



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
METALURGIA**

Extracción de Oro por Solventes Utilizando el Extractante LIX[®] 7820

TESIS

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presentan:

Rayza Herrera Imperial

Guadalupe Martínez Ballesteros

Hermosillo, Sonora

Mayo de 2015

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

**“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor,
la electricidad y la energía atómica y se llama VOLUNTAD”.**

Albert Einstein.

DEDICATORIA

A nuestros padres, que con su esfuerzo y cariño lograron enfocar nuestras vidas por el camino de la verdad y el conocimiento, de la superación personal y a la capacitación para ser personas productivas en nuestra sociedad.

A ellos:

Ramiro Martínez Moreno

Olivia Ballesteros Madrigal

Guillermo Herrera Silva

María Elena Imperial Moreno

Con reconocimiento y amor.

AGRADECIMIENTOS

A *Dios* porque sabemos que con su amor y bendiciones nos ha acompañado desde que nacimos, y que con su grandeza y poder ha iluminado nuestras vidas.

A nuestros *Padres* porque reconocemos su sabiduría y entrega incondicional, son nuestro orgullo. Somos afortunadas de tener uno padres como ustedes los amamos.

A nuestra *Familia* porque sabemos que siempre podremos contar con ustedes, porque afrontamos la vida con alegría, porque sabemos que tenemos el amor y confianza de ustedes, y que siempre apoyan nuestras decisiones.

A la Universidad de Sonora y al Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia por brindarnos las herramientas necesarias para afrontar la vida productiva dentro del ramo que nos gusta.

A nuestros *Maestros* gracias por compartir sus conocimientos con nosotras durante nuestra preparación profesional y su habilidad para motivarnos para dar así lo mejor de nosotras, a todos los apreciamos y nunca olvidaremos las enseñanzas que nos dieron.

A nuestros *Compañeros* porque con ustedes lloramos, reímos, trabajamos y compartimos nuestros mejores momentos.

Especialmente para nuestro director de tesis *Dr. Jesús Leobardo Valenzuela García* por su comprensión y paciencia y sobretodo compartir con nosotras su amistad, conocimientos y experiencias. A nuestro comité tutorial *Dr. Agustín Gómez Álvarez, Ing. Juan Antonio Jiménez Ruiz y M.C. Jesús Humberto Coronado López* por compartir con nosotras su capacidad intelectual, su tiempo y brindarnos su amistad en todo momento. A todos los apreciamos y nunca los olvidaremos.

A la *Empresa BASF* por la confianza y apoyarnos con el material necesario para realizar este proyecto para nuestra titulación profesional especialmente al Ingeniero Guillermo Fimbres Córdoba por su apoyo, paciencia y disponibilidad, y al Ingeniero Daniel Burgos Guzmán por su apoyo.

ÍNDICE

	Página.
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XII
RESUMEN	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo General	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3. ANTECEDENTES	4
3.1 Hidrometalurgia.....	4
3.2 Extracción de Oro por Cianuración.....	6
3.3 Procesos para la Recuperación de Oro de Soluciones de Lixiviación	7
3.3.1 Proceso Merrill-Crowe	7
3.3.2 Adsorción en Carbón Activado	9
3.3.3 Resinas de Intercambio Iónico	11
3.3.4 Extracción por Solventes.....	13
3.4 Química de la Extracción por Solventes	14
3.5 Coeficiente de Distribución.....	15
3.6 Características Esenciales del Reactivo Extractante Orgánico	15
3.7 Selectividad.....	16
3.8 Clasificación General de los Reactivos Orgánicos.....	17
3.8.1 Catiónicos:	17
3.8.1.2 Acídicos:	17
3.8.1.3 Quelatantes:	17
3.8.2 Aniónicos:	17
3.8.3 Solvatantes o Neutros:	17
3.9 Diluyente	18
3.10 Modificadores	18
3.11 Extracción por Solventes Utilizando LIX [®] 7820	18
4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	20
4.1. Experimentación	20
4.2 Variables Experimentales.....	24

4.3 Material, Equipo y Reactivos.....	24
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
5.1 Porcentaje de Extracción.....	26
5.1.1 Porcentaje de Extracción con un tiempo de agitación de 3 minutos.....	26
5.1.2 Porcentaje de Extracción con un tiempo de agitación de 4 minutos.....	28
5.1.3 Porcentaje de Extracción en soluciones reales.....	31
5.2 Selectividad.....	33
5.2.1 Selectividad en soluciones sintéticas.....	33
5.2.2 Comportamiento de la selectividad en soluciones reales.....	44
5.3 Número de etapas de extracción teóricas.....	48
5.4 Cinética de extracción.....	54
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	56
APÉNDICE A.....	57
APÉNDICE B.....	59
7. REFERENCIAS.....	78

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página.
Figura 1. <i>Diagrama de Flujo del Proceso Merrill-Crowe.</i>	9
Figura 2. <i>Diagrama de Flujo del Proceso de Adsorción en Carbón Activado.</i>	11
Figura 3. <i>Esquema Generalizado para la Recuperación de Metales que Incorpora Extracción por solvente.</i>	14
Figura 4. <i>Diagrama de flujo del Sistema Batch.</i>	21
Figura 5. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 6%, y pH = 10.02.</i>	33
Figura 6. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 6%, y pH = 10.5.</i>	34
Figura 7. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 6%, y pH = 11.</i>	34
Figura 8. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 8%, y pH = 10.03.</i>	35
Figura 9. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 8%, y pH = 10.49.</i>	35
Figura 10. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 8%, y pH = 11.</i>	36
Figura 11. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 10%, y pH = 10.02.</i>	37
Figura 12. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 10%, y pH = 10.51.</i>	37
Figura 13. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 10%, y pH = 10.98.</i>	38
Figura 14. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 6%, y pH = 10.04.</i>	39
Figura 15. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 6%, y pH = 10.5.</i>	39
Figura 16. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 6%, y pH = 10.98.</i>	40

