios de oro y plata es la tostación oxidante, sin embargo, tiene desventajas, como la generación de dióxido de azufre y la sensibilidad a la presencia de antimonio y plomo en el concentrado. Además, los gases generados durante la tostación, que contienen azufre, arsénico, antimonio y mercurio, pueden contaminar el medio ambiente (Parga & Carrillo, 1996).

La tostación de minerales refractarios como los telururos es un paso fundamental en el procesamiento de estos tipos de minerales para la extracción de oro. En el caso de minerales

refractarios que contienen telururos, la tostación se realiza para descomponer los minerales y hacer que el oro sea accesible para los procesos de lixiviación posteriores.

Durante la tostación de minerales refractarios que contienen telururos, se busca lograr la conversión de los telururos de oro en formas más accesibles para la extracción. Por ejemplo, en presencia de oxígeno, los telururos de oro pueden transformarse en oro y dióxido de teluro. Este proceso de descomposición es crucial para liberar el oro contenido en los telururos y facilitar su recuperación.

La Brooy et al., (1994) utilizaron el método de tostación de lecho fluidizado, utilizando un mineral de oro refractario que no contenía telururos. Este proceso logró una eliminación del 99.5% del azufre de los concentrados, una ley de cabeza de calcina de 50 g/t y una recuperación total de oro del 94%. El tostado de la pirita se realiza generalmente a temperaturas que oscilan entre 650 y 700°C. Durante este proceso, la pirita se convierte gradualmente en hematita en varias etapas. La hematita, a diferencia de la pirita, no se disuelve en la solución de cianuro. Sin embargo, debido a su estructura porosa, las partículas de oro quedan expuestas y se vuelven accesibles para el proceso de extracción.

La ecuación general proporcionada describe la reacción química global (Ec. 1) en la que la pirita (FeS₂) se oxida en presencia de oxígeno (O₂) para formar hematita (Fe₂O₃) y dióxido de azufre (SO₂) (La Brooy et al., 1994).



La reacción involucra dos etapas: primero, la formación de pirrotita (FeS) y luego la conversión de la pirrotita en hematita, durante la cual el azufre se volatiliza como dióxido de azufre (SO₂). Los parámetros cruciales en este proceso son la presión parcial de oxígeno y la temperatura en la cámara de tostado. Además, el tostado también descompone los telururos de oro presentes en los concentrados piríticos a temperaturas superiores a 450°C mediante la siguiente reacción reportada por La Brooy et al., (1994):



El proceso de tostado de arsenopirita, puede llevarse a cabo en una o dos etapas a aproximadamente 650°C. Durante este proceso, la arsenopirita se convierte finalmente en hematita, trióxido de arsénico (As₂O₃) y dióxido de azufre (SO₂) (La Brooy et al., 1994), según la reacción química general:



El trióxido de arsénico se enfría y se recoge como sólido, mientras que el dióxido de azufre se emite a la atmósfera. La presión parcial de oxígeno y la temperatura en la cámara de tostado son nuevamente los principales parámetros que controlan los productos finales de este proceso.

3.5.2 Hidrometalurgia

La oxidación hidrometalúrgica involucra la adición de un oxidante a una solución acuosa en la cual se encuentra el mineral. Entre las opciones para suministrar un oxidante se encuentra la adición de oxígeno enriquecido, de peróxido de hidrógeno, y de peróxido de calcio entre los más comúnmente utilizados. La eficiencia de cada oxidante depende de su potencial de oxidación, de su concentración, del tiempo de exposición al mineral y del grado de refractariedad del mineral (La Brooy & Komosa, 1992).

Se describen a continuación algunos agentes oxidantes utilizados en el proceso de oxidativo.

Peróxido de hidrógeno (H₂O₂)

El peróxido de hidrógeno (H₂O₂) es un agente oxidante con mayor poder oxidante que el oxígeno. La actividad oxidante del peróxido de hidrógeno resulta de la presencia del átomo de oxígeno adicional en comparación con la estructura del agua. Este átomo de oxígeno adicional se conoce como "oxígeno activo", que tiene la capacidad de oxidar directamente muchos compuestos (Woodard & Curran, Inc., 2016). En la industria de la extracción de los metales preciosos se ha utilizado peróxido de hidrógeno en la cianuración, para incrementar

el oxígeno disuelto y favorecer la disolución del oro; sin embargo, su uso al mismo tiempo que el cianuro presenta algunos inconvenientes ya que puede incrementar el consumo de cianuro al ser oxidado éste por el peróxido (Bayat et al., 2003; Nunan et al., 2017).

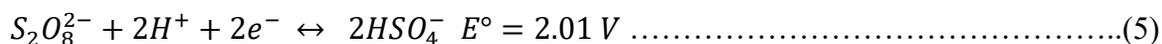
Persulfato ($S_2O_8^{2-}$)

El persulfato, también conocido como peroxodisulfato, es un compuesto químico con la fórmula $S_2O_8^{2-}$, que en soluciones acuosas al oxidar otra especie en un rango de pH de 3 a 7 produce oxígeno disuelto (Ec 4), y es un oxidante que se utiliza en muchas aplicaciones.



Una parte importante del uso del persulfato son los procesos de oxidación avanzada (POA), en los cuales un oxidante (persulfato, peróxido de hidrógeno, ozono, etc.) se activa por medio de algunos agentes (temperatura, luz ultravioleta, ultrasonido, etc.) para generar radicales que a su vez son más oxidantes que el oxidante original.

El persulfato es el oxidante más fuerte de la familia de compuestos de peroxígeno, que incluye los compuestos blanqueadores y desinfectantes de uso común, peroxomonosulfato y peroxicarbonato (Dakubo et al., 2012). El potencial de reducción estándar del peroxodisulfato está dado por:



El valor de E° para $S_2O_8^{2-}$ es mayor que el de H_2O_2 ($E^\circ = 1.8 \text{ V}$) y el permanganato (MnO_4^-) ($E^\circ = 1.7 \text{ V}$). El peroxodisulfato actúa como un oxidante a través de su descomposición en dos radicales de sulfato ($SO_4^- \cdot$)

de acuerdo con:



El radical sulfato es uno de los oxidantes en fase acuosa más fuertes, con un potencial de reducción estándar de $E^\circ = 2.6 \text{ V}$, que es cercano al del radical hidroxilo ($E^\circ = 2.8 \text{ V}$). El persulfato produce radicales de sulfato ($SO_4^{\cdot -}$) como sustancia activa, lo que acelera la velocidad de reacción de oxidación a temperatura ambiente (Zhou et al., 2023).

El persulfato activado por ultrasonido ha demostrado ser efectivo para promover la oxidación de sulfuros en el mineral, lo que facilita la extracción de oro durante el proceso de lixiviación. Este método utilizando persulfato demostró una mayor eficiencia de pretratamiento en comparación con la activación tradicional por calor, con una eficiencia de oxidación dos veces mayor. La generación de radicales por el persulfato activado por ultrasonido promovió la oxidación de sulfuros en el mineral de oro, lo que mejoró la eficiencia de lixiviación del oro. Además, el tratamiento con persulfato y ultrasonido redujo el tamaño de partícula del mineral, aumentando el área superficial específica y facilitando la oxidación de las inclusiones y beneficiando el proceso de lixiviación posterior (Gui et al., 2023).

El persulfato puede activarse mediante diferentes métodos, como la activación térmica, química o electroquímica, para generar especies activas que pueden descomponer compuestos orgánicos recalcitrantes. Su capacidad para generar radicales sulfato y otras especies reactivas lo convierte en una opción popular en tecnologías de tratamiento de aguas contaminadas (Zhou et al., 2023).

En comparación con otros oxidantes tradicionales, el persulfato tiene las ventajas de no ser tóxico, ser más estable, fácil de almacenar, barato y fácil de controlar, además de tener un rango de funcionamiento de pH más amplio. En la industria, el persulfato se produce mediante un método de electrólisis que utiliza sulfato de amonio diluido como materia prima (Lavrenko et al., 2019).

La máxima solubilidad del persulfato se refiere a la cantidad máxima de persulfato que puede disolverse en un solvente, típicamente agua, a una temperatura y presión determinadas (Tabla 2). Una alta solubilidad permite usar concentraciones más altas del oxidante en soluciones para procesos de tratamiento, limpieza, o desinfección, haciendo el proceso más eficiente (Evonik Leading Beyond Chemistry, 2024).

Tabla 2. Solubilidad de diferentes persulfatos (Evonik Leading Beyond Chemistry, 2024).

Solubilidad g/100 ml de H₂O	Persulfato de amonio	Persulfato de potasio	Persulfato de sodio
25°C	85	6	73
50°C	116	17	86

Hipoclorito (ClO⁻)

El uso del sistema cloruro/hipoclorito para la lixiviación de oro se remonta a antes de 1887, pero cayó en desuso debido a los problemas de corrosión asociados al sistema; sin embargo, en la actualidad existen materiales que pueden mitigar este problema. Publicaciones recientes hacen mención al uso de cloruro-hipoclorito, presentándose como una propuesta atractiva y respetuosa con el medio ambiente (Quiroz Aguinaga et al., 2021).

El cloruro de sodio y el hipoclorito se han utilizado para lixiviar oro de minerales que contienen pirita, obteniendo cloruro áurico. Además, el hipoclorito forma gas cloro (Cl_{2(ac)}) en condiciones altamente ácidas (pH < 3.5), que se disuelve en la solución, pero puede resultar en la liberación de gas de cloro tóxico de la solución (Hasab et al., 2014). También, el hipoclorito se descompone fácilmente con la luz y es altamente corrosivo.

Ellis en 1998 refinó la técnica de extracción de oro de los minerales de telurio al introducir una etapa oxidativa utilizando hipoclorito antes de la lixiviación con cianuro. Esta técnica fue especialmente útil para partículas de mineral más gruesas (10 mm) (Ellis, 2005).

Debido a estas limitaciones, se han desarrollado nuevos métodos y tecnologías hidrometalúrgicas como alternativas más eficientes y sostenibles para el tratamiento de minerales refractarios de oro y plata, con el objetivo de reducir la contaminación ambiental y mejorar la recuperación de los metales preciosos

El tratamiento que se propone se realizará en medio acuoso utilizando diferentes oxidantes; este tratamiento tiene como objetivo en romper los enlaces químicos (AuAg-Te) y lograr una

recuperación efectiva de los metales preciosos. Dado que todos los pretratamientos que se han propuesto son oxidantes, se recurrirá a un agente oxidante para nuestra propuesta. En la Tabla 3 se muestran algunos potenciales de oxidación de algunos agentes químicos (Hassaan et al., 2017).

Tabla 3. Potencial oxidante de algunos agentes oxidantes (Hassaan et al., 2017).

Agente oxidante	Fórmula	Potencial de oxidación electroquímica (POE, V)
Flúor	F	3.06
Radical hidroxil	OH^{\bullet}	2.8
Ozono	O_3	2.08
Persulfato	$S_2O_8^{2-}$	2.01
Peróxido de Hidrógeno	H_2O_2	1.8
Permanganato	MnO_4^-	1.7
Hipoclorito	ClO^-	1.49
Cloro	Cl	1.36
Dioxido de cloro	ClO_2	1.27

3.6 Método tradicional de recuperación por cianuración

La cianuración ha sido utilizada durante más de 100 años en la industria minera debido a su eficacia en la extracción de oro y plata de minerales oxidados. Sin embargo, las reacciones químicas involucradas en la cianuración pueden ser complejas y no están completamente comprendidas.

La cianuración convencional es el método más común utilizado para la extracción de oro; sin embargo, algunos minerales de oro, como el telururo de oro ($AuTe_2$), presentan características refractarias que dificultan su disolución mediante este proceso. Ellis (2005), menciona que algunos investigadores sostienen que los telururos provocan problemas metalúrgicos, complicando la recuperación del oro. Además, los resultados de las pruebas de laboratorio con estos minerales han sido a veces confusos y difíciles de explicar.

Adicionalmente, cuando el oro está presente en minerales sulfídicos, la presencia de sulfuros puede provocar una falta de oxígeno disuelto para la lixiviación oxidativa del oro, lo que reduce la recuperación máxima alcanzable de oro del mineral. La presencia de sulfuros en el mineral también causa un consumo adicional del agente lixivante (cianuro) debido a la formación de tiocianato (SCN^-), lo que aumenta los costos del proceso. Una preoxidación podría ayudar a mejorar la recuperación de oro por los siguientes mecanismos: mejorar la oxigenación a lo largo del circuito de cianuración, proporcionar un potencial oxidante capaz de oxidar los telururos de oro/plata, y oxidar en cierta medida la matriz de sulfuro que puede ocluir a los metales preciosos. Después de esta oxidación, el oro/plata estaría libre para ser lixiviado por el cianuro (Nunan et al., 2017).

Los experimentos realizados por González-Ibarra et al., (2017) con telururo de plata (Ag_2Te) y cianuración estándar demostraron que solo el 13% de la plata se extrae después de ocho horas sin la adición de plomo (II). Sin embargo, cuando se añade plomo(II) al sistema de cianuración en concentraciones que van de 50 mg/l a 150 mg/l, la extracción de plata aumenta significativamente a más del 98% para el mismo tiempo de lixiviación.

Según Karimi et al., (2010), al aumentar el tiempo de molienda resultó un incremento en el consumo de cianuro para las muestras. Este fenómeno se atribuyó a la liberación de más minerales durante la molienda prolongada, además de una mayor cobertura de la superficie de los granos de oro por materia carbonosa, calcita y minerales arcillosos. A su vez, el aumento de la concentración de cianuro en la pulpa de lixiviación provocó un alto consumo de cianuro debido a la presencia de cianidas, pero no se tradujo en una mejora en la recuperación de oro.

En la minería, el oxígeno atmosférico se utiliza como oxidante en el proceso de cianuración del oro. Sin embargo, debido a su baja solubilidad y la disminución de su concentración durante las reacciones, el proceso de cianuración se vuelve lento y menos eficiente. Por estos motivos, se han investigado otros agentes oxidantes como alternativas al oxígeno atmosférico a lo largo del último siglo (Guzman et al., 1999).

En comparación con la cianuración, el sistema $\text{S}_2\text{O}_8^{2-} - \text{I}^- - \text{H}_2\text{O}$ ofrece ventajas como la no toxicidad, el respeto al medio ambiente, una rápida velocidad de lixiviación y una alta tasa

de extracción de oro. Por lo tanto, este sistema se presenta como un método alternativo prometedor para la extracción de oro de minerales refractarios (Wang et al., 2020).

De todas las investigaciones que se han realizado sobre tratamientos oxidantes para poder recuperar el oro y la plata de telururos, ninguno se ha aplicado industrialmente, excepto la tostación, la cual ahora presenta restricciones ambientales debido a la producción de dióxido de azufre (SO₂).

4. JUSTIFICACIÓN

Los minerales refractarios a la cianuración, como los telururos de oro y plata, presentan problemas significativos en el proceso de recuperación de estos metales preciosos por varias razones. La razón principal es que los telururos de oro y plata no se disuelven fácilmente en las soluciones de cianuro, que es el método más comúnmente utilizado para la extracción de oro y plata. Esto se debe a que los enlaces químicos en los telururos son muy estables y no se rompen fácilmente durante el proceso de cianuración.

Un problema adicional, es que en muchos minerales refractarios, el oro y la plata están encapsulados dentro de matrices minerales resistentes como la pirita o la arsenopirita, lo que impide que las soluciones de cianuro accedan y disuelvan los metales preciosos, aun cuando estos estuvieran en forma nativa o elemental.

Durante la cianuración, los telururos pueden formar compuestos estables que no se descomponen fácilmente, lo que reduce la cantidad de oro y plata que se puede recuperar. Estos compuestos estables pueden incluir teluratos o teluritos, que son difíciles de tratar con los métodos convencionales.

5. HIPÓTESIS

Un tratamiento de oxidación aplicado a los minerales refractarios que contienen oro y plata asociados al telurio, mejorará la extracción de estos metales preciosos. La oxidación con un oxidante eficiente podría romper el enlace del oro (y/o plata) con el telurio para hacer posible su recuperación utilizando posteriormente los métodos convencionales para este proceso.

6. METODOLOGÍA

El objetivo principal de este estudio fue la oxidación de las especies oro/plata-teluro para separar el enlace que las une y permitir la recuperación de los metales preciosos. Inicialmente se realizó un estudio con la especie sintética Ag_2Te para determinar las condiciones óptimas de oxidación, para después utilizar estas condiciones en el tratamiento de un mineral proveniente del Estado de Sonora que se sabe que contiene telururos de oro.

El mineral de Sonora se sometió a una cianuración para evaluar su grado de refractariedad. Una vez demostrada su refractariedad, el mineral se sometió al proceso de oxidación y posteriormente, al mineral filtrado y secado se le realizó una cianuración, para comparar el efecto del proceso de oxidación en la recuperación de oro por cianuración.

La primera parte de este trabajo experimental consistió en el aprendizaje del uso del espectrómetro de absorción atómica para cuantificación de metales en solución acuosa (preparación de estándares, calibración y manejo de diluciones). En este trabajo se analizó oro, plata y teluro en solución, lo que indicará la descomposición, o rompimiento del enlace del teluro con el (los) metales preciosos. Además del equipo de absorción atómica, se aprendió el uso y calibración de los equipos de medición de pH, de potencial redox de la solución (ORP) y de oxígeno disuelto.

En la segunda parte del proyecto se implementó el sistema experimental: el reactor cilíndrico de vidrio con circulación de agua a temperatura constante, y la medición de todas las variables de interés. También se prepararon las muestras minerales a un tamaño de partícula determinado y con un rango estrecho de tamaños, para facilitar la interpretación cinética de los resultados.

En esta sección se presenta el material utilizado, el equipo empleado, el procedimiento seguido para las pruebas de oxidación y de cianuración, y el procedimiento experimental seguido a lo largo de este trabajo.

6.1 Materiales utilizados (especie sintética, Ag_2Te , y mineral del Estado de Sonora)

El término "sintético" se utiliza para describir materiales que han sido creados en laboratorio. Estos materiales pueden ser utilizados en diversas aplicaciones industriales, pero no se consideran minerales en el sentido estricto de la palabra.

Se utilizó una especie sintética (Ag_2Te) marca Sigma-Aldrich, con una pureza de 99.9% (Figura 3). Esta especie se trituró en un mortero de ágata y se pasó por los tamices granulométricos, eligiendo un tamaño de partícula de $44\mu\text{m} \leq y \leq 37\mu\text{m}$ (material entre la malla 325 y 400).



Figura 3. Especie sintética Ag_2Te .

El mineral es proveniente de una mina ubicada en Sonora, México (Figura 4). Tiene alta concentración de oro, 383.39 g/t, 114 g/t de plata y 130 g/t de telurio (Tabla 4) (Rodríguez-Chávez, 2023). En un trabajo previo de doctorado, el mineral se sometió a un proceso de trituración, molienda y homogenización, logrando reducir un tamaño de partícula a $\leq 106\mu\text{m}$, y se caracterizó su composición química mediante ensaye a fuego (para oro y plata, después de tostación para disminuir la interferencia de los telurios), y por digestión ácida y Absorción atómica para los demás elementos.



Figura 4. Mineral de Sonora, México.

Tabla 4. Composición química del mineral industrial de Sonora (Rodríguez-Chávez, 2023).

	Au	Ag	Te	Pb	Ba	Cd	S	Fe
	(g/t)							
Mineral de Sonora	381.3	14	130	85.27	10.59	2.35	33100	24900

6.2 Equipo y reactivos

El equipo utilizado consiste en reactores cilíndrico de vidrio, uno de 120 ml para las lixiviaciones con 100 ml de solución y otro de 500 mL para lixiviaciones con 200 ml de solución, ambos agitados magnéticamente. Estos reactores están enchaquetados para el control de temperatura constante, y son agitados magnéticamente. Además, están provistos de electrodos para medición de pH, ORP y sensor de temperatura. La concentración de metales en solución (Au, Ag, Te) durante el proceso de oxidación se medirá utilizando un espectrómetro de absorción atómica (Varian SpectrAA220). Para la preparación de reactivos y el peso de las muestras se utilizó una balanza analítica (Ohaus, Pionner). Una lista de los equipos utilizados se presenta en la Tabla 5, y en la Tabla 6 se presentan los reactivos utilizados.

Tabla 5. Equipos para la experimentación.

Nombre	Características
Reactor enchaquetado	120 y 500 ml
Agitador magnético	IKA
Sistema de control de temperatura constante	Techne FTE10APC
Medidor de pH, ORP y temperatura	Hanna Instruments HI3222
Medidor de oxígeno disuelto	Thermo Scientific Star 3, B34886
Espectrómetro de absorción atómica	Varian SpectrAA220
Balanza Analítica	Ohaus, Pionner PA114, precisión 0.0001g

Tabla 6. Reactivos químicos utilizados.

Nombre	Formula química	Marca	Pureza
Ácido perclórico	HClO ₄	Jalmek	62-72%
Peróxido de hidrógeno	H ₂ O ₂	Jalmek	30%
Permanganato de potasio	KMnO ₄	Sigma-Aldrich	≥ 99%
Persulfato de potasio	K ₂ S ₂ O ₈	Jalmek	99%
Cianuro de sodio	NaCN	Jalmek	97%
Hipoclorito de sodio	NaClO	Jalmek	23%-24%
Ácido nítrico concentrado	HNO ₃	Fermont	70%
Ácido clorhídrico	HCl	J.T. Baker	37%
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	Macron	95-98%
Hidróxido de sodio	NaOH	Jamlek	≥ 97.7

6.3 Procedimiento para la descomposición oxidativa del telururo de plata (Ag₂Te)

Se trituro el mineral en un mortero de ágata y se pasó por los tamices granulométricos, eligiendo un tamaño de partícula de $44 \mu\text{m} \leq y \leq 37 \mu\text{m}$ (material entre la malla 325 y 400). Se pesó la cantidad deseada (entre 50 y 100 mg) y se añadió al reactor con agua desionizada (100 y 200 ml). Después se adicionó el oxidante y se ajustó el pH de la solución acuosa a un

medio alcalino (pH 10.5) o ácido (pH 3), según la prueba a realizar. Se utilizaron tres ácidos diferentes para las pruebas a pH = 3: ácido nítrico (HNO_3), ácido clorhídrico (HCl) y ácido sulfúrico (H_2SO_4).

Cada oxidación se llevó a cabo durante tres o cinco horas, tomando muestras de 1.5 ml a la primera media hora, a la hora, a las dos horas y a las tres horas. Las muestras tomadas fueron filtradas, aforadas a 20 ml y finalmente se cuantificó la plata y el telurio con el equipo de espectroscopía de absorción atómica (VARIAN Spectra AA 240).

Se trabajó a una temperatura 25°C y esta fue controlada con un sistema de recirculación de agua; la agitación magnética se fijó a 350 rpm. El arreglo experimental que fue usado para la descomposición oxidativa se muestra en la Figura 5.

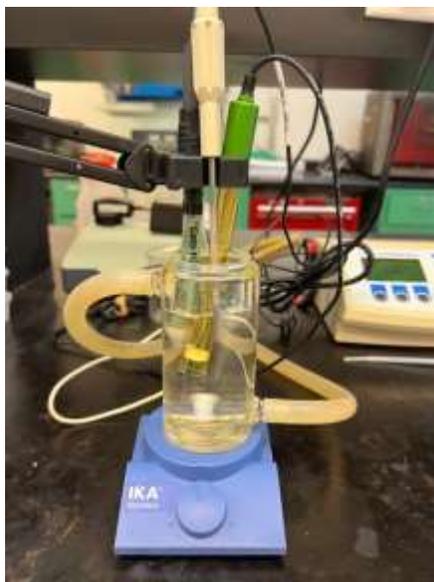


Figura 5. Arreglo experimental del equipo utilizado para la descomposición oxidativa Ag_2Te .

6.4 Procedimiento para la descomposición oxidativa del mineral del Estado de Sonora

El mineral fue previamente triturado hasta alcanzar un tamaño de partícula de $\leq 106 \mu\text{m}$. Se pesaron 5 gramos de este mineral y se añadieron a un reactor que contenía 200 ml de agua desionizada. Posteriormente, se introdujo el oxidante requerido lo cual hizo bajar el pH de la solución a 3 sin la necesidad de utilizar ningún ácido adicional para dicha regulación.

El proceso de oxidación se llevó a cabo durante un periodo de cinco horas. Durante este tiempo, se tomaron muestras 10 ml en intervalos específicos: a los 30 minutos, a la 1 hora, a las 2 horas, y finalmente, al completar las 5 horas de reacción. Las muestras obtenidas fueron filtradas y se analizaron sin dilución. Se trabajó a una temperatura 25°C y esta fue controlada con un sistema de recirculación de agua; la agitación magnética se fijó a 350 rpm. Finalmente, se cuantificaron las concentraciones de oro, plata y telurio presentes en las muestras utilizando un espectrómetro de absorción atómica VARIAN Spectra AA 240.

6.5 Procedimiento para la cianuración

La cianuración se llevó a cabo en un reactor enchaquetado, diseñado para un seguimiento preciso de las condiciones experimentales. Inicialmente, se añadió agua desionizada al reactor. Seguidamente, se ajustó el pH a 10.5 mediante la adición de hidróxido de sodio (NaOH), asegurando un entorno alcalino adecuado para la disolución del oro. Luego, se incorporaron 1500 ppm de cianuro libre (CN^-) y la cantidad específica de la muestra mineral, como se ilustra en la Figura 6. La reacción se desarrolló durante un periodo de 3 horas, manteniendo una temperatura constante de 25°C y una velocidad de agitación de 350 rpm.

Es importante destacar que la reacción se realizó en condiciones abiertas a la atmósfera. Este aspecto es importante para la disolución del oro, debido a que se requiere la entrada de oxígeno de la atmósfera a la solución.



Figura 6. Arreglo experimental del equipo utilizado para la cianuración del mineral.

6.6 Metodología experimental

Se presenta a continuación la secuencia de pruebas que se realizaron. Los resultados se presentarán y discutirán en el mismo orden en el capítulo siguiente, dividiendo las pruebas en dos secciones, las realizadas con la especie pura telururo de plata (Ag_2Te), y las realizadas con el mineral de Sonora.

6.6.1 Especie sintética telururo de plata (Ag_2Te)

La primera parte de este trabajo se realizó con el telururo de plata sintético. Se realizaron las siguientes pruebas:

a) Pruebas preliminares de oxidación y de Ag_2Te con H_2O_2

Se realizaron las pruebas preliminares de tratamiento oxidativo del telururo de plata, utilizando peróxido de hidrógeno. Las pruebas consistieron en explorar el efecto del pH (un valor alcalino y uno ácido) y del tipo de ácido para bajar el pH (ácidos nítrico, sulfúrico y

clorhídrico) en la disolución de plata (Figura 7). Se adicionaron 0.7 ml de peróxido al 30% en 100 ml de solución (0.6M).

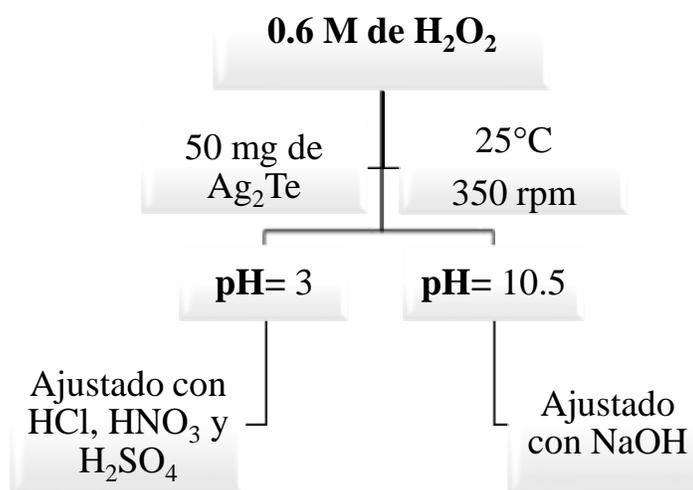


Figura 7. Metodología experimental del tratamiento oxidativo del Ag_2Te .

b) Cianuración del Ag_2Te oxidado con H_2O_2

Se llevó a cabo un proceso de cianuración del telururo de plata que previamente fue sometido a un tratamiento de oxidación utilizando peróxido de hidrógeno (H_2O_2), ver Figura 8. Para este proceso, el pH se ajustó a 10.5 empleando hidróxido de sodio (NaOH) y se utilizaron 1500 ppm de cianuro, al igual que en todas las cianuraciones de este trabajo. El objetivo principal de este experimento fue determinar si se rompió el enlace químico entre la plata (Ag) y el telurio (Te) con la oxidación realizada previamente.

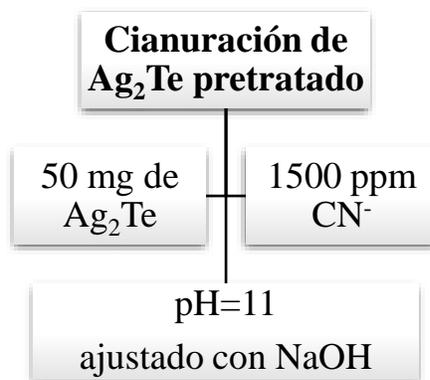


Figura 8. Pruebas de cianuración del Ag_2Te oxidado con H_2O_2 .

c) Evaluación del potencial oxidante de soluciones con adiciones continuas de H_2O_2 . Pruebas en blanco (sin sólidos) en ambiente ácido y alcalino

Estas pruebas (ver Figura 9) se realizaron con el objetivo de evaluar el valor máximo de potencial redox (ORP) que se puede obtener, incluso con adiciones repetidas de peróxido de hidrógeno. Cabe aclarar que no se utilizó mineral ni especie sintética en estos experimentos. Se empleó un reactor enchaquetado al que se añadieron 100 ml de agua desionizada. Se ajustó el pH a 3 utilizando tres ácidos: clorhídrico, nítrico y sulfúrico, y se mantuvo una velocidad de agitación de 350 rpm. Inicialmente, se añadió una concentración de 0.6 M de H_2O_2 . Posteriormente, cada 15 minutos durante 1 hora, se agregó la misma cantidad de peróxido (0.7 ml). Se controló la temperatura a $25^\circ C$ y se tomaron lecturas del potencial de oxidación. Se repitió el mismo procedimiento a un pH de 10.5 ajustado con hidróxido de sodio.

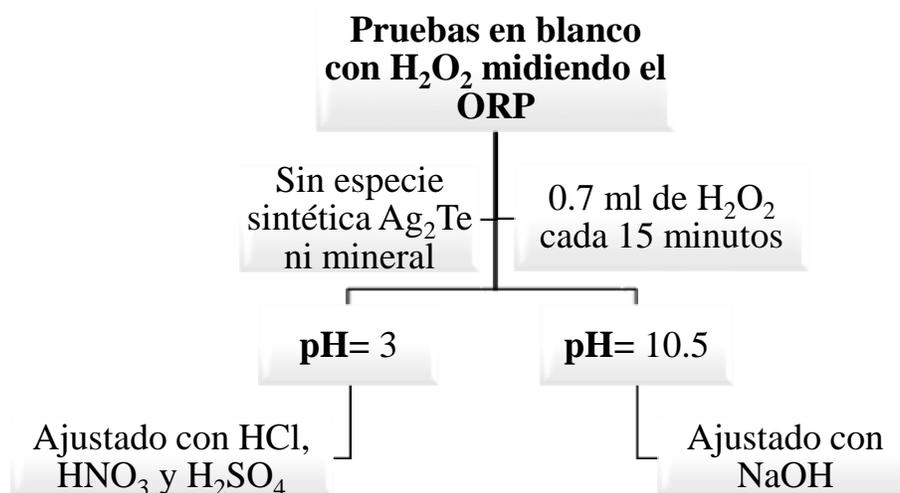


Figura 9. Evaluación del potencial oxidante de soluciones con adiciones continuas de H_2O_2 .

d) Medición de ORP y O_2 disuelto en solución con H_2O_2 a pH 3 con HCl. Pruebas sin sólidos

Basándose en la metodología ya descrita, se decidió realizar mediciones sin sólidos, en un ambiente ácido, ajustando el pH con HCl (Figura 10). Además de medir el ORP, se midió el oxígeno disuelto (O_2 dis.) en el sistema. El experimento se llevó a cabo en un reactor enchaquetado de 120 mL. Se agregó peróxido de hidrógeno a una concentración de 0.6 y se

ajustó el pH a 3 con HCl. Se controló la temperatura a 25°C, manteniendo una velocidad de agitación de 350 rpm durante un lapso de media hora.

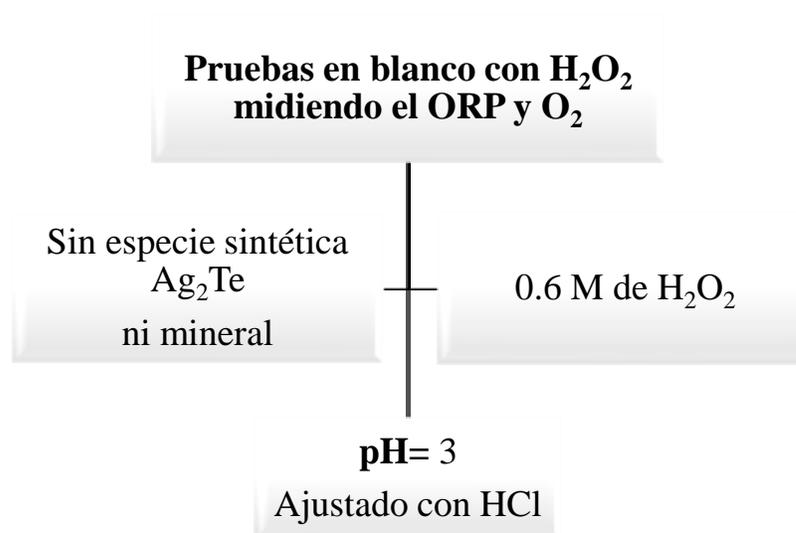


Figura 10. Medición de pH y Oxígeno disuelto en soluciones de H₂O₂ a pH 3, sin sólidos.

e) Evaluación del ORP y O₂ disuelto para diferentes oxidantes (sin sólidos)

Debido a que las pruebas en blanco con la adición constante de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) trabajando en ambientes ácidos y alcalinos no lograron alcanzar potenciales redox elevados en comparación con otros oxidantes reportados en la literatura (800-850 mV), se decidió utilizar otros reactivos. En lugar de usar peróxido de hidrógeno, se probaron otros oxidantes (KMnO₄, K₂S₂O₈, NaClO y HClO₄) para estudiar el potencial de reducción-oxidación (ORP) y el oxígeno disuelto (O₂). La concentración de los oxidantes se definió en base a los resultados de un estudio previo de oxidación con hipoclorito de sodio, en el cual se utilizó una concentración de 0.6 M. Esta fue la concentración utilizada en los oxidantes evaluados. En el caso del persulfato de potasio, al presentar baja solubilidad, se utilizó también la concentración de 0.15 M.

Los experimentos se realizaron sin mineral ni especie sintética, en un reactor encaquetado. Se añadieron 100 ml de agua desionizada y se ajustó el pH a 3 con HCl. Posteriormente, se

incorporó la cantidad deseada del oxidante. Se midieron el ORP, el oxígeno disuelto (O_2) y el pH cada 5 minutos. La prueba se llevó a cabo con una velocidad de agitación de 350 rpm, una temperatura controlada de $25^\circ C$ y tuvo una duración de 30 minutos (ver Figura 11).