Figura 17. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 8%, y pH = 10.07.</i>	41
Figura 18. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 8%, y pH = 10.47.</i>	41
Figura 19. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 8%, y pH = 10.95.</i>	42
Figura 20. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 10%, y pH = 10.</i>	43
Figura 21. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 10%, y pH = 10.53.</i>	43
Figura 22. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 10%, y pH = 11.02.</i>	44
Figura 23. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 6%, y pH = 10.61.</i>	45
Figura 24. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 8%, y pH = 10.61.</i>	45
Figura 25. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 10%, y pH = 10.61.</i>	46
Figura 26. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 6%, y pH = 10.61.</i>	47
Figura 27. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 8%, y pH = 10.61.</i>	47
Figura 28. <i>Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 10%, y pH = 10.61.</i>	48
Figura 29. <i>Construcción de diagrama de McCabe-Thiele.</i>	49
Figura 30. <i>Extracción de oro con concentración = 6% de LIX[®] 7820, pH = 10.5 y relación ORG/AQ = 0.8/1.</i>	49
Figura 31. <i>Extracción de oro con concentración = 6% de LIX[®] 7820, pH = 10.5 y relación ORG/AQ = 1/1.</i>	50
Figura 32. <i>Extracción de oro con concentración = 6% de LIX[®] 7820, pH = 10.5 y relación ORG/AQ = 1.2/1.</i>	50

Figura 33. <i>Extracción de oro concentración = 8% de LIX[®] 7820,</i> <i>pH = 10.5 y relación ORG/AQ = 0.8/1.....</i>	51
Figura 34. <i>Extracción de oro con concentración = 8% de LIX[®] 7820,</i> <i>pH = 10.5 y relación ORG/AQ = 1/1.....</i>	51
Figura 35. <i>Extracción de oro con concentración = 8% LIX[®] 7820,</i> <i>pH = 10.5 y relación ORG/AQ = 1.2/1.....</i>	52
Figura 36. <i>Extracción de oro con concentración = 10% LIX[®] 7820,</i> <i>pH = 10.5 y relación ORG/AQ = 0.8/1.....</i>	52
Figura 37. <i>Extracción de oro con concentración = 10% LIX[®] 7820,</i> <i>pH = 10.5 y relación ORG/AQ = 1/1.....</i>	53
Figura 38. <i>Extracción de oro con concentración = 10% de LIX[®] 7820,</i> <i>pH = 10.5 y relación ORG/AQ = 1.2/1.....</i>	53
Figura 39. <i>Cinética a una concentración = 6% de LIX[®] 7820.....</i>	54
Figura 40. <i>Cinética a una concentración = 8% de LIX[®] 7820.....</i>	54
Figura 41. <i>Cinética a una concentración = 10% de LIX[®] 7820.....</i>	55

ÍNDICE DE TABLAS

	Página.
Tabla 1. <i>Concentración de los diferentes metales presentes en la solución de lixiviación de mina La Herradura, pH = 10.61 y 230 mgCN/L.....</i>	22
Tabla 2. <i>Propiedades físicas del LIX[®] 7820:</i>	25
Tabla 3. <i>Propiedades de rendimiento proporcionado por el fabricante:.....</i>	25
Tabla 4. <i>Extracción de oro utilizando una concentración = 6% LIX[®] 7820.....</i>	27
Tabla 5. <i>Extracción de oro utilizando una concentración = 8% LIX[®] 7820.....</i>	27
Tabla 6. <i>Extracción de oro utilizando una concentración = 10% LIX[®] 7820.....</i>	28
Tabla 7. <i>Extracción de oro utilizando una concentración = 6% LIX[®] 7820.....</i>	29
Tabla 8. <i>Extracción de oro utilizando una concentración = 8% LIX[®] 7820.....</i>	30
Tabla 9. <i>Extracción de oro utilizando una concentración = 10% LIX[®] 7820.....</i>	30
Tabla 10. <i>Extracción de oro variando la concentración de LIX[®] 7820 a una agitación de 3 minutos.</i>	31
Tabla 11. <i>Extracción de oro variando la concentración de LIX[®] 7820 a una agitación de 4 minutos</i>	32

RESUMEN

Hoy en día se ha incrementado la demanda en la industria minera por los metales en general, especialmente con una mayor pureza y concentración, debido a la baja ley presente en los yacimientos geológicos. Es por esto que se investigan nuevas técnicas para la obtención de los metales, tal es el caso de la hidrometalurgia que busca por medio del proceso de Extracción por Solventes concentrar y purificar el metal. Este proceso se ha aplicado para la obtención de cobre con buenos resultados y ahora se busca que este proceso sustituya a los clásicos procesos utilizados para la recuperación de oro a partir de soluciones cianuradas, por tal motivo el objetivo general del presente trabajo es determinar la extracción de oro por solventes a partir de soluciones cianuradas utilizando el extractante LIX[®] 7820. Diferentes variables afectan la extracción como lo es el pH, la concentración de extractante y la relación orgánico/acuoso. Las isotermas de extracción de aurocianuro comparada con respecto a otros cianoaniones varían según las condiciones de operación. La extracción de oro es factible a pH alcalino, con una buena separación a un pH de 10.5, una concentración = 10% de LIX[®] 7820 y una relación orgánico/acuoso = 1/1. En el diagrama de McCabe-Thiele, se observa una extracción más eficiente cuando se usa 10% de extractante LIX[®] 7820 y es necesario solamente una etapa de extracción.

1. INTRODUCCIÓN

La minería, a través de los siglos ha formado parte de la historia y del desarrollo económico de México, siendo promotora y soporte de la expansión regional en diferentes épocas. Dentro de la industria minero-metalúrgica mexicana, la extracción de valores metálicos no férricos (oro, plata, plomo y zinc) ha tenido gran importancia, debido a la creciente solicitud de metales en el mercado nacional e internacional, por ser la segunda fuente generadora de divisas para el país ^[19].