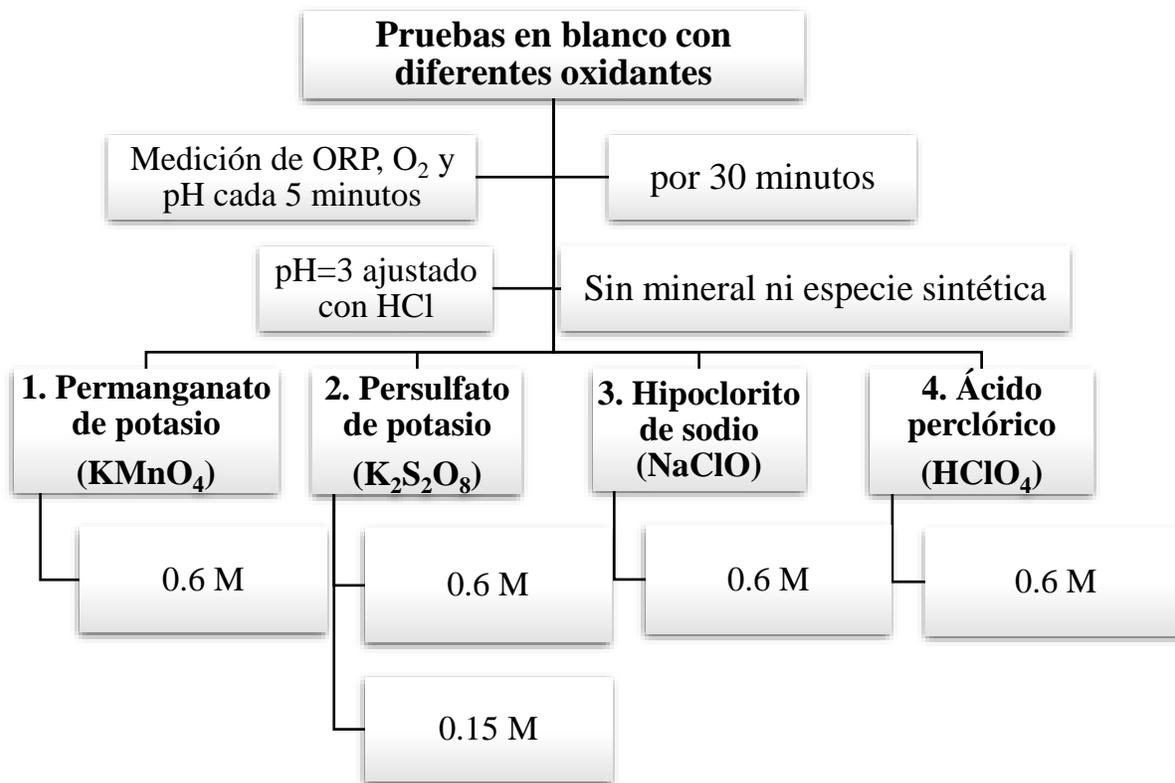


Figura 11. Metodología experimental para medición del poder oxidante de diferentes reactivos.

f) Oxidación del Ag_2Te sintético con persulfato de potasio

Las pruebas para evaluar la factibilidad de la descomposición oxidativa de los telururos de metales preciosos utilizando persulfato de potasio ($K_2S_2O_8$) se realizaron con una especie sintética, el telururo de plata (Ag_2Te), ver Figura 12. Se utilizó esta especie sintética con el objeto de evitar los efectos que podría tener en el proceso la presencia de otras especies en el mineral que también pueden ser oxidadas, como la galena (PbS) y la pirita (FeS_2). Se evaluó el efecto del pH, del tipo de ácido y de la concentración del oxidante. Se utilizó el ácido clorhídrico para ajustar el pH a 3, y también se hicieron pruebas sin adición de ácido; también a pH de 3 debido a la adición del persulfato que baja el pH.

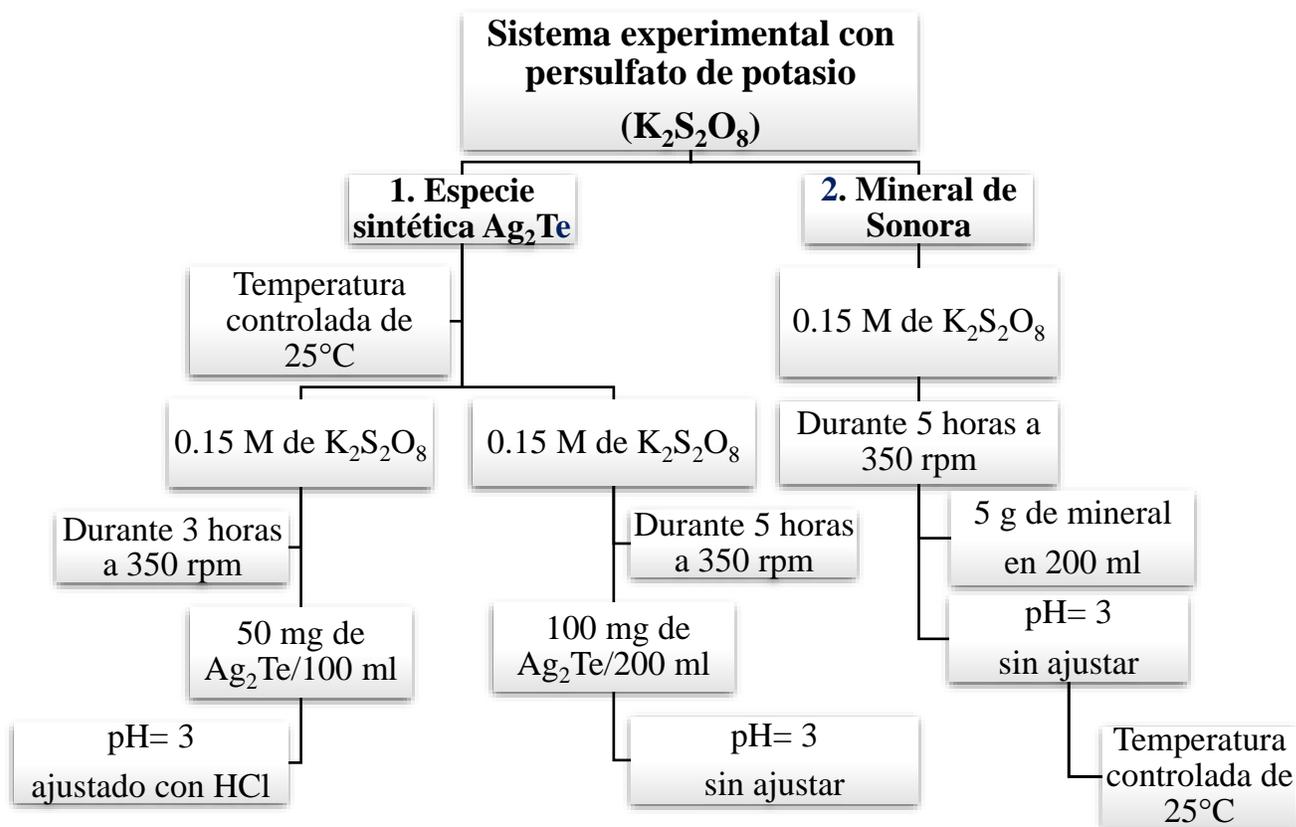


Figura 12. Evaluación del persulfato de potasio como oxidante.

6.6.2 Pruebas con el mineral del Estado de Sonora

Las pruebas realizadas con el mineral de Sonora fueron de tres tipos: una cianuración convencional para evaluar su grado de refractariedad, una oxidación con las mejores condiciones obtenidas con la especie pura, y una cianuración al mineral oxidado para comparar la disolución de oro con respecto a la cianuración del mineral fresco. Este mineral fue seleccionado debido a que presenta el problema de bajas eficiencias en la recuperación de oro/plata por cianuración, esto causado por la presencia de telururos.

a) Determinación de la refractariedad del mineral de Sonora (pruebas de cianuración)

Se realizó una cianuración utilizando el mineral fresco, es decir, mineral que no ha sido sometido a ningún tratamiento, con el objeto de determinar el grado de refractariedad de ese mineral con respecto a la recuperación de oro. El procedimiento de estas pruebas es el mismo reportado en la Sección 6.5, con 200 ml de agua desionizada a pH 11 ajustado con NaOH, una concentración de cianuro de 1500 ppm (CN^-), y 5 gramos de mineral. El experimento tuvo una duración de 3 horas, con una temperatura controlada de 25°C y una agitación de 350 rpm (Figura 13).

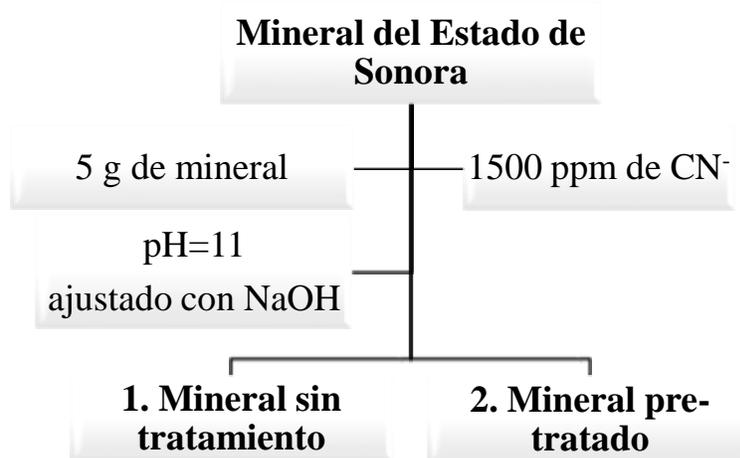


Figura 13. Sistema experimental de la cianuración del mineral fresco y oxidado.

b) Oxidación de mineral de Sonora con persulfato de potasio

Se evaluó la oxidación del mineral del Estado de Sonora utilizando las mejores condiciones encontradas: persulfato de potasio a una concentración de 0.15 M, ver Figura 12.

c) Cianuración del mineral de Sonora oxidado con persulfato de potasio

Después de la oxidación del mineral con persulfato de potasio, los sólidos fueron filtrados, lavados y secados, y sometidos a una cianuración a las mismas condiciones a las que se realizó la cianuración al mineral fresco, descritas en el punto a) de la página anterior. Ver Figura 13.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los resultados descritos en la Sección de Metodología Experimental (6.6). Se inició con la descomposición oxidativa del Ag_2Te sintético utilizando peróxido de hidrógeno en ambiente ácido y alcalino; se evaluó el comportamiento del peróxido de hidrógeno y de otros oxidantes; y finalmente se aplicaron las mejores condiciones encontradas en la especie pura con un mineral del Estado de Sonora.

7.1 Oxidación de la especie sintética telururo de plata (Ag_2Te)

El reactivo inicialmente considerado para la oxidación del telururo de plata fue el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), debido a su amplia disponibilidad y fácil manejo.

a) Pruebas preliminares de oxidación y de Ag_2Te con H_2O_2

La primera serie de pruebas consistió en la oxidación del telururo de plata con peróxido de hidrógeno a pH alcalino y a pH ácido ajustado con tres diferentes ácidos (sulfúrico, clorhídrico y nítrico), según se presentó en la Figura 7.

En las siguientes gráficas se presentan los perfiles de disolución de plata y telururo para estas pruebas. Se considera que si existe telururo o plata en solución se puede asumir que el enlace entre el telururo y la plata ha sido roto. Si la plata se encuentra en solución, ya no sería necesaria la etapa de cianuración. Por el contrario, si el telururo se encuentra en solución, pero la plata no, se puede asumir que el enlace se ha roto y que la plata está en forma sólida pero ya no como telururo sino como plata elemental o como óxido de plata (o cloruro de plata, en el caso de que se haya usado ácido clorhídrico), lo que ya no sería un problema porque estas especies ya no son refractarias al cianuro y podrían recuperarse como se hace normalmente con el proceso de cianuración.

Todas las pruebas de este trabajo se realizaron por duplicado, y las gráficas muestran los resultados de la disolución de la plata y el telurio, así como del potencial redox de la solución, el cual se monitoreó como indicativo del proceso oxidante. La oxidación se llevó a cabo en un reactor enchaquetado donde se añadió 0.6 M de peróxido de hidrógeno ajustado a un pH de 10.5 con NaOH. Se agregaron 50 mg de telururo de plata, manteniendo una temperatura controlada de 25°C y una agitación de 350 rpm durante 3 horas.

La Figura 14 muestra que durante los primeros 30 minutos se tuvo disolución de plata, y después se mantuvo constante su concentración en la solución (aproximadamente en un 5.7% de disolución) hasta la segunda hora, aumentando posteriormente hasta alcanzar el 13.57% a las 3 horas. La tendencia sugiere que, si el estudio se prolongara, la disolución de la plata podría ser mayor. En cuanto al telurio, su disolución fue más lenta, disolviéndose un 3.93% al cabo de las 3 horas.

Al añadir el oxidante, el potencial redox se elevó a 506.90 mV, manteniéndose constante durante la primera hora y aumentando ligeramente hasta alcanzar 536.05 mV a las 3 horas.

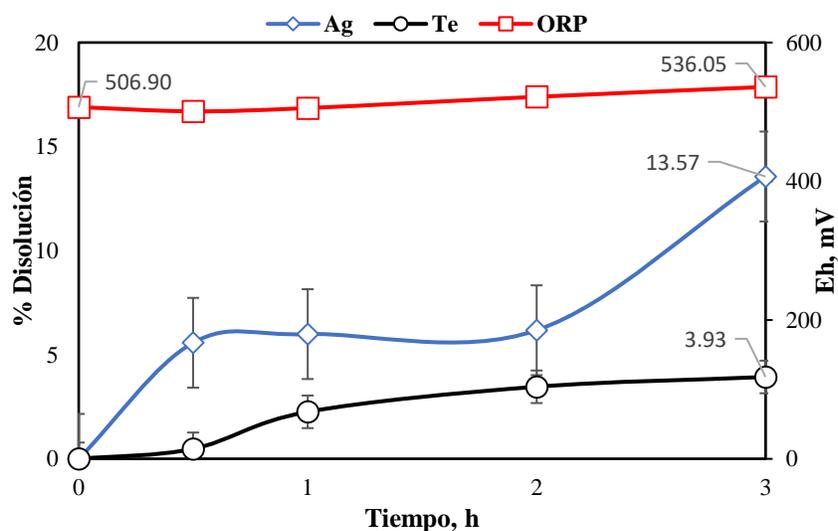


Figura 14. Perfil de Ag y Te disuelto para la oxidación del telururo de plata con peróxido de hidrógeno pH=10.5 ajustado con NaOH.

Los sólidos remanentes de esta oxidación se sometieron a un análisis por difracción de rayos X, con el objeto de tratar de identificar si había alguna especie diferente del telururo de plata inicial. Los patrones de difracción nos proporcionan información sobre la estructura cristalina y la composición de los materiales. En las gráficas de difracción de rayos X (DRX), se muestra la intensidad contra 2θ (2 theta) y muestra como varía la intensidad de los picos de difracción en función del ángulo 2θ . La intensidad de los picos reportados en los difractogramas está relacionada con la cantidad de material cristalino presente en la muestra que produce dispersión de rayos X a un ángulo específico. La Figura 15 muestra el difractograma de los sólidos finales que quedaron después de la oxidación del telururo de plata a pH de 10.5, donde se señalaron con un rombo los picos correspondientes al telururo de plata (Ag_2Te). Dado que se encuentra únicamente este compuesto, se sugiere que el material tratado sigue siendo mayoritariamente Ag_2Te . La ausencia de nuevos picos en el patrón de difracción implica que no se han formado nuevos compuestos cristalinos (al menos, no en cantidades detectables por la técnica de difracción de rayos X, 5%), por lo que se puede decir que el tratamiento oxidativo a pH 10.5 no rompe los enlaces del Ag_2Te de manera significativa, es decir se mantiene su estructura cristalina original sin formar nuevas especies químicas.

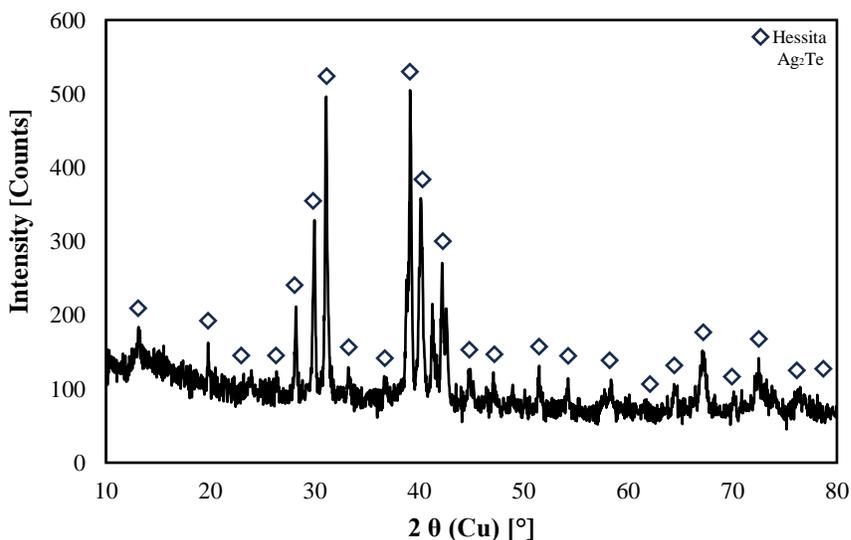


Figura 15. DRX obtenido de los sólidos del tratamiento con H_2O_2 a pH 10.5 ajustado con NaOH.

Se realizó otro tratamiento oxidativo en condiciones ácidas ($\text{pH} = 3$) ajustado con HCl . Se utilizaron 50 mg de especie sintética (Ag_2Te). En el reactor enchaquetado se añadió peróxido de hidrógeno en una concentración 0.6 M (0.7 ml de peróxido al 30% en 100 ml de solución), manteniendo una temperatura controlada de 25°C y una velocidad de agitación de 350 rpm durante 3 horas. En estas condiciones, el ORP inicial fue de 619.35 mV después de añadir el oxidante aumentando muy ligeramente en las 3 horas de la prueba (de 619 mV a 689 mV) (Figura 16).

En cuanto a la disolución de la plata, se observó un valor máximo del 5.72% en la primera media hora; sin embargo, después de unos minutos la plata disuelta disminuyó significativamente, alcanzando el 2.5% en la primera hora y bajando ligeramente a 1.87% a las tres horas. Esta reprecipitación de la plata podría explicarse por la adición del ácido clorhídrico. Al haber iones cloro en solución (del ácido clorhídrico), y al haber también plata en solución, podría haber formación del cloruro de plata (AgCl) sólido que precipita en la solución, sin embargo, al ser tan poca la plata que puede haber en solución, es muy poco probable que este compuesto pueda ser detectado por difracción de rayos X.

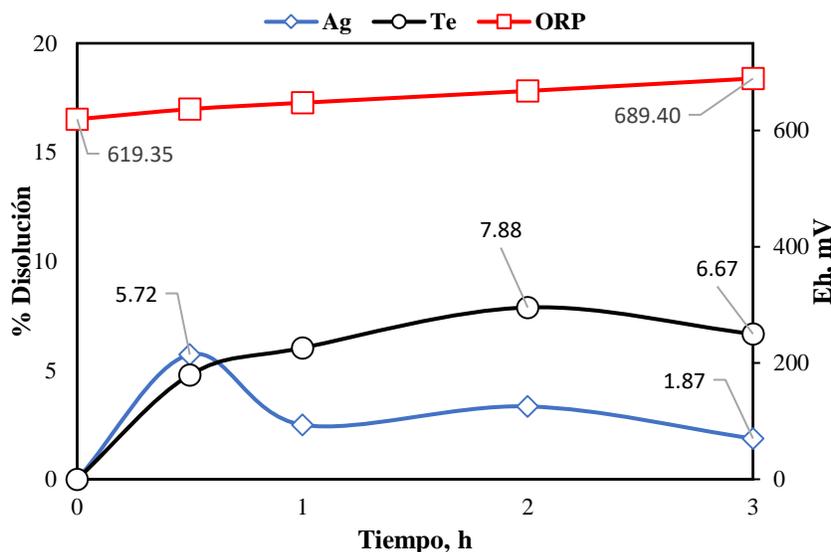


Figura 16. Perfil de Ag y Te disuelto para la oxidación del telururo de plata con peróxido de hidrógeno a $\text{pH} 3$ ajustado con HCl .

En el caso del telurio, la disolución aumentó durante las primeras dos horas, alcanzando un máximo del 7.88%, manteniéndose constante durante media hora y luego disminuyendo a 6.67% a las tres horas, debido probablemente a la precipitación del telurio como dióxido de telurio (TeO_2).

La Figura 17 muestra un difractograma de los sólidos finales después de la oxidación del telururo de plata a pH 3 ajustado con ácido clorhídrico. Como en el caso anterior, de la oxidación a pH alcalino, no hay ningún cambio en las fases presentes y puede asumirse que el sólido remanente sigue siendo telururo de plata.

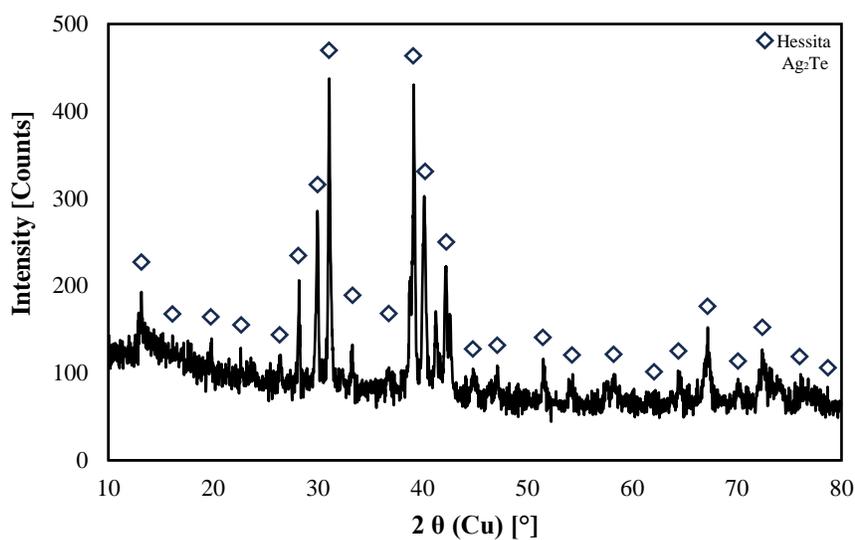


Figura 17. DRX obtenido de los sólidos del tratamiento con H_2O_2 a pH 3 ajustado con HCl.

El perfil de los metales disueltos para el caso de los experimentos realizados a pH 3 utilizando ácido sulfúrico puede verse en la Figura 18. Como en los otros casos, la temperatura se mantuvo controlada a 25°C y la velocidad de agitación fue de 350 rpm durante 3 horas.

La gráfica ilustra el perfil de disolución de plata y telurio, y el potencial redox (Eh, mV) en función del tiempo. El potencial redox comenzó en 587.75 mV después de añadir el oxidante,

incrementó a 624.15 mV a la media hora y se mantuvo relativamente constante durante el resto del experimento, alcanzando 640.80 mV a las 3 horas.

Para la plata, la máxima disolución se alcanzó en la primera media hora con un 2.68%, manteniéndose relativamente constante y disminuyendo ligeramente a 2.19% al término del experimento. En cuanto a la disolución del telurio, su disolución incrementó hasta alcanzar un máximo de 7.38% en la primera media hora, para posteriormente disminuir con el tiempo hasta llegar a cero al final de las 3 horas. Tanto en el caso de la plata como en el del telurio las disoluciones fueron muy bajas.

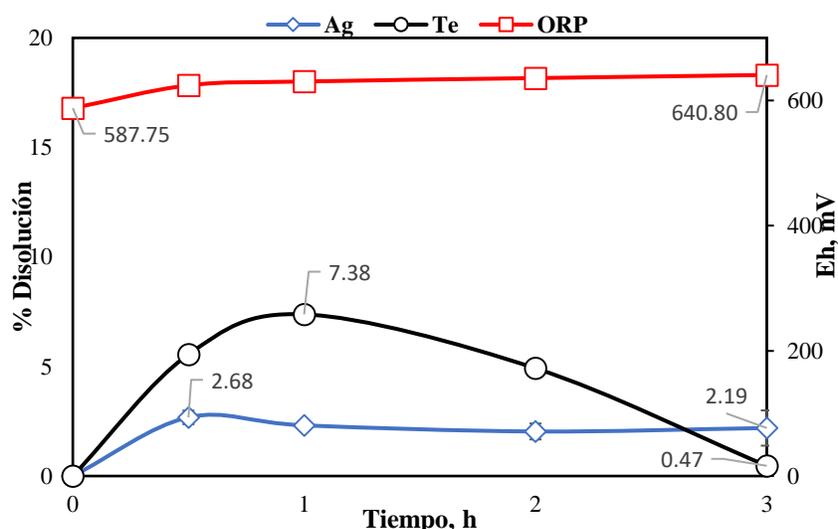


Figura 18. Perfil de Ag y Te disuelto para la oxidación del telururo de plata con peróxido de hidrógeno pH 3 ajustado con H_2SO_4 .

La Figura 19 muestra los resultados obtenidos al utilizar ácido nítrico para ajustar el pH. Como en los casos anteriores se empleó un reactor enchaquetado al que se añadió el peróxido de hidrógeno, manteniendo una temperatura controlada de 25°C y una velocidad de agitación de 350 rpm durante 3 horas.

La gráfica presenta el perfil de disolución y el ORP (Eh, mV) en función del tiempo. El ORP comenzó en 570.05 mV después de añadir el oxidante, aumentando ligeramente con el tiempo hasta alcanzar 650.85 mV a las 3 horas.

En cuanto a la disolución del telurio, se alcanzó un máximo del 5.12%. Después de una hora, el porcentaje de disolución disminuyó a 1.28% a las dos horas, pero a las 2.5 horas, a medida que el ORP aumentaba, la disolución del telurio también incrementó hasta llegar al 4%. Respecto a la disolución de la plata, esta alcanzó un máximo del 1.02% en la primera media hora, manteniéndose constante durante las 3 horas del experimento, y disminuyendo ligeramente a 0.80%. Se puede concluir que, al utilizar ácido nítrico, el telururo de plata no se disuelve significativamente, a pesar del aumento en el potencial de oxidación-reducción (ORP). Por lo tanto, en comparación con los otros experimentos, este experimento en el que se utilizó ácido nítrico produjo los resultados menos satisfactorios.

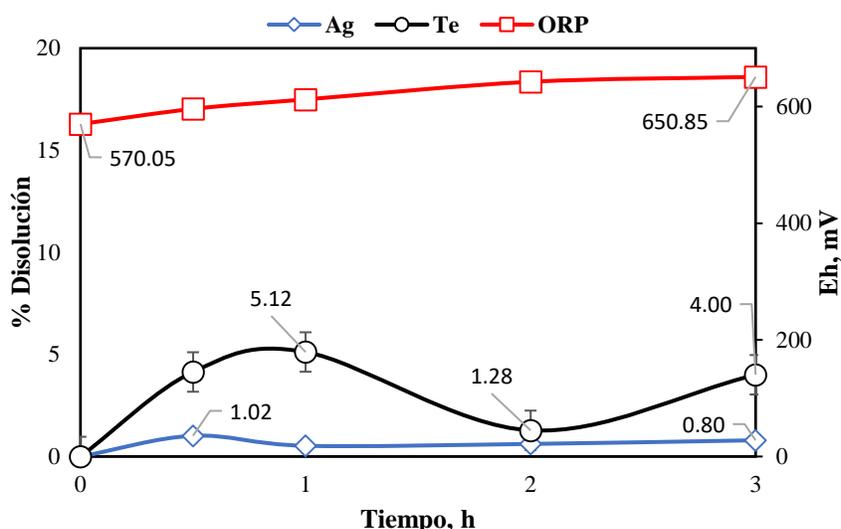


Figura 19. Perfil de Ag y Te disuelto para la oxidación del telururo de plata con peróxido de hidrógeno a pH 3 ajustado con HNO₃.

b) Cianuración del mineral pretratado Ag₂Te con H₂O₂ en ambiente alcalino

Una manera de evaluar si el tratamiento oxidativo está rompiendo el enlace de la plata con el telurio es hacer una cianuración. Naturalmente el telururo de plata no puede ser disuelto por el cianuro, a menos que algún proceso oxidante haya roto el enlace plata-telurio. Se llevó a cabo la cianuración del tratamiento oxidativo descrito en la Figura 14. Este experimento se eligió porque se obtuvieron los mejores porcentajes de disolución de plata (13.57%) y telurio

(3.93%). El trabajo se realizó en condiciones alcalinas, ajustando el pH a 10.5 con NaOH, y con una concentración de cianuro libre de 1500 ppm.

La especie sintética pretratada con H_2O_2 fue secada y filtrada, obteniendo el mineral seco y la solución libre de sólidos. El mineral seco se utilizó para el experimento añadiéndolo en un reactor enchaquetado de 120 ml, con 100 ml de agua desionizada, ajustando el pH a 11 con NaOH. Se añadió un exceso de cianuro de 1500 ppm CN^- y el experimento duró 3 horas con una velocidad de agitación de 350 rpm.

Los resultados se presentan en la Figura 20, mostrando la evolución del contenido de plata y telurio disueltos en función del tiempo, junto con el perfil del potencial redox.

El potencial redox comenzó en 168.55 mV tras añadir el cianuro, disminuyendo como era de esperar dado que el cianuro es un agente reductor, alcanzando 61.75 mV a la media hora y aumentando ligeramente a 99.05 mV a las 3 horas.

Una observación importante que nos presenta esta gráfica es que después de la primera media hora, tanto el potencial redox como la disolución de plata y telurio aumentan. Sin embargo, es importante destacar que el porcentaje de disolución de ambos elementos permanece bajo, con una máxima disolución de plata de 1.73% y de telurio de 0.78%. Esto significa que prácticamente no se detectaron especies en solución, lo que respalda la conclusión de que el enlace químico en el Ag_2Te no se rompió durante este proceso, confirmando la estabilidad del compuesto frente a la cianuración utilizada.

Estos resultados de la cianuración corroboran el hecho de que no existe plata metálica o cloruro de plata como producto de la oxidación con peróxido, porque de haber estado presentes se habrían disuelto en el cianuro, aunque no se hubieran disuelto en el proceso de oxidación.

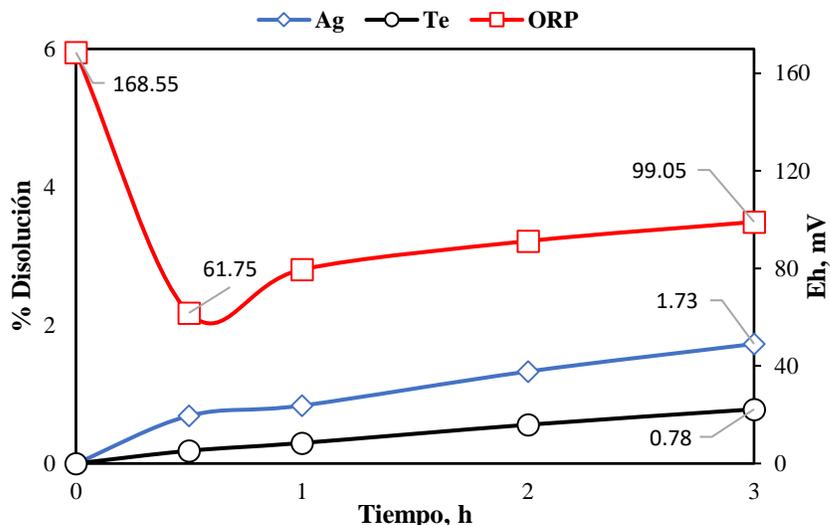


Figura 20. Disolución de Ag y Te en la cianuración del telururo de plata oxidado con H_2O_2 .

Como puede observarse, en ninguno de los casos evaluados de este pretratamiento utilizando peróxido de hidrógeno se puede disolver la plata o el telurio a niveles interesantes. Un trabajo previo con otro oxidante, el hipoclorito de sodio (Alvarez-Martínez, 2023), ha permitido demostrar que se puede recuperar hasta el 50% del telurio contenido en el telururo de plata, por lo que, a las condiciones evaluadas en este trabajo, con el peróxido de hidrógeno no se puede igualar estos resultados, al menos con la concentración de peróxido de hidrógeno utilizada.

c) Medición de potencial redox en solución con adiciones consecutivas de H_2O_2 , sin mineral en ambiente alcalino y ácido

Se planteó una hipótesis adicional sobre los bajos porcentajes de disolución observados en los experimentos previos, sugiriendo que la concentración de H_2O_2 podría ser insuficiente para alcanzar niveles significativos de potencial redox. Con el propósito de investigar esta posibilidad, se llevaron a cabo experimentos adicionales sin sólidos. Se explorará el efecto que tiene en el potencial redox de la solución adiciones repetidas de peróxido. Si se encuentra que el potencial oxidante incrementa de manera apreciable se podrían hacer más pruebas de oxidación de telururo de plata con mayores concentraciones de peróxido de hidrógeno.

Los resultados de todos los experimentos realizados con H_2O_2 en presencia de diferentes ácidos y en condiciones alcalinas mostraron un potencial redox inferior en comparación con un estudio de ORP realizado con $NaClO$, que alcanzó aproximadamente 850 mV. Esto llevó a la realización de pruebas más detalladas, implementando un enfoque específico en un reactor enchaquetado de 120 ml. En este reactor se agregaron 100 mL de agua desionizada, se ajustó el pH deseado (10.5 o 3) y se realizaron adiciones de 0.7 ml de peróxido de hidrógeno al 30% cada 15 minutos durante un período de 1 hora. Durante este proceso, se registró el potencial redox de la solución y el pH. Es importante destacar que estas pruebas se llevaron a cabo sin mineral ni especie sintética, en condiciones tanto alcalinas como ácidas para obtener una comprensión completa del comportamiento del sistema.

El comportamiento del ORP en un ambiente alcalino se muestra en la Figura 21, donde se observa que comenzó en 362.5 mV después de la adición inicial peróxido, y se mantuvo relativamente constante durante los primeros 15 minutos. A medida que se agregaba más oxidante cada 15 minutos y transcurría el tiempo, el potencial redox aumenta, pero muy ligeramente. Considerando los mV desde el inicio y los mV alcanzados al final de los 60 minutos (384.7), se registró un aumento total del ORP de 22.2 mV, por lo que se considera que adiciones sucesivas de peróxido a pH alcalino no mejorarán la oxidación del telururo de plata.

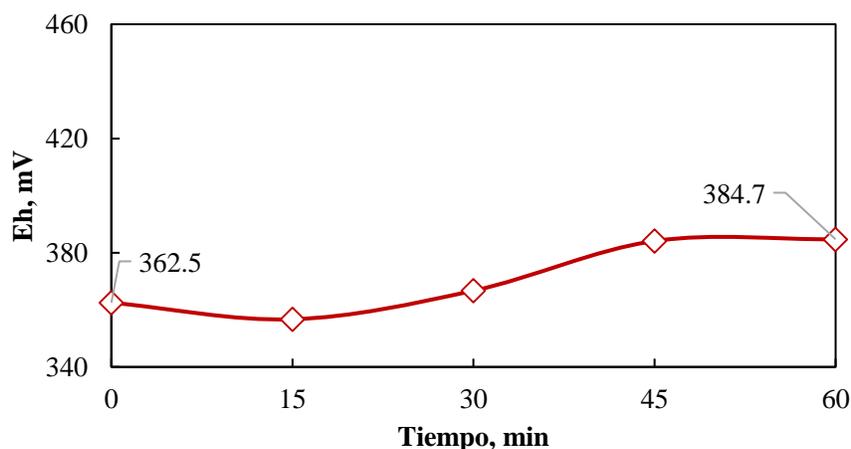


Figura 21. Comportamiento de ORP con adiciones consecutivas de H_2O_2 a pH 10.5.