Hoy en día se ha incrementado la demanda en la industria minera por los metales en general, especialmente para la obtención con una mayor pureza y concentración debido a la baja ley presente en los yacimientos geológicos, lo que genera también desafíos incluyendo el mantenimiento de la seguridad ocupacional, asegurando una creciente compatibilidad ambiental y productos de mayor calidad y de costos menores. Debido a esto se ha incrementado el número de estudios de nuevos procesos efectivos, eficientes, económicos y ecológicos ^[6]. Tal es el caso de los procesos hidrometalúrgicos como lo son: cementación Merrill-Crowe, adsorción en carbón activado, resinas de intercambio iónico y extracción por solventes.

La hidrometalurgia ha proporcionado grandes avances y los seguirá dando en el futuro, un ejemplo claro de esto es la extracción por solventes ya que es uno de los procesos más efectivos y económicos para la purificación de metales.

La primera operación industrial de extracción por solventes en hidrometalurgia se construyó en el año de 1942 durante la segunda guerra mundial, obteniendo de ello la purificación de uranio ^[8]. Posteriormente, la extracción en cobre se ha practicado comercialmente a partir de 1968 considerándose una de las técnicas más establecidas ^[20].

Actualmente empresas fabricantes de reactivos, iniciaron proyectos de investigación con el propósito de desarrollar un extractante adecuado para el proceso de extracción por solventes, en la recuperación de oro partiendo de soluciones cianuradas y otros metales valiosos.

Lo atractivo de este método es que se pueden elegir entre muchos extractantes hasta encontrar el que mejor se ajuste a las condiciones del proceso ^[25]. Por esta razón, en la industria de la metalurgia es uno de los métodos de purificación que ha tenido un espectacular desarrollo en estos últimos tiempos, por tal motivo, se han instalado numerosas plantas que operan actualmente en el mundo de la separación, purificación y concentración de más de una treintena de elementos químicos, como cobre, níquel, cobalto, zinc, uranio, molibdeno, tungsteno, vanadio, tierras raras, zirconio, niobio, tantalio, boro, germanio, arsénico, renio, torio, el grupo de los metales del platino, berilio y otros.

Esta técnica se ha utilizado satisfactoriamente en la recuperación de cobre en soluciones de lixiviación. La extracción de oro por medio de este proceso se ha dado solamente en forma experimental para soluciones cianuradas, de manera que, para soluciones de cloruros la extracción de oro ya es un proceso que se encuentra en operación en la industria metalúrgica ^[22].

La extracción por solventes es un método viable para la recuperación de metales, ya que puede elevar la concentración inicial presente en la solución de lixiviación de cianuro, además de tener la propiedad de una cinética de extracción muy rápida ^[17].

El presente trabajo tiene la finalidad de estudiar las diferentes variables del proceso de extracción por solventes utilizando el extractante LIX[®] 7820, para la extracción selectiva de oro a partir de soluciones alcalinas de cianuro pero ahora con una alternativa menos costosa.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Determinar la eficiencia que presenta el reactivo LIX[®] 7820 para extraer selectivamente los iones de aurocianuro, así como las mejores condiciones tanto físicas como químicas para obtener una mayor eficacia de extracción y selectividad.

2.2 Objetivos Específicos

- Obtener la eficiencia de extracción y la selectividad del reactivo LIX[®] 7820 en la recuperación de iones de aurocianuro.
- Determinar las condiciones físicas y químicas del reactivo mediante el estudio Batch con soluciones reales y sintéticas.
- Determinar el número de etapas requeridas para extracción de acuerdo al diagrama de McCabe-Thiele.
- Determinar la cinética de extracción

3. ANTECEDENTES

3.1 Hidrometalurgia

La metalurgia extractiva es una disciplina que, a diferencia de casi todas las demás ramas de la metalurgia, necesita no sólo de una sólida formación tecnológica sino también de una profunda formación química para su completo dominio ^[2].

Mucho de los procesos de hoy no son muy diferentes, excepto en la escala, de los que se tenían hace cincuenta o cien años. Hoy, sin embargo, se conoce el proceso mucho mejor y por lo tanto puede ser controlado efectivamente produciendo materiales metálicos con una calidad mucho más homogénea. Se puede también modificar el proceso para mantener los costos a un nivel mínimo aunque las materias primas que se tratan son cada vez más refractarias ^[2].

Desde la explotación minera hasta la obtención del metal, se realizan un conjunto de operaciones físicas y procesos químicos que si bien han de elegirse convenientemente en cada tipo de mena, y de acuerdo a las circunstancias económicas que se presenten en el caso concreto, con frecuencia su secuencia se repite en el beneficio de metales diferentes ^[17].

Se presentan dos conjuntos perfectamente definidos en las operaciones y procesos: pirometalúrgicos y los hidrometalúrgicos. En el primero incluye operaciones por vía seca a temperaturas elevadas, y en el segundo, la solubilización en la fase acuosa del metal que se trata de beneficiar a temperatura ambiente ^[17].

La pirometalurgia fue muy efectiva cuando predominaban las altas leyes de minerales, sin embargo, cuando estos minerales comenzaron a agotarse, los metalurgistas tuvieron que tratar yacimientos con muy bajas concentraciones de metales los cuales requerían de una preconcentración antes de su ingreso a los hornos de fundición. Tal motivo originó la competencia exitosa de la hidrometalurgia con la pirometalurgia ^[8]. La hidrometalurgia trabaja a temperaturas relativamente bajas con lo cual los consumos energéticos son reducidos, sin

embargo la pirometalurgia trabaja a más de 1000°C, lo que hace imposible pensar en recuperar todo el poder energético de los combustibles sin tener pérdidas apreciables de energía ^[2].

La propia naturaleza ha llevado a cabo el proceso de disolver algunos minerales, transportarlos y precipitarlos en depósitos de otro tipo. Una buena parte de los yacimientos sedimentarios han sufrido en mayor o menor grado un proceso químico de disolución y depreciación en su génesis. Cabe pensar que el hombre en su búsqueda y aprovechamiento de sustancias minerales, haya imitado a la propia naturaleza para la extracción de aquellos metales solubles que necesitaba ^[13].