En la Figura 22 se muestra el perfil de ORP (Eh, mV) contra tiempo (min), donde se ven reflejados los tres diferentes ácidos utilizados (H_2SO_4 , HNO_3 y HCl) para ajustar el pH a 3.

Para el análisis del experimento ajustando el pH con ácido sulfúrico (H_2SO_4), se añadieron inicialmente 0.7 ml de peróxido de hidrógeno a 100 ml de agua (lo que daría una concentración inicial de 0.6 M de peróxido), observándose un valor de ORP a 362.5 mV. La misma concentración de oxidante que se agregó inicialmente también fue agregada cada 15 minutos durante 1 hora y se puede observar que después de la media hora el potencial oxidante de la solución varía muy poco, hasta alcanzar los 395.9 mV a los 60 minutos de experimentación. Con este ácido, se logró un incremento de únicamente 33.4 mV.

Cuando se utilizó ácido nítrico (HNO_3) para ajustar el pH, se añadió inicialmente 0.6 M de H_2O_2 , observándose un aumento progresivo del ORP a lo largo del tiempo. Al agregar el oxidante cada 15 minutos (misma concentración inicial), se obtuvo un ORP final de 423.65 mV al cabo de 60 minutos, con un incremento total de 61.15 mV en el potencial oxidante.

Al utilizar ácido clorhídrico (HCl), se obtuvo un ORP de 362.5 mV tras la primera adición del peróxido. Después de unos minutos, el ORP disminuyó a 349.4 mV, probablemente debido a que el cloro actuó como agente consumidor del H_2O_2 . Posteriormente, al añadir nuevamente la misma concentración de oxidante, el potencial oxidante comenzó a aumentar con el tiempo. Al final de los 60 minutos, el ORP alcanzó 424.9 mV, logrando un aumento total de 62.4 mV.

Estos análisis en ambientes ácido y alcalino permitieron evaluar directamente la efectividad de la concentración de H_2O_2 en la capacidad del sistema para alcanzar potenciales redox más elevados y determinar en qué ambiente sería más efectivo trabajar. Se descartó por completo trabajar en ambiente alcalino debido a sus bajos potenciales redox, que aumentaron solamente 22.2 mV, en comparación con el aumento del ORP en ambiente ácido.

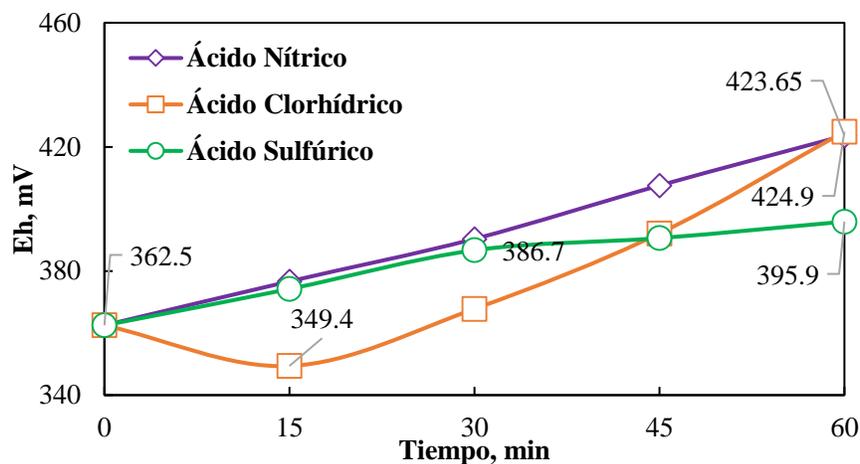


Figura 22. Comportamiento de ORP a pH 3 ajustado con adiciones consecutivas de H_2O_2 .

Para la siguiente etapa experimental se optó por trabajar en ambiente ácido ajustando el pH con HCl, ya que fue el más efectivo de todos los ácidos, logrando un incremento de 62.4 mV. Los otros dos ácidos presentaron potenciales de oxidación menores. Se propuso para la siguiente serie de experimentos medir el oxígeno disuelto en el sistema, ajustando el pH solamente con HCl, antes de descartar por completo la posibilidad de considerar el H_2O_2 como un oxidante para romper el enlace químico en minerales refractarios como el Ag_2Te .

d) Medición de ORP y O_2 disuelto en solución con H_2O_2 , sin mineral, a pH=3 con HCl

En la Figura 23 se presenta una lectura inicial de oxígeno disuelto con una concentración de 8.64, un potencial de oxidación-reducción de 523.6 mV y un pH= 3.55 (ajustado con HCl). Posteriormente, se realizó una adición única de 0.7 ml de peróxido de hidrógeno (al 30%) en los 100 ml de solución (para dar una concentración 0.6 M), y se obtuvieron los siguientes resultados.

En el primer minuto, el ORP aumentó a 545.2 mV y, con el transcurso del tiempo, continuó incrementándose significativamente hasta alcanzar 593.2 mV a los 30 minutos. En total, el potencial oxidante tuvo un aumento de 69.6 mV.

Durante los 30 minutos del experimento, la concentración de O_2 se mantuvo relativamente constante, alcanzando un valor de 8.81 mg/L al final del periodo experimental, en cuanto al pH también se mantuvo constante durante los 30 minutos del experimento.

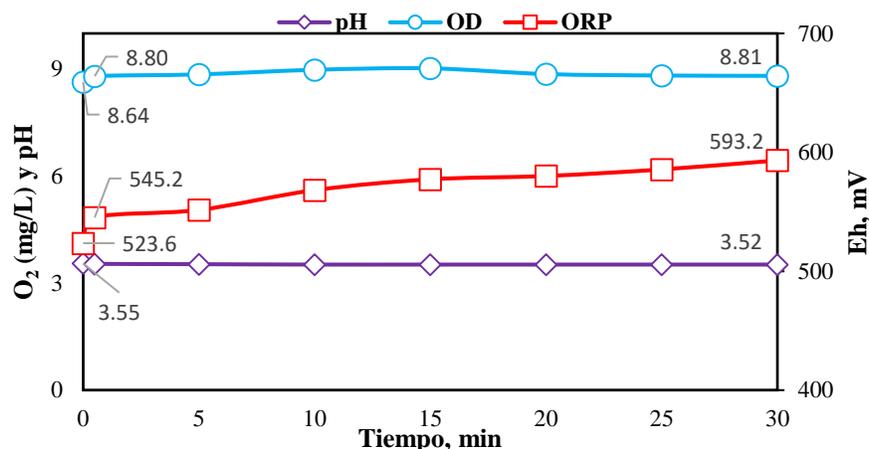


Figura 23. Comportamiento de ORP y O_2 en ambiente ácido con H_2O_2 .

Estos hallazgos sugieren que la concentración del oxígeno disuelto y el potencial de oxidación son insuficientes para que el oxidante (H_2O_2) pueda disolver por completo las especies de interés. Por lo tanto, se evaluarán otros oxidantes para evaluar su eficacia y seleccionar el más adecuado para tratamiento oxidativo con el telururo de plata (Ag_2Te).

e) Medición de ORP y O_2 dis sin mineral, para diferentes oxidantes

El propósito de estas pruebas fue identificar el oxidante más efectivo en términos de potencial de oxidación-reducción (ORP) y concentración de oxígeno disuelto (O_2). El experimento se realizó en un reactor enchaquetado de 120 ml, al que se añadieron 100 ml de agua desionizada y la cantidad calculada del oxidante a evaluar. Durante un período de 30 minutos, se controló la temperatura a $25^\circ C$ y se monitorearon las lecturas de ORP y la concentración de O_2 cada 5 minutos con cuatro oxidantes diferentes ($KMnO_4$, $K_2S_2O_8$, $NaClO$ y $HClO_4$) a $pH= 3$ (ajustado con HCl). Se registraron las lecturas iniciales de pH, ORP y O_2 sin la presencia de oxidantes. Segundos después, se añadió la concentración deseada de cada oxidante y se tomaron las lecturas correspondientes de cada variable.

Permanganato de potasio (KMnO₄)

Para el primer oxidante, se registró una lectura inicial de las variables a medir (ORP, O₂ y pH) (Figura 24). Pocos segundos después se añadió la cantidad de permanganato para tener 0.6 M de permanganato de potasio (KMnO₄) y tomándose las lecturas correspondientes de cada variable cada 5 minutos.

La lectura inicial de ORP fue de 506.5 mV sin la presencia del oxidante. Segundos después de agregar KMnO₄, el potencial aumentó a 896.5 mV, un incremento de 390 mV. Con el transcurso del tiempo, el potencial oxidante siguió aumentando hasta alcanzar 948.9 mV, logrando un aumento total de 442.4 mV.

Al finalizar los 30 minutos de la prueba, el oxidante aún no se había disuelto completamente, lo que indica que la pendiente del potencial oxidante probablemente continuaría aumentando a medida que las partículas de KMnO₄ siguieran reaccionando y generando oxígeno.

El pH inicial, ajustado con HCl, fue de 3.4. Después de la adición del oxidante, aumentó hasta 8.64, convirtiendo la solución en ligeramente básica. Durante los 30 minutos del experimento, el pH se mantuvo estable, reduciéndose levemente hasta 8.50.

En cuanto al oxígeno disuelto, se inició con una concentración de 7.21 mg/L de O₂. Segundos después de agregar el oxidante, aumentó a 7.26 mg/L. Durante los primeros 5 minutos, la concentración de oxígeno disuelto incrementó solo 1.11 mg/L, alcanzando 8.32 mg/L. Posteriormente, la concentración de oxígeno se mantuvo constante, disminuyendo gradualmente hasta llegar a 8.50 mg/L al final de los 30 minutos.

Cabe aclarar que la concentración de oxígeno disuelto en el agua puede variar dependiendo de factores como la temperatura, presión, y salinidad. A temperatura y presión estándar (25°C y 1 atm), y en contacto con el aire, el agua tiene aproximadamente 8.26 mg/L de oxígeno disuelto. Esta cifra puede cambiar en función de las condiciones específicas.

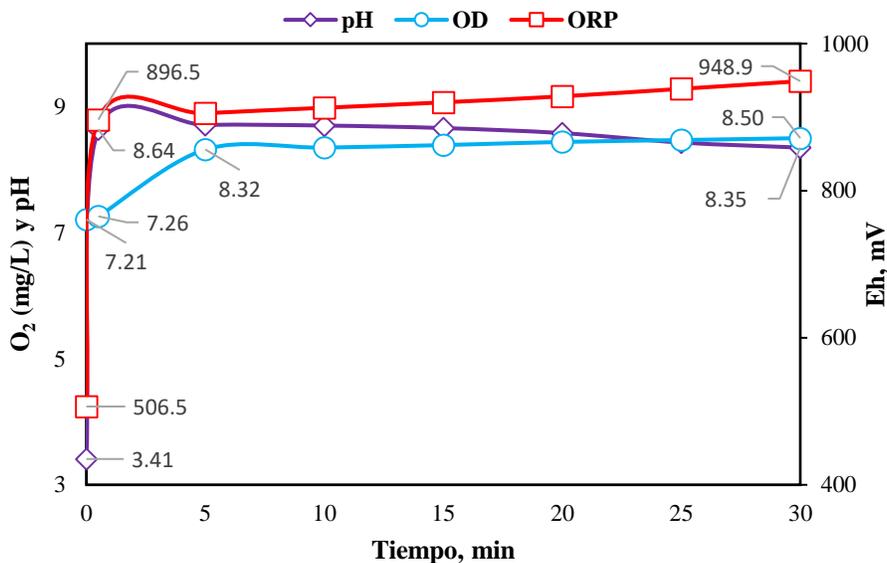


Figura 24. Comportamiento de ORP y O₂ con oxidante (KMnO₄).

Persulfato de potasio (K₂S₂O₈)

Se utilizó persulfato de potasio (K₂S₂O₈) como segundo oxidante. Primeramente, se agregaron 0.6 M de K₂S₂O₈, pero no se disolvió por completo. Después se realizó otra prueba agregando menos oxidante 0.15 M de K₂S₂O₈, como se muestra en la Figura 25. Las lecturas iniciales registraron un ORP de 549.2 mV. Inmediatamente después de añadir 0.15 M de persulfato de potasio, el ORP aumentó 393.7 mV, alcanzando 942.9 mV en el primer minuto. Con el transcurso del tiempo, el potencial oxidante continuó incrementándose, llegando a 1069.5 mV al cabo de 30 minutos. Utilizando este oxidante, el voltaje aumentó un total de 520.3 mV.

La concentración inicial de O₂ fue de 8.75 mg/L. Pocos segundos después de añadir el oxidante, la concentración aumentó a 12.83 mg/L. A los 5 minutos, la concentración de oxígeno disuelto disminuyó a 12 mg/L y se mantuvo constante esa concentración hasta los 15 minutos. Sin embargo, después de los 15 minutos, la concentración comenzó a aumentar, alcanzando 13.29 mg/L al final de los 30 minutos. Esto demuestra que el persulfato de potasio genera una concentración significativamente mayor de oxígeno disuelto en comparación con el agua (8.26 mg/L a 25°C y 1 atm) y con otros oxidantes evaluados en este proyecto de

investigación. Se puede observar que la pendiente de la concentración de oxígeno disuelto continúa en aumento. Si el experimento se hubiera prolongado, es probable que la concentración de oxígeno disuelto y el potencial redox hubieran seguido incrementándose.

El pH inicial fue de 3.54, ajustado con HCl. Segundos después de añadir el oxidante, el pH disminuyó a 2.95. Algunos oxidantes, al iniciar su reacción con ácidos fuertes como el HCl, pueden consumir protones (H^+) de la solución, lo que reduce ligeramente la acidez y, por ende, disminuye el pH. Al término de los 30 minutos, el pH bajó aún más, llegando a 2.87.

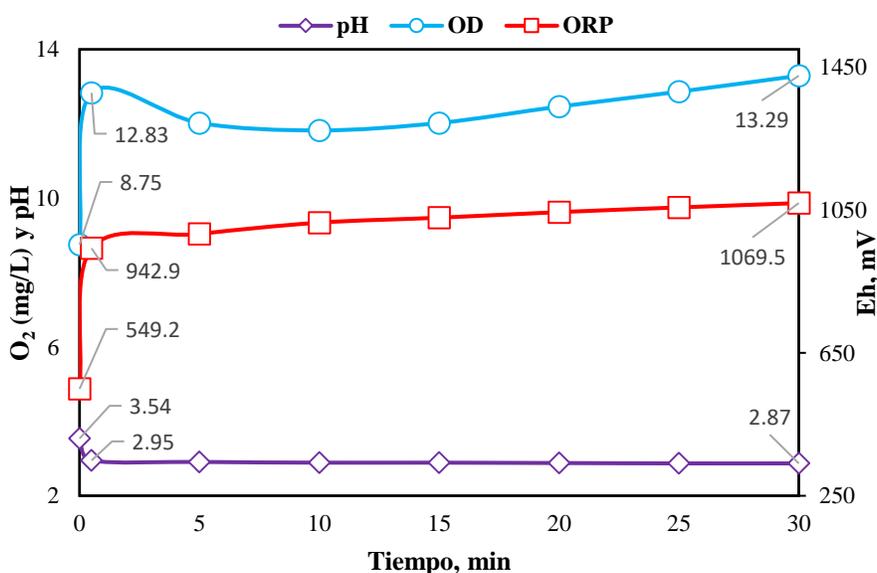


Figura 25. Comportamiento de ORP y O_2 con oxidante ($K_2S_2O_8$).

Hipoclorito de sodio ($NaClO$)

Se evaluó el comportamiento del hipoclorito de sodio a un pH inicial de 3.38 (ajustado con HCl), un ORP de 731.1 y la concentración de O_2 de 9.22. Posteriormente, se adicionó la cantidad de hipoclorito de sodio necesaria para tener una concentración de 0.6 M. La Figura 26 describe el comportamiento de esta prueba.

El pH aumentó hasta 11.37 debido a que la adición del oxidante podría haber generado productos secundarios que son básicos en naturaleza, como es el caso del hipoclorito de sodio, elevando así el pH del medio. Además, algunos oxidantes, al reaccionar con el medio ácido inicial (pH 3), pueden consumir protones (H^+), lo cual también contribuye a elevar el pH.

En el caso del ORP, se incrementó a 787.3 mV, mostrando una tendencia ascendente en el potencial de oxidación y alcanzando 872.9 mV al finalizar los 30 minutos. El aumento total del potencial redox fue de 141.8 mV.

La concentración de O_2 disminuyó muy ligeramente a 9.10 mg/L y al término de la media hora disminuyó hasta 9.04 mg/L; se puede considerar que permanece constante, lo que no favorecería los procesos de oxidación que requieren de oxígeno disuelto en la solución.

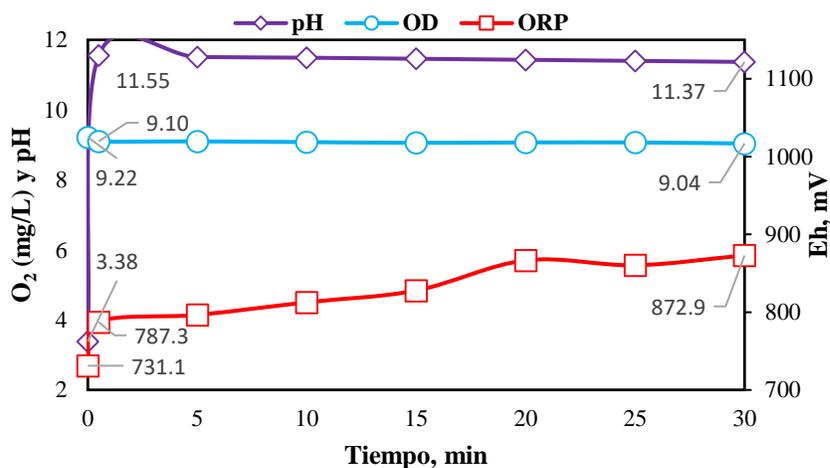


Figura 26. Comportamiento de ORP y O_2 con oxidante ($NaClO$).

Ácido perclórico ($HClO_4$)

Como último oxidante se evaluó el ácido perclórico, y los perfiles obtenidos se presentan en la Figura 27. Las condiciones iniciales del experimento fueron un ORP de 725.6 mV, una

concentración de O_2 de 8.64 mg/L y un pH de 3.55 ajustado con ácido clorhídrico. Posteriormente, se procedió a introducir ácido perclórico para tener una concentración de 0.6 M de este oxidante a la solución. Se observó que el potencial de oxidación aumentó a 844.8 mV, manteniendo una pendiente constante de incremento al término de 30 minutos. En total, el potencial redox aumentó en 119.2 mV a lo largo del experimento.

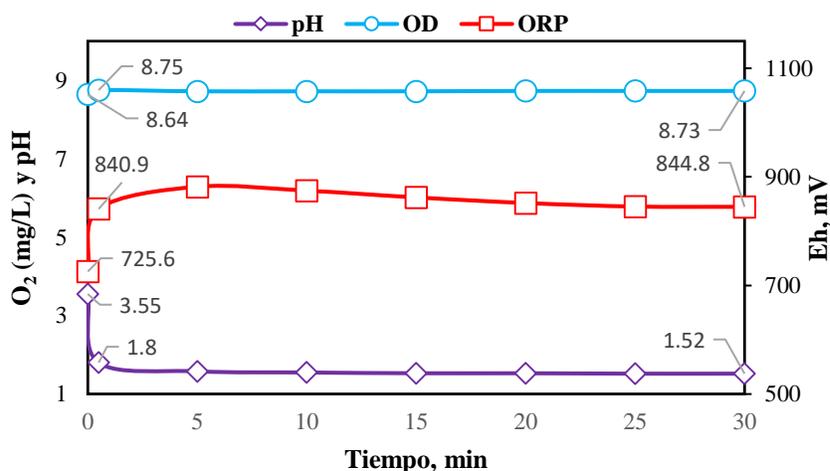


Figura 27. Comportamiento de ORP y O_2 con oxidante ($HClO_4$).

El pH tuvo una disminución de 1.8 a 1.52. El descenso continuo del pH después de añadir ácido perclórico sugiere que este oxidante está teniendo un efecto sobre la acidez del medio, generando un ambiente ácido, lo que podría influir en la lixiviación y en las reacciones químicas que ocurren en ella.

La concentración del oxígeno disuelto permanece prácticamente constante, iniciando a 8.64 ppm, aumentando con la adición del oxidante a 8.75 mg/L y al término de la media hora quedando en 8.73 mg/L. El valor de pH también permanece prácticamente constante durante los 30 minutos de medición.

Los experimentos anteriores permitieron evaluar la capacidad de los oxidantes en cuanto al incremento del potencial redox de la solución y a la generación de oxígeno disuelto. Se evaluaron cuatro oxidantes (KMnO_4 , $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$, NaClO y HClO_4), a una concentración 0.6 M. Un resumen de lo observado con los cuatro oxidantes se presenta a continuación:

1. KMnO_4 (Permanganato de potasio):

- Aumentó el ORP significativamente de 506.5 mV a 948.9 mV.
- Incrementó la concentración de O_2 disuelto de 7.71 mg/L a 8.32 mg/L, con una leve disminución posterior.
- Elevó el pH de 3.4 a 8.64.
- No se disolvió completamente a una concentración de 0.6 M..

2. $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ (Persulfato de potasio):

- Experimentó un aumento rápido y considerable en el ORP de 549.2 mV a 1069.5 mV.
- Incrementó la concentración de O_2 disuelto de 8.75 mg/L a 13.29 mg/L.
- Redujo el pH de 3.54 a 2.87.
- No se disolvió completamente a una concentración de 0.6 M.

3. NaClO (Hipoclorito de sodio):

- Elevó el ORP de 731.1 mV a 872.9 mV.
- Incrementó el pH de 3.38 a 11.37.
- La concentración de O_2 disuelto permanece prácticamente constante.

4. HClO_4 (Ácido perclórico):

- Aumentó el ORP de 725.6 mV a 844.8 mV.
- Redujo el pH de 3.55 a 1.52.
- La concentración de O_2 disuelto permanece prácticamente constante.

Por lo tanto, se determinó que el persulfato de potasio ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) fue el oxidante más efectivo en comparación con otros tipos de oxidantes estudiados (KMnO_4 , NaClO y HClO_4), debido

al significativo aumento del oxígeno disuelto (O_2) y del potencial oxidante. Además de que su uso implica un pH bajo, lo que puede favorecer la oxidación de los telururos de oro /o plata.

En el próximo análisis oxidativo, se empleará este oxidante ($K_2S_2O_8$) con la expectativa de lograr un impacto más significativo en el proceso de disolución de las especies de interés tanto de la especie sintética (Ag_2Te) y del mineral de Sonora.

f) Estudio de la oxidación de telururo de plata sintético con persulfato de potasio

Para la siguiente fase de oxidación de telururo de plata sintético se utilizará una concentración de 0.15 M (se utilizará menos de la concentración de 0.6 M evaluada para otros oxidantes debido a la menor solubilidad del persulfato de potasio) a un pH de 3 mediante la adición de ácido clorhídrico. A estas condiciones se tendrá una máxima concentración de oxígeno disuelto y un mayor poder oxidante de la solución. Una vez ajustado el pH de 100 mL de agua desionizada y una vez adicionado el oxidante, se agregaron 50 miligramos de Ag_2Te .

La Figura 28 muestra el perfil de las variables durante la prueba. Tras añadir el persulfato de potasio, el ORP aumenta rápidamente la primera media hora a 791.3 mV, lo que indica que se está introduciendo un fuerte agente oxidante en la solución.

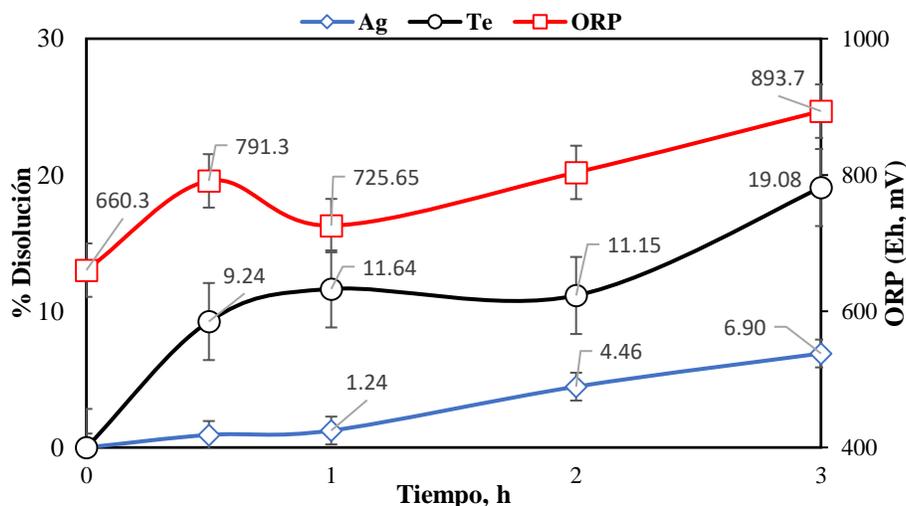


Figura 28. Perfil de Ag y Te disuelto de la oxidación del telururo de plata con persulfato de potasio con una concentración de 4 g en 100 mL de solución (0.15 M) pH 3 ajustado con HCl.

Después del aumento inicial, el ORP disminuye ligeramente a 725.65 mV. Esto podría significar que, inicialmente, se ha consumido una parte significativa del persulfato de potasio por las reacciones.

Después de la primera hora, el ORP comienza a aumentar de nuevo, lo que sugiere que las reacciones de oxidación continúan progresando. Al final de las 3 horas, el ORP queda en 893.7 mV, indicando que la solución sigue siendo muy oxidante.

Para la disolución de plata y telurio, se tiene que la primera hora la plata se disolvió 1.24% y telurio 11.64%. El aumento inicial en la disolución del telurio es mayor que el de la plata, indicando que, aunque se está rompiendo el enlace plata-telurio, la plata no se encuentra en solución a estas condiciones del experimento. La concentración de plata empieza a incrementarse a partir de la primera hora hasta llegar a un 6.9% de disolución al término de las 3 horas, aunque sigue siendo menor la disolución que el telurio.

La concentración de telurio a la primera hora es de 9.24 % y se mantiene aproximadamente en los mismos rangos hasta la segunda hora, después de la cual incrementa hasta un 19.08% a las 3 horas. Las pendientes tanto de la plata como del telurio indican que de proseguir la prueba seguiría incrementándose su disolución.

La evolución del ORP y los porcentajes de disolución indican que el persulfato de potasio es un oxidante efectivo que introduce un ambiente altamente oxidante, favoreciendo la disolución del telurio y la plata. El comportamiento del ORP y de los porcentajes de disolución sugieren que hay diferentes fases de reactividad a lo largo del experimento: una fase inicial rápida, una estabilización temporal y una segunda fase de alta reactividad.

Para tratar de determinar la reacción electroquímica que involucra la oxidación del telururo de plata (Ag_2Te) mediante persulfato de potasio ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) a un pH de 3 ajustado con HCl, se identificaron las especies químicas participantes según el diagrama de distribución de especies (Figura 29) y los posibles productos de la reacción. A continuación, se describen las principales etapas de la reacción.

1. Oxidación del Ag_2Te :

El Ag_2Te se oxida en presencia de $K_2S_2O_8$ (un agente oxidante fuerte). El persulfato de potasio se disocia en agua para formar iones potasio y persulfato:



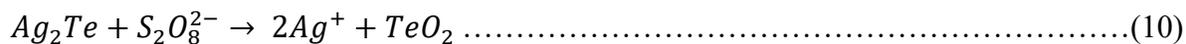
De acuerdo con Dakubo et al., 2012, el persulfato se disocia:



Además, puede generar radicales sulfato (Zhou et al., 2023), los cuales son oxidantes fuertes (que no tenemos manera de cuantificar por el momento):



El telururo de plata se oxida por el persulfato de potasio, formando Ag^+ y compuestos de telurio (que pueden ser H_2TeO_4 o TeO_2). En el caso del dióxido de telurio, éste permanecerá en la solución, en el caso del H_2TeO_4 el telurio está disuelto:



Cabe aclarar que la reacción anterior no está completa ni balanceada, debido a que no tenemos la información necesaria hasta el momento. No se ha identificado la especie final de azufre que se generará del persulfato, probablemente el ion sulfato, ni se ha cuantificado con precisión el cambio de pH. Un trabajo posterior a este podrá permitirnos proponer una reacción. Por el momento podemos identificar las fases de telurio y de plata que estarán presentes.

2. Formación de otros compuestos:

A pH 3, los protones del HCl podrían favorecer la formación de ácido telúrico (H_2TeO_4):



Los iones Ag^+ formados en la reacción podrían reaccionar con el cloruro del HCl para formar cloruro de plata ($AgCl$) insoluble:



Además, el Ag^+ podría reaccionar con los iones sulfato (SO_4^{2-}) para formar sulfato de plata (Ag_2SO_4), dependiendo de las condiciones de solubilidad:



Al combinar todos los productos y considerando las posibles reacciones entre iones, la reacción general podría ser:

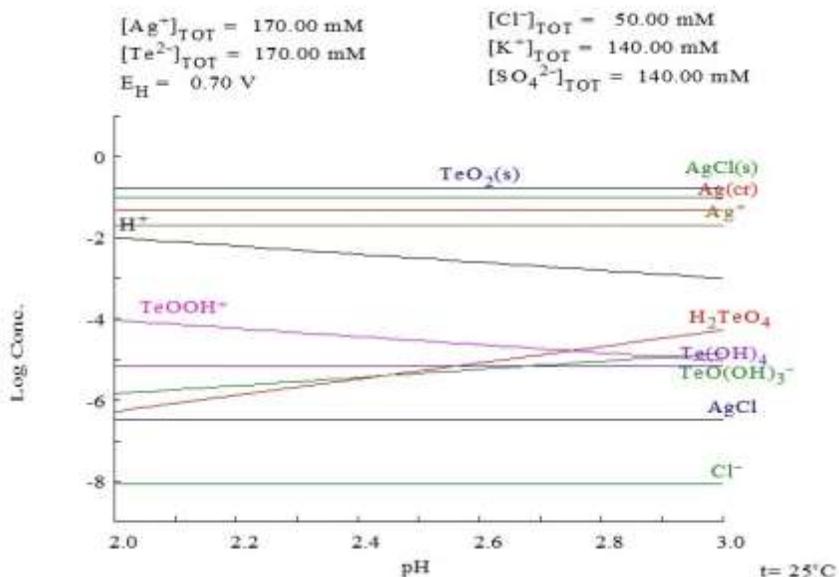
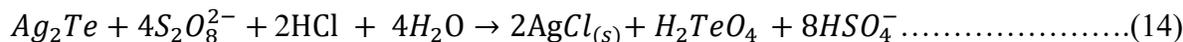


Figura 29. Diagrama de distribución de especies de un sistema $Ag_2Te - K_2S_2O_8 - Cl$

Luego de un estudio sobre las disoluciones de plata y telurio utilizando el oxidante $K_2S_2O_8$, se optó por realizar una prueba sin ajustar el pH con HCl. Además, se decidió modificar el tiempo de reacción a 5 horas, ya que en experimentos anteriores (Figura 28) se notó que prolongar el tiempo de reacción podría aumentar la disolución de la plata y el telurio.

El experimento de lixiviación mostrado en la Figura 30 muestra los perfiles para la prueba con una concentración de persulfato de potasio ($K_2S_2O_8$) de 8 gramos en 200 mililitros de solución (0.15 M), junto con 100 miligramos de Ag_2Te . Los datos obtenidos de este experimento proporcionan información sobre la evolución del potencial de oxidación-reducción (ORP) y las disoluciones de plata (Ag) y telurio (Te). Aquí se explica el significado de estos resultados:

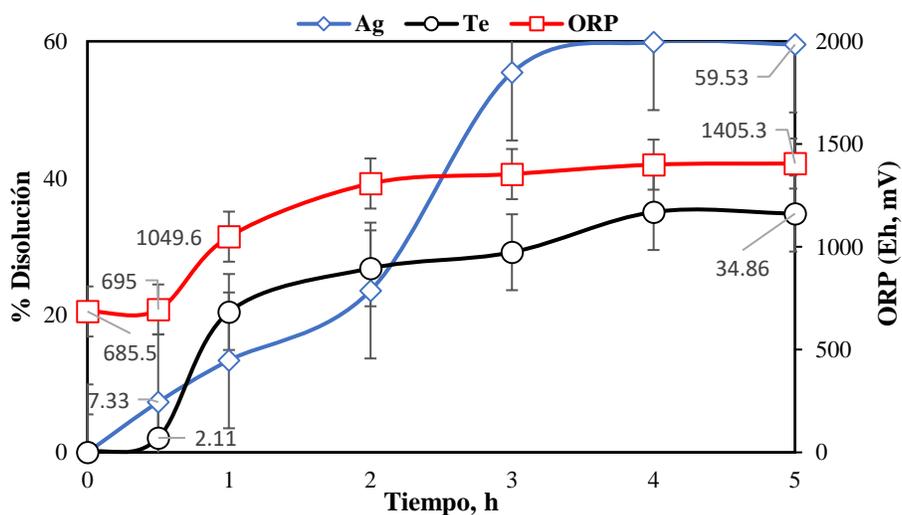


Figura 30. Perfil de Ag y Te disueltos de la oxidación del telururo de plata con persulfato de potasio con una concentración 0.15 M a pH 3 sin adición de ácido.

El ORP inicial fue de 685.5 mV en la primera media hora. Esto indica que alguna reacción está siendo llevada a cabo y que no permite el aumento del ORP. Después, el potencial oxidante subió a 1049.6 mV a la hora, lo que refleja un aumento de la capacidad oxidante de la solución la cual se mantiene hasta el final de las 5 horas.

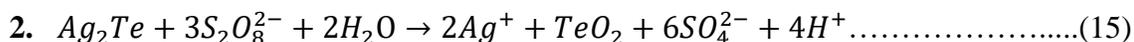
En la primera media hora la disolución de la plata fue de 7.33% y la de telurio 2.11%. La plata muestra una disolución más rápida en la etapa inicial en comparación con el telurio. La disolución de la plata es rápida en las primeras etapas del experimento, aumentando significativamente después de la primera hora y continuando hasta llegar a 59.53 % a las 5 horas. Esto sugiere que el persulfato de potasio es muy efectivo para disolver la plata.

Aunque la disolución del telurio también es mejor que en que en las pruebas con el peróxido de hidrógeno, su velocidad de disolución es inicialmente más lenta en comparación con la plata, pero sigue un patrón similar de aumento continuo. Esto indica que tal vez algo de telurio permanezca en forma sólida como dióxido de telurio (TeO_2).

Se tiene un cambio significativo en la disolución de los metales, ya que se cumplió que, al prolongar el experimento aumentaría continuamente el porcentaje de disolución de la plata y el telurio. Además, no era necesario ajustar el pH con HCl, ya que la adición de persulfato de potasio causaba una disminución automática del pH a 3. Esto simplifica el procedimiento y sugiere que el propio oxidante mantiene el pH ácido de la solución, además de que al no haber iones cloruro, la plata permanece en la solución en vez de precipitar como cloruro de plata.

Para determinar las reacciones electroquímicas involucradas en el tratamiento oxidativo del telururo de plata (Ag_2Te) con persulfato de potasio ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) en condiciones de pH 3, sin adicionar ningún ácido (Figura 30), se toman en cuenta las especies presentes según el diagrama de distribución de especies mostrado en la Figura 31.

1. Oxidación del telururo (Te) a ácido telúrico (H_2TeO_4): El persulfato de potasio actúa como un agente oxidante fuerte, lo que puede oxidar el telururo (Te) en el Ag_2Te a ácido telúrico (H_2TeO_4). Los principales compuestos de esta oxidación pueden describirse con la siguiente ecuación:



Sin embargo, dada la presencia de un pH de 3 (condiciones ácidas), es probable que el ácido telúrico (H_2TeO_4) se protone parcialmente para formar HTeO_4 .