La hidrometalurgia es la rama de la metalurgia que utiliza disoluciones acuosas para la obtención de los metales. Esta técnica de trabajo es fácilmente adaptable a operaciones continuas a gran escala. Uno de los campos de aplicación mejor definido es el tratamiento de minerales de baja concentración. Así mismo, se caracteriza por la posibilidad de elección de los reactantes entre un amplio rango, tanto por su naturaleza como por su concentración y, además, por el alto grado de control que se puede ejercer sobre las reacciones que se utiliza.

Por último, el extraordinario valor económico adquirido por el oro ha impulsado el desarrollo de la industria minería en el tratamiento de depósitos pequeños o con bajos contenidos de metales preciosos ^[13].

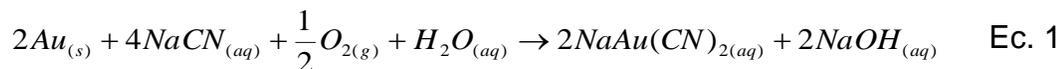
Generalmente se identifican tres operaciones unitarias básicas en un proceso hidrometalúrgico como son: lixiviación, purificación-concentración acuosa y la recuperación.

3.2 Extracción de Oro por Cianuración

El oro se encuentra en la naturaleza diseminado en pequeñas cantidades. Se le haya principalmente en rocas cuarcíferas, vetas auríferas y en depósitos aluviales. Sin embargo, la mayor parte del oro aparece como elemento nativo ^[27].

La demanda de oro se ha incrementado debido a sus propiedades físicas y químicas, lo que implica un estudio de costos para su obtención, es decir, solo tiene sentido si dicho costo de recuperación es mucho menor que el valor del metal precioso. Además, las restricciones impuestas a la eliminación de residuos y las estrictas regulaciones ambientales exigen métodos o sistemas de economía viable, con tecnología que considere y respete al ambiente ^[24].

La mayor parte de los minerales son tratados por medio del proceso de lixiviación con soluciones cianuradas, y se recupera el oro por diferentes procesos metalúrgicos. La reacción que sucede durante la lixiviación es la siguiente:



Previo al tratamiento del mineral, el oro se extrae al estar en contacto con una solución de cianuro de sodio, donde se disuelve en presencia de oxígeno, el cual es necesario para que se lleve a cabo la reacción.

Durante este proceso es importante mantener un pH >10 para evitar la formación de ácido cianhídrico, lo cual se logra agregando cal para mantener un pH alto.

La lixiviación de minerales de oro con soluciones cianuradas se puede llevar acabo de dos maneras diferentes, la primera técnica es la lixiviación en tanque agitado, el cual requiere que el mineral este finamente molido para ser espesado y posteriormente acondicionado con aire y cal antes del proceso de lixiviación. A esta pulpa se le agrega aproximadamente medio kilogramo por tonelada de cianuro de sodio y se lleva a cabo la lixiviación con un tiempo de residencia de 24 horas en reactores agitados mecánicamente o por medio de aire ^[26].

La segunda técnica es la lixiviación en montones (heap leaching), donde se hace pasar una solución alcalina de cianuro a través de un lecho de mineral apilado o terrero de lixiviación. Al mineral apilado se le da un tratamiento que consiste en triturarlo para obtener una mayor área de contacto con la solución alcalina, el cual facilita la infiltración de éste en la partícula permitiendo que el oro presente pase a solución. El mineral triturado se puede enviar mediante bandas transportadoras a un proceso de aglomeración si así se requiere. En la construcción de un patio es necesario instalar una membrana impermeable, sobre la cual se instala tubería corrugada que permite que la solución filtrada llegue al circuito de recuperación. La lixiviación por estos dos diferentes métodos varía según la concentración del mineral.

3.3 Procesos para la Recuperación de Oro de Soluciones de Lixiviación

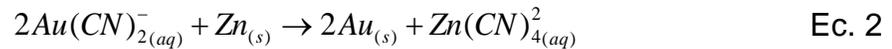
La recuperación de oro de soluciones cianuradas por el proceso Merrill-Crowe o adsorción en carbón activado, son las técnicas más utilizadas en la actualidad. Cabe mencionar que otros métodos de recuperación de oro se encuentran actualmente en su etapa de estudio y desarrollo, como lo son las resinas de intercambio iónico y la extracción por solventes ^[15].

3.3.1 Proceso Merrill-Crowe

Durante 1890 se implementó la cementación con zinc para la recuperación de oro y plata a partir de soluciones de cianuración ^[1]. El proceso de cementación inicial comprendía la introducción de la solución de cianuro con el oro sobre una capa de raspaduras de zinc. Se demostró que fue completamente ineficiente debido a que la reacción de cementación fue más lenta. El zinc se vuelve rápidamente pasivo inhibiendo una nueva depositación de oro. Poco después, la precipitación de zinc mejoró añadiendo sal de plomo. Esto permitió que zinc-plomo formada sobre la superficie de las raspaduras eliminara la pasividad de la superficie del zinc, permitiendo así una continua deposición de oro ^[4]. Con el tiempo también se hicieron nuevas mejoras al sistema usando polvo de zinc, proporcionando mayor área superficial y una acelerada cinética de reacción.

La cementación con polvos de zinc o proceso Merrill-Crowe es el método más ampliamente usado para la recuperación de oro y plata, ya que es de operación simple y eficiente, por lo que lo hace un proceso atractivo para usarse en minas donde el mineral presenta una gran proporción de oro y plata.

El proceso se describe por la siguiente reacción:



La electroquímica de la cementación, es una reacción de precipitación que implica el proceso de oxidación y reducción.