3. Formación de iones plata (Ag^+): Los iones Ag^+ se disolverán en la solución ácida. En condiciones ácidas, el ion plata es estable.

4. Reacciones secundarias del persulfato: El persulfato ($S_2O_8^{2-}$) puede reducirse a sulfato (SO_4^{2-}):



Y en medio ácido:



O bien directamente:



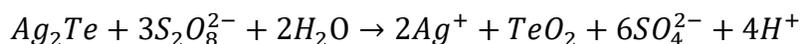
5. Especies de sulfato: En condiciones ácidas (pH 3), el sulfato (SO_4^{2-}) puede protonarse para formar bisulfato (HSO_4^-):



En el sistema, también puede formarse sulfato de potasio (K_2SO_4) debido a la presencia de K^+ y SO_4^{2-} :



La reacción global que se puede proponer por el momento es la Ec. 15 ya mencionada.



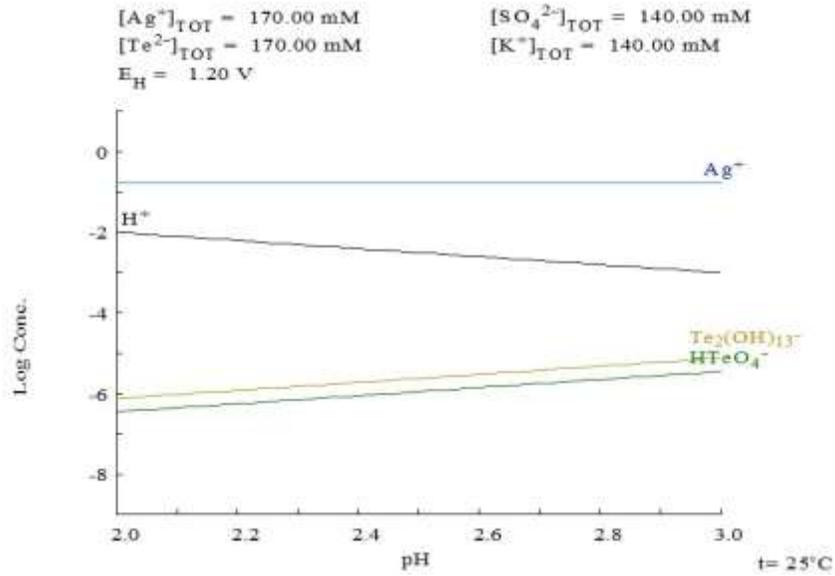


Figura 31. Diagrama de distribución de especies de un sistema $Ag_2Te - K_2S_2O_8$

En la Figura 32 se muestra el perfil de pH y la concentración de oxígeno disuelto del experimento anterior (Figura 30).

Inicialmente, el pH en la solución fue de 5.68, pero luego de agregar el oxidante, descendió a 3.11. En el transcurso de la reacción el pH siguió disminuyendo gradualmente hasta alcanzar un valor de $pH = 1.93$ después de 5 horas. Esto sugiere que se están formando productos ácidos durante las reacciones de lixiviación. Las reacciones de oxidación suelen consumir iones hidroxilo (OH^-), reduciendo el pH. En un medio más ácido, la solubilidad de muchos metales aumenta, facilitando su lixiviación.

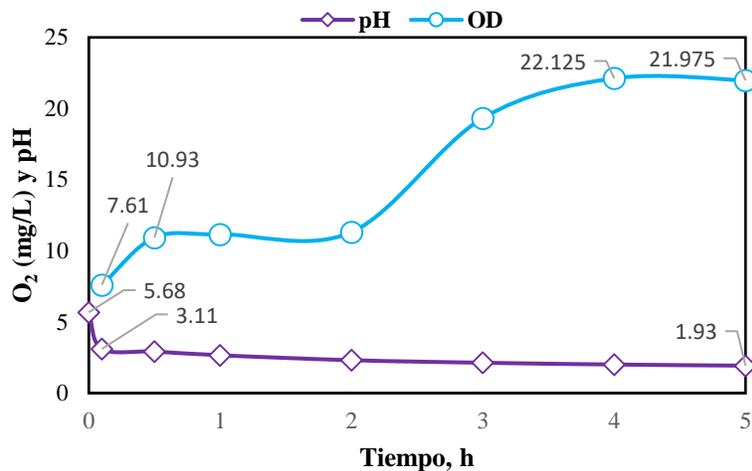


Figura 32. Perfil de pH y oxígeno disuelto de la oxidación del telururo de plata con persulfato de potasio con una concentración de 0.15 M a pH 3 sin adición de ácido.

El persulfato de potasio ($K_2S_2O_8$) es un agente oxidante fuerte que se descompone en presencia de agua y otros reactivos, generando oxígeno. Este proceso libera oxígeno en la solución, lo que explica el aumento del oxígeno disuelto. El aumento significativo del oxígeno disuelto a 10.93% inmediatamente después de añadir el persulfato de potasio, y su continuo incremento hasta 22.12% a las 4 horas, indica que el oxidante está generando oxígeno, lo que facilita las reacciones de oxidación que son cruciales para la disolución de metales como la plata y el telurio.

Dados los resultados interesantes de la disolución de plata y telurio con el persulfato, se caracterizaron los sólidos finales por difracción de rayos X los sólidos finales de la prueba presentada en la Figura 28, después de tratarlo con $K_2S_2O_8$ a pH 3 ajustado con HCl. Los resultados se presentan en la Figura 33 donde se puede identificar la presencia de AgCl, confirmada mediante la carta de referencia 01-085-1355.

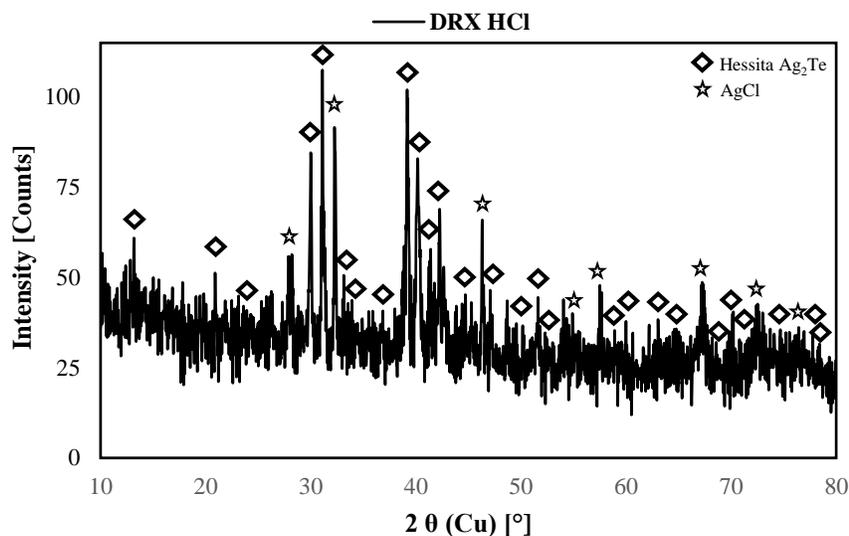


Figura 33. DRX obtenido de los sólidos de la oxidación de Ag_2Te con $K_2S_2O_8$ a pH 3 con HCl.

El AgCl probablemente se formó debido a la reacción del cloruro presente por el ácido clorhídrico con el ion plata liberado durante la disolución del Ag_2Te . Los picos de difracción correspondientes a AgCl son menores que los que corresponden a la matriz sólida (Ag_2Te), sin embargo, se sabe que al menos su concentración será mayor al 5% que es el límite de detección de la técnica. El resto de picos de difracción corresponden a la Hessita (Ag_2Te), confirmada mediante la carta 01-081-1985, marcados con una figura de rombo, y son los más prominentes en el patrón de difracción. Esto indica que el enlace químico del Ag_2Te no se rompió por completo con el tiempo dado a la oxidación. Aunque se logró una disolución significativa, se observa que un porcentaje considerable del Ag_2Te original permanece presente en la muestra, sugiriendo que el tratamiento no fue completamente efectivo. El experimento se realizó utilizando 50 mg de Ag_2Te disuelto en 100 ml de solución con una concentración de 0.15 M de persulfato de potasio a un pH de 3 ajustado con HCl.

Estos mismos resultados de la prueba de la Figura 28 fueron sometidos a un análisis con el microscopio electrónico de barrido (MEB), o SEM por sus siglas en inglés (Scanning Electron Microscope). La Figura 34 muestra la caracterización del residuo sólido mediante esta técnica. En esta imagen, se observa que el sólido está compuesto por Ag, Te, Cl y O, lo

cual indica la formación de cloruro de plata y la presencia de telururo de plata sin reaccionar, confirmando lo obtenido con el análisis por difracción de rayos X.

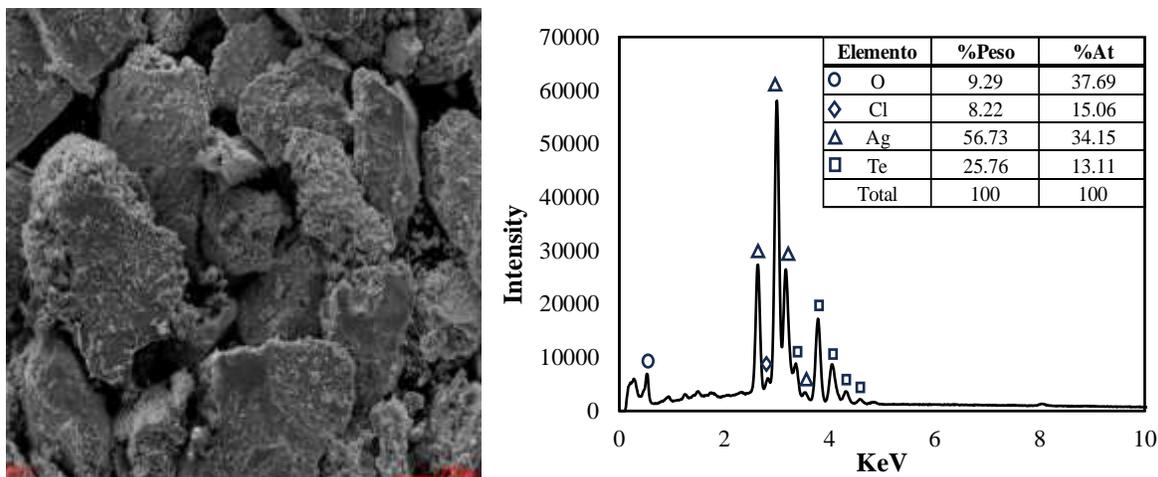


Figura 34. Caracterización de MEB del residuo sólido (500 x) de la prueba de la Figura 26.

7.2 Pruebas con el mineral del Estado de Sonora

El objetivo de la primera parte de este estudio fue identificar las condiciones óptimas para la oxidación del telururo de plata, con el fin de poder aplicar este tratamiento oxidativo a un mineral industrial. Trabajar con una especie sintética permite tener el efecto del oxidante sobre la especie de interés, sin tener la interferencia de otras especies que también podrían reaccionar con el oxidante y modificar los resultados. En esta sección se presentan los resultados obtenidos con el mineral del Estado de Sonora.

Además, se presentan los resultados de la cianuración del mineral pretratado junto con la cianuración del mineral sin tratamiento oxidativo (mineral fresco). Los resultados de esta última servirán como punto de comparación para evaluar la efectividad del pretratamiento, permitiendo determinar el porcentaje de recuperación de metales preciosos tras la ruptura del enlace químico Ag-Te.

a) Cianuración estándar del mineral de Sonora sin pretratamiento

La cianuración de este sin ningún pretratamiento (se le denomina también mineral fresco), se llevó a cabo con el objetivo de determinar el porcentaje de disolución de los metales preciosos que se encuentran en estado libre, es decir, aquellos que no están enlazados químicamente al teluro. Los resultados de esta prueba nos indicarán si este mineral es refractario respecto a la recuperación de oro. El oro y/o plata que se disuelvan en cianuro sin ningún tratamiento previo del mineral corresponderá a los metales preciosos que están en su estado nativo o elemental y que no tienen problemas de recuperación.

Para llevar a cabo esta prueba, se utilizaron 5 gramos del mineral industrial fresco. El mineral fue colocado en un reactor enchaquetado, donde se añadió un exceso de cianuro, específicamente 1500 ppm de CN^- . El experimento se realizó a una temperatura controlada de $25^{\circ}C$, con una agitación de 350 rpm durante un período de 3. El uso de un exceso de cianuro garantiza que haya suficiente reactivo disponible para disolver los metales, mientras que la agitación asegura que el cianuro esté en contacto continuo con la superficie del mineral, facilitando la disolución.

En la Figura 35 se presenta el perfil de disolución de los metales preciosos contenidos en este mineral no tratado. Los resultados indican que se disolvió el 43.98% del oro, el 53.72% de la plata y el 11.58% del teluro, considerándose entonces el mineral como altamente refractario con respecto a la plata, moderadamente refractario considerando la disolución de oro. Estos valores servirán como base para comparar con los resultados de la cianuración realizada al mineral sometido a la oxidación propuesta, y permitirá evaluar la efectividad de la oxidación con persulfato en la liberación de los metales preciosos del teluro y mejorar los procesos de recuperación.

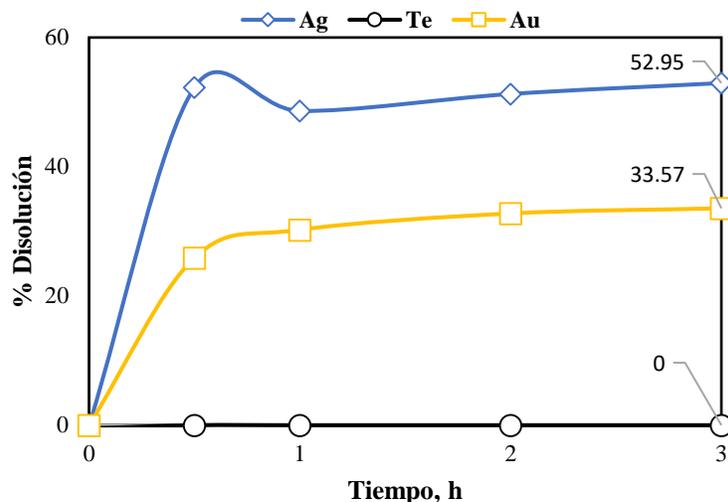


Figura 35. Perfil del Au, Ag y Te disuelto de la cianuración del mineral de Sonora sin tratamiento previo.

b) Oxidación de mineral de Sonora con persulfato de potasio

Las mejores condiciones de oxidación para la especie pura telururo de plata (Ag_2Te) fueron:

- Persulfato de potasio como oxidante ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) a una concentración de 8 g en 200 ml de solución (0.15 M).
- pH de 3, sin la adición de ningún ácido. El valor ácido del pH lo da el persulfato.
- Temperatura de 25°C.
- Agitación magnética de 350 rpm.

Para el caso del mineral, se utilizaron 5 g en 200 ml de la solución 0.15 M de persulfato de potasio a pH 3 (sin adición de ácido). Según el análisis de la composición de este mineral reportada (Rodríguez-Chávez, 2023), el oro, plata y telurio contenidos en esos 5 g de muestra son 0.00190685 g de Au, 0.00007 g de Ag y 0.00065 g de Te.

En la Figura 36 se presenta el perfil de disolución de los componentes del mineral, incluyendo las barras de error resultantes de la experimentación duplicada.

Se observó que la disolución de oro alcanzó su máximo, 4.85%, en la primera media hora, pero disminuyó gradualmente a 4.51% al finalizar esa misma media hora. Posteriormente, la disolución se mantuvo relativamente constante hasta llegar a 4.25% al cabo de las 5 horas. La disolución de plata, alcanzó un máximo de 32.74% en la primera hora, pero disminuyó a 29.85% al finalizar esa hora. A las dos horas, se registró la máxima disolución de 41.31%. Sin embargo, a las 3 horas, descendió a 28.43%, aumentó nuevamente a 34.38% a las 4 horas y terminó en 29.34% al cabo de las 5 horas. A diferencia de la oxidación con la especie pura, se presentan variaciones a lo largo de la oxidación, probablemente causadas a las variaciones en las condiciones oxidantes de la solución puesto que ahora existen otras especies que pueden ser oxidadas. El telurio, alcanzó su máxima disolución, 50.38%, en la primera media hora, pero disminuyó progresivamente hasta llegar al 38.48% a las 3 horas. Luego, aumentó a 41.32% a las 4 horas y finalizó con una disolución del 31.89% al término del experimento. Cabe aclarar que el objetivo de la oxidación no es necesariamente la disolución de los metales sino el rompimiento del enlace telurio-metal preciosos, que permitiría su posterior recuperación por medio de una cianuración convencional.

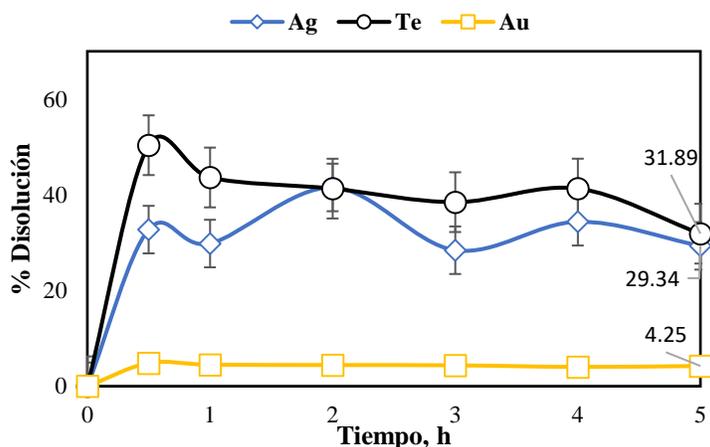


Figura 36. Perfil del Au, Ag y Te disuelto de la oxidación del mineral de Sonora con $K_2S_2O_8$

c) Cianuración del mineral de Sonora después del tratamiento oxidativo

Después de la oxidación, el mineral fue filtrado y secado antes de someterlo a la cianuración. En esta etapa, el mineral pretratado se colocó en un reactor enchaquetado con 200 ml de agua

desionizada y 1500 ppm de CN^- . Se ajustó el pH a 11 con NaOH. El proceso se llevó a cabo durante 3 horas, manteniendo una temperatura constante de 25°C y una agitación de 350 rpm para garantizar una mezcla homogénea y una reacción eficiente. La Figura 37 muestra los resultados de esta prueba.