En contraste a la reacción de lixiviación, en este proceso es necesario reducir al máximo el contenido de oxígeno en solución, ya que disminuye la eficiencia de precipitación de oro e incrementa el consumo de zinc. Así, el proceso Merrill-Crowe (Figura 1) incluye un medio para remover oxígeno disuelto de la solución previo a la adición de zinc. La solución enriquecida clarificada se somete a vacío en una torre Crowe para disminuir la concentración de oxígeno disuelto a 0.5 mg/L o menos. Posteriormente, se agrega polvo de zinc metálico a la solución rica con oro y se agregan las sales de plomo ^[21] ^[10].

Finalmente, la pulpa con los metales preciosos se envía directamente al sistema de filtración a presión. El precipitado se alimenta a fundición agregando los fundentes adecuados en un horno para obtener como producto el metal Doré en pequeñas barras ^[18].

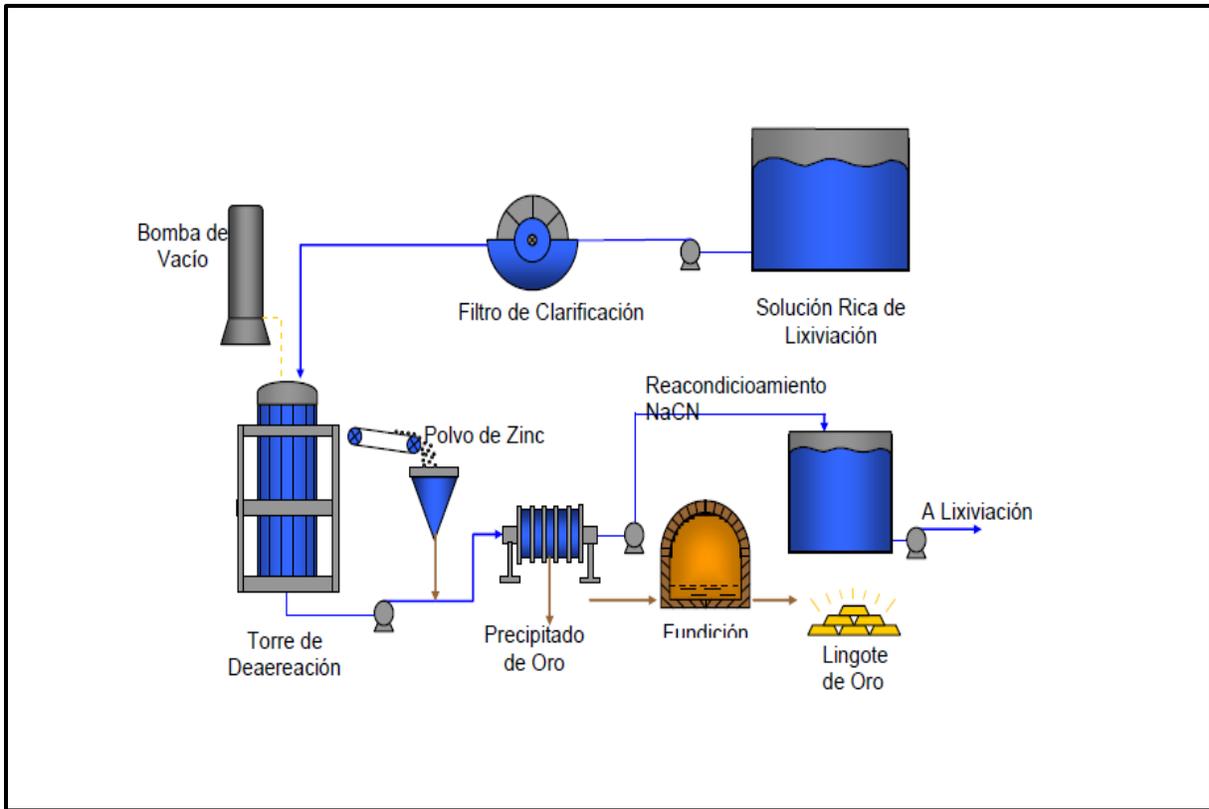


Figura 1. Diagrama de Flujo del Proceso Merrill-Crowe.

3.3.2 Adsorción en Carbón Activado

El sistema de carbón activado no requiere energía eléctrica o adición de zinc, y es el método preferido para atrapar el oro. La característica de este método no es una reacción química, sino un enlace físico relacionado con alta porosidad y los microporos, con una gran área superficial en el carbón lo cual le da la propiedad adsortiva. Este enlace es débil con alcalinidad alta ($\text{pH} > 13$) y si la solución se mantiene a un pH muy alto, el carbón no atrapa tanto oro como a un pH más bajo. Este enlace débil se usa para despojar el oro del carbón en el sistema de recuperación ^[14]. El mecanismo de adsorción de oro se lleva a cabo de la siguiente manera:



Los minerales de oro generalmente van acompañados de plata, la cual también se disuelve con cianuro y se recupera junto con el oro. No obstante, si se usa el sistema con carbón activado para la recuperación de oro, este puede sobrecargarse fácilmente con plata ^[14].

El carbón se utiliza en forma de gránulos de un tamaño de 3 a 6 mm, fabricado preferentemente con cáscara de coco, el cual tiene afinidad por los iones de oro, además las formas de sus fibras proporciona más centros activos, una gran área superficial y resistencia a la atrición ^[4].

El proceso de adsorción en carbón se maneja como: carbón en pulpa y carbón en columna. El carbón en pulpa puede agregarse directamente a la pulpa de cianuración evitando la etapa de filtración ^[7]. Después de la lixiviación, la pulpa es enviada a la sección de adsorción donde el ion aurocianuro se adsorbe al carbón en una serie de reactores agitados, los cuales tienen un arreglo tal, para permitir el flujo de la pulpa y el carbón a contra corriente. El carbón se separa de la pulpa por medio de un cribado entre etapas. El carbón cuando está suficientemente cargado con oro, se envía a la sección de elución, donde se utiliza una solución de cianuro cercano al punto de ebullición (generalmente 1% de hidróxido de sodio y 0.1 % de cianuro de sodio) por 24 horas ^[26]. El producto obtenido en la etapa anterior se envía a las celdas de electrodeposición, donde el oro se reduce a su estado metálico para ser fundido en un horno y obtener el oro moldeado en barras.

El carbón en columna es un método muy eficiente para la obtención oro en la lixiviación en montones. Esto se debe a que su instalación y operación es más barata y menos complicada que el sistema Merrill-Crowe.

El sistema opera cuando la solución de lixiviación en montones es bombeada y alimentada por la parte inferior de la columna para lograr tener mayor contacto con el carbón activado. El carbón de la columna es pasado a un tanque de lavado y posteriormente es sometido a una etapa de elución, aquí el carbón es puesto en contacto a presión y temperatura elevada, con una solución de hidróxido de sodio y cianuro de sodio para desorber los metales adheridos en el carbón. Esto produce un volumen pequeño de solución con alta concentración en oro,

adecuada para su posterior recuperación en el área de refinería, donde se encuentran las celdas electrolíticas en las cuales se deposita el oro y la plata (Figura 2). Finalmente el carbón debe ser sometido a una etapa de limpieza química con ácido y un tratamiento térmico en un horno rotatorio a temperaturas de 650-750°C.

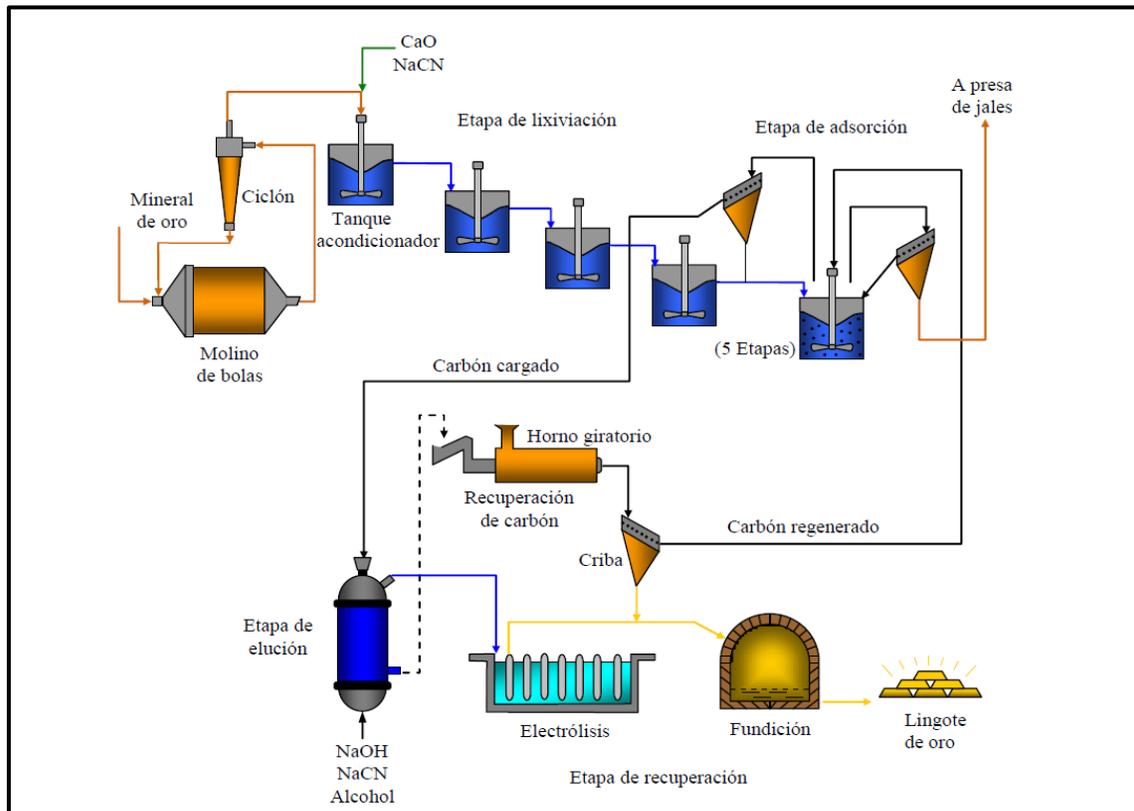


Figura 2. Diagrama de Flujo del Proceso de Adsorción en Carbón Activado.

3.3.3 Resinas de Intercambio Iónico

Las resinas de intercambio iónico son materiales que consisten en una matriz inerte y contienen grupos funcionales, tales como las aminas y esteres. Las resinas preparadas sin el uso de un solvente diluyente en el proceso tienden a tener una estructura de matriz tipo gel, mientras que los preparados con solventes tienen una estructura macroporosa más abierta. Este último se prefieren para su uso en sistemas de extracción de oro porque proporciona una alta área superficial para la adsorción de iones y tienen mejor resistencia mecánica que las resinas tipo

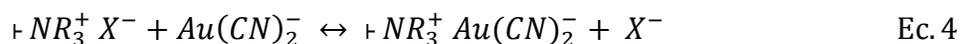
gel. Los grupos funcionales pueden intercambiar iones con otras especies iónicas con carga similar en solución, dependiendo de la preferencia de un grupo funcional particular para un ion específico. Esto depende de las propiedades del grupo funcional, la carga y tamaño de los iones en solución. Los grupos funcionales pueden ser (intercambiadores de aniones) básicos o ácidos (intercambiadores de cationes) y pueden ser clasificados además por tener propiedades débiles o fuertes, dependiendo de su grado de disociación en solución. Alternativamente, los grupos funcionales quelantes altamente selectivo se pueden unir a una matriz de resina, pero estos son de interés limitado en la extracción de oro ^[11].

La adsorción de oro y plata de soluciones de cianuro puede lograrse con resinas de base fuerte y resinas de base débil ^[11]. Las resinas de base fuerte son generalmente menos selectivas, ya que además de adsorber oro y plata atrapan otras impurezas ^[7]. Su capacidad de adsorción es grande y en este tipo de resinas el efecto de pH es bajo. Las resinas de base débil son más selectivas para adsorber oro y plata, pero tienen menor capacidad de adsorción ^[9].