Los resultados indican una máxima recuperación de oro de 43.38%, y de plata de 54.65%. En cuanto al telurio, no se observó disolución alguna, lo que implica que el telurio permaneció en la fase sólida y no fue afectado por el proceso de cianuración bajo las condiciones experimentales aplicadas. Estos resultados indican una mayor disolución de oro y plata comparados con la cianuración realizada al mineral fresco, lo que indica que, aunque el incremento no es muy grande, si puede corroborarse un efecto benéfico de la oxidación en la disolución de los metales preciosos. Cabe aclarar que, hablando de metales preciosos, el alto precio de estos metales hace que un incremento de un uno por ciento sea suficientemente importante como para proponer modificaciones al proceso.

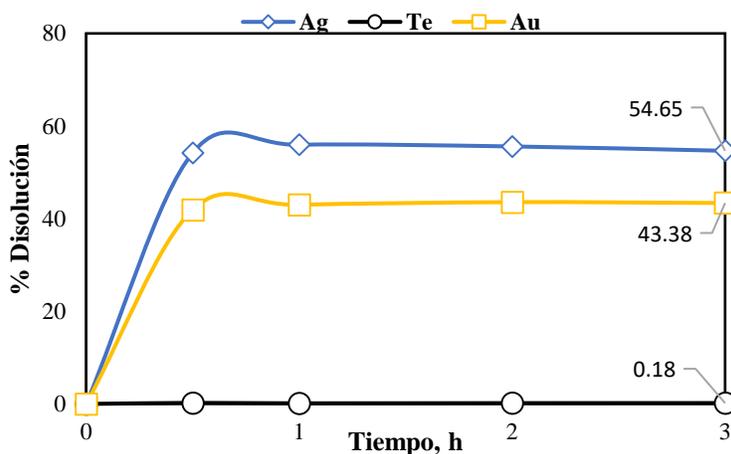


Figura 37. Perfil del Au, Ag y Te disuelto de la cianuración del mineral industrial oxidado.

Es importante mencionar que una vez filtrado el mineral oxidado y analizados los metales en solución, con el tiempo se forma un sólido en la solución. Con el objeto de corroborar la naturaleza de ese sólido formado se analizó por microscopía electrónica de barrido, principalmente para saber si podía contener oro y plata.

Se realizó un análisis de los sólidos formados en la solución ya filtrada de la oxidación del mineral de Sonora obtenidos de la solución final del experimento realizado con 0.15 M de $K_2S_2O_8$ en 200 ml a pH 3 sin adición de ácido (Figura 32). Esto se hizo por que, tiempo después de haber filtrado el mineral, se observaron precipitaciones de sólidos en la solución. Estos sólidos fueron analizados mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) con el objetivo de determinar si contenían oro y plata. Los resultados de este análisis se presentan en la Figura 38, y revelan que esos sólidos precipitados consisten únicamente en persulfato de potasio, aluminio, sílice, azufre y oxígeno. Probablemente se precipite persulfato de potasio ya que la solubilidad de éste es baja y estamos en el límite de máxima solubilidad. Se corrobora que no hay presencia de oro o plata en los sólidos precipitados.

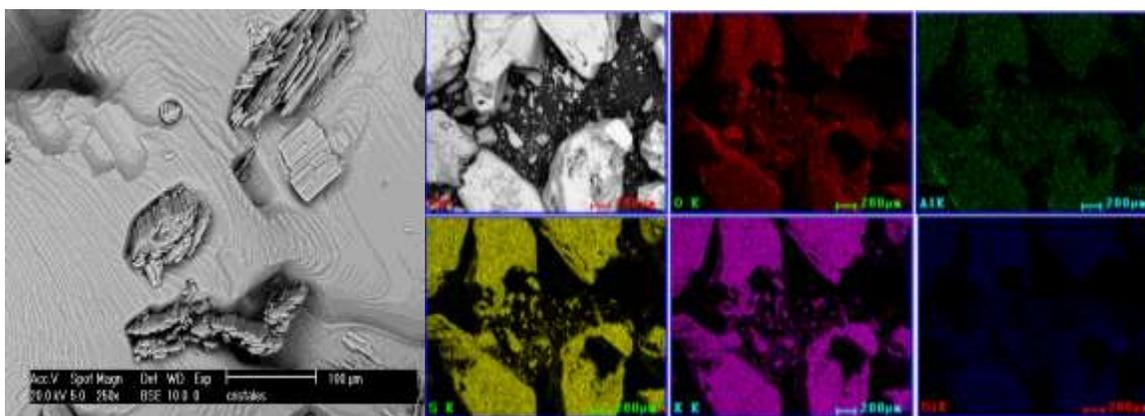


Figura 38. Caracterización de residuo sólido en MEB (250 x).

8. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de la oxidación de telururo de plata con peróxido de hidrógeno a pH 10.5 y a pH 3 ajustado utilizando ácido nítrico, clorhídrico o sulfúrico, nos permiten concluir que este oxidante no es capaz de romper el enlace plata-teluro a las concentraciones evaluadas, es decir, no se elimina la refractariedad del telururo de plata.

Se evaluaron otros oxidantes (KMnO_4 , $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$, NaClO y HClO_4) para realizar un estudio de pruebas en blanco sin añadirles mineral ni especie sintética (Ag_2Te), considerando las mismas variables de ORP, O_2 y ajuste del pH. Los resultados demostraron que el persulfato de potasio ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$), fue el oxidante más efectivo, ya que proporciona el mayor potencial oxidante a la solución, y la mayor concentración de oxígeno disuelto. Por lo tanto, se optó por el persulfato de potasio como el oxidante capaz de disolver la plata y el teluro a través del tratamiento oxidativo de la especie sintética.

Las mejores condiciones de oxidación para el telururo de plata puro (Ag_2Te) fueron una concentración de 0.15 M de persulfato de potasio a un pH de 3 que se origina naturalmente de la adición del persulfato. La oxidación de 100 mg de telururo de plata en 200 ml de la solución oxidante origina una disolución de plata del 59.53% y de 34.86% de teluro. Proponiendo una posible reacción para este tratamiento oxidativo:



Una cianuración estándar del mineral de Sonora permite disolver un 33.57% de oro y un 52.95% de plata, lo que confirma que es un mineral refractario y requiere un proceso de oxidación.

Se realizó una oxidación al mineral de Sonora aplicando los parámetros de oxidación que produjeron los mejores resultados en el tratamiento oxidativo del telururo de plata (oxidante con 0.15 M de persulfato a pH 3 sin adición de ácido). La oxidación se realizó con 5 g de

mineral en 200 ml de solución. En la oxidación se logró obtener una disolución de 4.25% de oro, un 29.34% de plata y un 31.89% de telurio.

Después de la oxidación se realizó una cianuración al mineral, obteniéndose una disolución de oro de 43.38% y de plata de 54.65%. Si consideramos los metales preciosos disueltos tanto en la oxidación como en la cianuración del mineral oxidado, se tiene que es posible disolver un 47.63% del oro y un 83.99% de la plata. Si bien estos valores no son tan altos, sí muestran un claro incremento en la recuperación causado por la oxidación del mineral.

En cuanto al telurio, no hubo especie disuelta. Esto sugiere que en la oxidación, el telurio liberado del telururo de plata permanece en la fase sólida en forma de TeO_2 .

Como conclusión general de este trabajo preliminar para evaluar la posibilidad de incrementar la disolución de oro y plata de minerales refractarios mediante una oxidación, se puede decir que el persulfato surge como nueva alternativa para el pretratamiento de los minerales refractarios de oro/plata que contienen telurio.

Es necesario continuar con un estudio fundamental para la optimización de las condiciones de oxidación de minerales utilizando persulfato. Es necesario explorar otros persulfatos más solubles y realizar un estudio fundamental del efecto del pH, de la concentración y de la temperatura.

9. REFERENCIAS

- Abrantes, L. M., & Costa, M. C. (1996). Electro-oxidation as a pre-treatment for gold recovery. In *Hydrometallurgy* (Vol. 40, pp 99-110).
- Aguayo, S., Pérez, E., & Encinas, M. A. (1996). Recursos y alternativas de tratamiento para los minerales de telurio de Sonora (México). In *Rev. Metal. Madrid* (Vol. 32, Issue 1). <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es>
- Alvarez-Martínez M. (2023). Recuperación de metales preciosos a partir de minerales industriales refractarios a la cianuración. Tesis de maestría en Ingeniería Metalúrgica, CINVESTAV Saltillo. Ramos Arizpe, Coahuila, pp. 68.
- Asamoah, R., Amankwah, R. K., Addai-Mensah, J., Asamoah, R., & Addai-Mensah, J. (2014). *Cyanidation of Refractory Gold Ores: A Review*. 204. <https://doi.org/10.13140/2.1.4772.6407>
- Ávila, E. (2019.). *Tellurium and the current technological era*. <http://revistas.pucp.edu.pe/quimica>
- Ávila-Madero G., Nava-Alonso F., Alvarez-Martínez M. (2023). *Memorias del congreso Internacional de Metalurgia y Materiales (42 CIMM)*. Recuperación de metales preciosos a partir de minerales industriales complejos. Oxidación de telururo de oro con hipoclorito de sodio. Tecnológico Nacional de México, Revista electrónica ISSN: 2007-9540, 198.
- Bayat, O., Vapur, H., Akyol, F., & Poole, C. (2003). *Effects of oxidising agents on dissolution of Gumuskoy silver ore in cyanide solution*. *Minerals Engineering*, 16(4), 395–398. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00050-5](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00050-5)
- Chahuayo Meza, E. K., & Alejandro Marquez, A.B. (2012). Estudio de optimización para mejorar la lixiviación cianurante de un mineral refractario de oro y plara conteniendo antimonio de la zona de Huampar Lima. Huancayo.
- Celep, O., Alp, I., Deveci, H., & Vicil, M. (2009). Characterization of refractory behaviour of complex gold/silver ore by diagnostic leaching. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 19(3), 707–713. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60337-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60337-4)
- Dakubo, F., Baygents, J. C., & Farrell, J. (2012). Peroxodisulfate assisted leaching of chalcopyrite. *Hydrometallurgy*, 121–124, 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.04.004>
- Ellis, S. (2005). Treatment of gold-telluride ores. In *Developments in Mineral Processing* (Vol. 15, Issue C, pp. 973–984). [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15039-X](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15039-X)

- Evonik *Leading Beyond Chemistry* (2024). *Persulfates technical information*. Evonik Industries AG, Rodenbacher Chaussee 4 63457 Hanau-Wolfgang German (pp. 17).
- González-Ibarra, A., Nava-Alonso, F., Uribe-Salas, A., (2017). *Cyanidation of silver telluride (Ag₂Te): effect of lead (II) concentration, particle size and presence of pyrite*. <https://www.researchgate.net/publication/318403365>
- Gudyanga, F. P., Mahlangu, T., Roman, R. J., Mungoshi, J., & Mbeve, K. (1999). Acidic pressure oxidation pre-treatment of refractory gold concentrates from the Kwekwe roasting plant, Zimbabwe. *Minerals Engineering*, 12(8), 863–875. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(99\)00074-6](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(99)00074-6)
- Gui, Q., Fu, L., Hu, Y., Di, H., Liang, M., Wang, S., Zhang, L., & Dong, E. (2023). Oxidative pretreatment of refractory gold ore using persulfate under ultrasound for efficient leaching of gold by a novel eco-friendly lixiviant: Demonstration of the effect of particle size and economic benefits. *Hydrometallurgy*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106110>
- Guzman, L., Segarra, M., Chimenos, J. M., Fernandez, M. A., & Espiell, F. (1999). Gold cyanidation using hydrogen peroxide. In *Hydrometallurgy* (Vol. 52).
- Habashi, F. (2016). Gold – An Historical Introduction. In *Gold Ore Processing: Project Development and Operations* (pp. 1–20). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00001-3>
- Hasab, M. G., Rashchi, F., & Raygan, S. (2014). Chloride-hypochlorite leaching and hydrochloric acid washing in multi-stages for extraction of gold from a refractory concentrate. *Hydrometallurgy*, 142, 56–59. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.11.015>
- Hassaan, M., Nemr, A. El, & Hassaan, M. A. (2017). Advanced Oxidation Processes for Textile Wastewater Treatment. *International Journal of Photochemistry and Photobiology*, 2(3), 85–93. <https://doi.org/10.11648/j.ijpp.20170203.13>
- Henley, K. J., Clarke, N. C., & Sauter, P. (2001). Evaluation of a diagnostic leaching technique for gold in native gold and gold + silver tellurides. *Minerals Engineering* (Vol. 14, Issue 1).
- Jackman, I.R., Sarbutt K., (1990). The recovery of gold from a telluride concentrate. In proceedings of randol gold forum “90”; Colorado: Randol International Inc.
- Karimi, P., Abdollahi, H., Amini, A., Noaparast, M., Shafaei, S. Z., & Habashi, F. (2010). Cyanidation of gold ores containing copper, silver, lead, arsenic and antimony. *International Journal of Mineral Processing*, 95(1–4), 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2010.03.002>

- La Brooy, S.R., Komosa T.* (1992). Extractive Metallurgy of Gold and Base Metals: Proceedings of the International Conference on Extractive Metallurgy of Gold and Base Metals, Kalgoorlie, WA, October 26-28.
- La Brooy, S.R., Linge, H.G. & Walker G.S.* (1994). Review of gold extraction from ores, *Minerals Engineering*, vol. 7, no. 10, pp 1213-1241.
- Lavrenko, V. A., Shchur, D. V., Zolotareno, A. D., & Zolotareno, A. D.* (2019). Electrochemical Synthesis of Ammonium Persulfate (NH₄)₂S₂O₈ Using Oxygen-Depolarized Porous Silver Cathodes Produced by Powder Metallurgy Methods. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 57(9–10), 596–604. <https://doi.org/10.1007/s11106-019-00021-y>
- Lu, Z. & Lawson, F.* (1994). *Metallurgical properties of synthetic sylvanite*, The AusIMM proceedings, vol. 299, no. 2, pp. 89-93.
- Marsden, J. O. & House, C.I.*, (2006). The Chemistry of gold extraction, 2dn edition. Littleton, Colorado, Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- Nunan, T. O., Viana, I. L., Peixoto, G. C., Ernesto, H., Verster, D. M., Pereira, J. H., Bonfatti, J. M., & Cesar Teixeira, L. A.* (2017). Improvements in gold ore cyanidation by pre-oxidation with hydrogen peroxide. *Minerals Engineering*, 108, 67–70. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.01.006>
- Panorama Minero del Estado de Sonora Dirección de Operación Geológica.* (2020). Reporte del Servicio Geológico Mexicano.
- Parga, J. R., & Carrillo, F. R.* (1996). Avances en los métodos de recuperación de oro y plata de minerales refractarios. <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es>
- Prontuario Estadístico de la Minería.* Secretaría de Economía. México. Estadísticas Enero-Diciembre 2023.
- Quiroz Aguinaga, U., María, A., Moncada, B., La, A., & Gómez, R.-T.* (2021). Uso de cloro electrogenerado a partir de NaCl en medio ácido como una propuesta para la lixiviación de oro aluvial. *Rev Soc Quím Perú*. 86(4) 439-451.
- Rodríguez- Chávez V.* (2023). “Efecto de una oxidación preliminar en la recuperación de oro por lixiviación en minerales con especies oro-teluro” Tesis de doctorado en ciencias en Ingeniería Metalúrgica y Cerámica, CINVESTAV Saltillo. Ramos Arizpe, Coahuila, pp. 237.
- Santos-Munguía, P. C., Nava-Alonso, F., & Alonso-González, O.* (2016). Análisis de los Yacimientos de Telururos en México. XXV Congreso Internacional de Metalurgia Extractiva. Guanajuato, Gto. México. 115-163.

Santos-Munguía, P. C. (2019). Minerales de oro conteniendo telurio. Problemas químicos en su análisis y opciones de tratamiento. Tesis de doctorado en ciencias en Ingeniería Metalúrgica y Cerámica, CINVESTAV Saltillo. Ramos Arizpe, Coahuila, pp. 99.

U.S. Geological Survey, *Mineral Commodity Summaries, January 2024*.

Wang, Q., Liu, T., Chen, Y., Chen, S., Qin, X., Nie, Y., & Zi, F. (2020). Eco-friendly and economical extraction of gold from a refractory gold ore in iodide solution using persulfate as the oxidant. *Hydrometallurgy*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105502>

Weir, D., Berezowsky, M., (1984). Gold Extraction from Refractory Concentrates. Sherrit Research Centre, Alberta Canada, pp. 1–26.

Woodard & Curran, Inc (2016). *Industrial Waste Treatment Handbook*, second edition. Burlington, Ma. Pp. 532.

Yannopoulos, J.C., (1990). *The extractive metallurgy of gold*, Van Nostrand Reinhold, New York, USA.

Zhang, J., Zhang, Y., Richmond, W., & Wang, H. P. (2010). Processing technologies for gold-telluride ores. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 17(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s12613-010-0101-6>

Zhou, X., Almatrafi, E., Liu, S., Yan, H., Ma, D., Qian, S., Qin, L., Yi, H., Fu, Y., Li, L., Zhang, M., Xu, F., Li, H., Zhou, C., Yan, M., Zeng, G., & Lai, C. (2023). Insight into the selection of oxidant in persulfate activation system: The effect of the target pollutant properties. *Journal of Hazardous Materials*, 460. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132363>