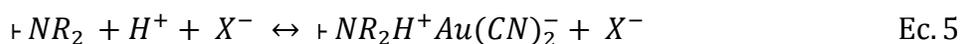
El uso de resinas de intercambio iónico para la recuperación de oro de solución de cianuro está recibiendo la mayor atención en la actualidad. El diagrama de flujo para un proceso de resina sería similar a la de un circuito de adsorción en carbón, excepto que la sección de elución no requeriría temperaturas o presiones elevadas y el horno de regeneración térmica no sería necesario ^[15].

Las reacciones de adsorción para estas resinas se describen a continuación.

Resinas Base Fuerte:



Resinas Base Débil:



Dónde:

⊢ representa la matriz polimérica de la resina

NR radical amina

X⁻ anión

3.3.4 Extracción por Solventes

La extracción por solventes es un proceso unitario para la concentración y purificación de metales contenidos en soluciones de lixiviación, donde uno de sus principales objetivos es la extracción de un metal a partir de otros contaminantes no deseados, concentra el valor metálico a un grado donde el proceso siguiente sea más económico y la recuperación sea más sencilla ^[22].

La técnica se basa en la posibilidad de encontrar un solvente orgánico, con la propiedad de ser no soluble en agua, en el cual el metal o metales de interés presenten un reparto favorable; esta operación se completa con una técnica donde el ion-metal que anteriormente habían pasado a la fase orgánica vuelva nuevamente a una fase acuosa.

El proceso de extracción por solventes es aplicado en hidrometalurgia usando una fase acuosa que viene de lixiviación con los iones metálicos y otros iones considerados contaminantes, esta fase es puesta en contacto con una fase orgánica que es capaz de extraer selectivamente los iones de interés. Esta operación se conoce como extracción.

La siguiente etapa y última de este proceso es el despojo, que consiste en poner la fase orgánica cargada en contacto con una fase acuosa (de despojo), donde los iones metálicos que se encontraban en el orgánico pasan de nuevo a la fase acuosa pero ahora con una mayor concentración. Para recuperar los valores se utiliza un proceso electroquímico y así obtener como producto un metal de mayor pureza.

Es importante entender que la extracción por solventes no constituye un sistema independiente, y por lo tanto no puede analizarse aislada de los procesos que le preceden [8].

La extracción por solventes es un proceso que consta de varias etapas siendo también un proceso cíclico como se muestra en la Figura 3.

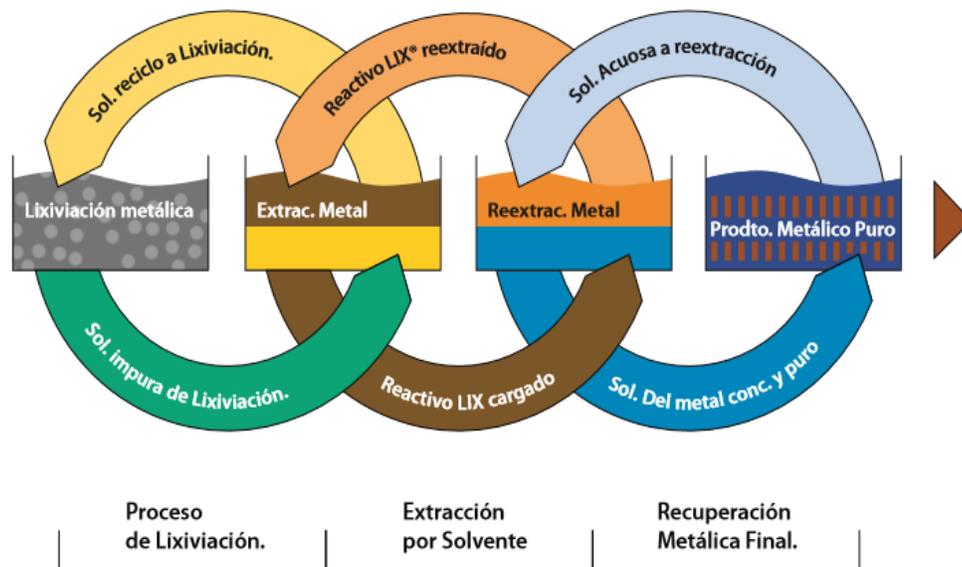


Figura 3. Esquema Generalizado para la Recuperación de Metales que Incorpora Extracción por Solventes.

3.4 Química de la Extracción por Solventes

Es una operación de equilibrio (en el proceso metalúrgico), descrito por una reacción tal como:



El proceso se lleva a cabo en dos etapas: en la primera (extracción), el ion-metal (M), se transfiere de una fase acuosa a una orgánica (R), formando un complejo órgano-metálico (RM); en este caso, el proceso requiere que la posición de equilibrio sea manejada hacia la derecha y en la segunda el proceso es la inversa de la primera. En una segunda etapa el ion-metal se transfiere de la fase orgánica a la acuosa (despojamiento), aquí el proceso requiere que la posición de equilibrio

se maneje hacia la izquierda. Por tanto, la extracción de metales por solventes es una operación sencilla que requiere solo un cambio en el equilibrio, entre las etapas de extracción y despojamiento. Esta simplicidad básica es un atractivo particular para aplicarse en los procesos metalúrgicos [22].

3.5 Coeficiente de Distribución

Un sistema de extracción por solventes implica una transferencia de masa de dos fases al estar en contacto. El ion-metal que posteriormente se encontraba en una solución acuosa, ahora se distribuye en un orgánico hasta alcanzar el equilibrio por medio de una agitación. La manera de evaluar esta distribución de las fases es utilizando los coeficientes de distribución, D . Para que un proceso sea efectivo, el coeficiente de distribución debe ser $D > 1$. El coeficiente de distribución o coeficiente de extracción se determina de la siguiente manera:

$$D = \frac{[M]_{Organica}}{[M]_{Acusa}} = \frac{M_O}{M_A} = E_A^O \quad \text{Ec. 7}$$

Dónde:

D = Coeficiente de distribución

$[M]$ = Concentración del Metal de interés

E_A^O = Coeficiente de extracción

3.6 Características Esenciales del Reactivo Extractante Orgánico

Resulta obvio que si una especie metálica va a ser transferida desde una solución acuosa proveniente de la lixiviación, hacia una solución orgánica, esta debe tener algunas características de interacción química que provoquen que esto ocurra. El componente activo de la fase orgánica que interactúa químicamente con el metal es denominado “extractante”, sin embargo, es más común que se le llame como “reactivo” [8].

En la actualidad existen extractantes orgánicos prácticamente para todos los metales. Este conocimiento se debe en gran parte a los químicos analistas, quienes han practicado la extracción por solventes para la separación de distintas sustancias desde hace ya muchos años.

En resumen, para que un reactivo pueda ser económicamente aceptable en hidrometalurgia, debe contar con una buena combinación de la mayor parte de las siguientes características, ideales para un reactivo extractante orgánico ^[8]:

- Extraer a los metales deseados con la máxima selectividad posible desde la solución que los contiene.
- Ser descargable hacia una solución desde donde pueda ocurrir en forma sencilla la recuperación del metal.
- Ser de fácil regeneración en sus características físico-químicas, para una expedita recirculación en la etapa de extracción.
- Tener la propiedad de ser lo más inmiscible posible en las soluciones acuosas que contiene el metal de interés.
- Ser estable a las condiciones del circuito, de manera que pueda ser reciclado varias veces. Para ello, debe de ser químicamente estable frente al ataque de ambientes ácidos o alcalinos.
- Ser no inflamable, no toxico, no volátil, no cancerígeno, no contaminante.
- Ser soluble en diluyentes orgánicos económicos, o ser capaz de funcionar el mismo, además como diluyente.
- Cumplir con una capacidad de carga aceptable para lograr una transferencia neta eficaz del metal extraído.
- Cargar y despojar el metal con facilidad, lo bastante rápido como para que los tiempos de mezclado resulten en equipos razonablemente económicos.
- No debe promover emulsiones estables.

3.7 Selectividad

Es la capacidad que tiene un reactivo para seleccionar un ion metálico de interés. La selectividad puede variar mediante el control de las variables tales como el pH, la concentración del reactivo, la elección del disolvente e incluso la velocidad de extracción ^[3].

3.8 Clasificación General de los Reactivos Orgánicos

En general y de acuerdo a la reacción de extracción se puede decir que existen clases o tipo de reactivos orgánicos, que sirven como extractantes para metales o complejos metálicos, caracterizados por la estructura, el mecanismo de extracción y por la especie metálica extraída. Estos reactivos pueden ser:

3.8.1 Catiónicos: Sistema presente cuando el catión metálico extraído forma un complejo coordinado, eléctricamente neutro con el extractante por el desplazamiento de un catión ^[26]. Los extractantes catiónicos a la vez se subdividen en:

3.8.1.2 Acídicos: Este tipo de reactivos extraen metales por un mecanismo de intercambio catiónico, en el cual los hidrógenos de extractante son intercambiados por iones metálicos ^[23].

3.8.1.3 Quelatantes: Tienen alta selectividad por un ion específico debido a la fuerte estabilidad de la estructura anular del complejo quelato. Tienen poder de quelación, esto quiere decir que atrapan al ion metal en forma de pinzas y son principalmente las hidroximas y derivados oxinas ^[7].

3.8.2 Aniónicos: Aquí, la especie metal aniónica se extrae como pares iónicos con un catión metálico entre las dos fases.

Los sistemas que involucran asociación iónica, son extractantes básicos de aminas: Primarias (RNH_2), secundarias (R_2NH), terciarias (R_3N) y sales de amonio cuaternarias (R_4N^+) ^[26].

3.8.3 Solvatantes o Neutros: Involucran el desplazamiento de algunas o todas las moléculas agua de un catión metal por las del extractante, formando especies solubles en la fase orgánica. La mayoría de los extractantes de este tipo son moléculas con oxígeno como éteres, ésteres, alcoholes, cetonas y compuestos organofosforosos neutros ^[26].

Un extractante raramente se usa en forma pura, generalmente se diluye en un solvente orgánico barato para mejorar las propiedades físicas ^[7].

3.9 Diluyente

El diluyente se usa para reducir la viscosidad de la fase orgánica permitiendo que fluya fácilmente, también para reducir la excesiva concentración de extractante orgánico activo y de esta manera poder adecuar la concentración de dicho extractante con el contenido de metal de la solución de lixiviación. El diluyente es por lo general, el componente de la fase orgánica que está presente en mayor proporción dentro de ella ^[22].

3.10 Modificadores

Los modificadores son los que intervienen desplazando los equilibrios de extracción y descarga. Otros actúan sobre la separación de fases facilitando la coalescencia y disminuyendo los arrastres, como también, controlan la generación de terceras fases aumentando la solubilidad de extractante orgánico y del metal en la fase orgánica ^[22].

3.11 Extracción por Solventes Utilizando LIX[®] 7820

La recuperación de oro en soluciones cianuradas por medio de extracción por solventes, consiste en extraer el anión de aurocianuro que se encuentra en la solución cianurada, adicionando un solvente orgánico. Cabe mencionar que la extracción de metales es compleja, ya que depende de ciertos factores para tener una buena recuperación del metal deseado, siendo muy importante las propiedades del extractante y las condiciones químicas de la fase acuosa, por lo que la extracción de metales por esta técnica, involucra esencialmente la química de los complejos metálicos en ambos medios (acuoso y orgánico). La extracción por solventes de aniones reversibles en soluciones alcalinas ha sido durante mucho tiempo un reto difícil. Sin embargo las aminas cuaternarias son capaces de extraer aniones en soluciones alcalinas ^[22].

El reactivo de extracción LIX[®] 7820 es una mezcla de una amina cuaternaria Aliquat 336, con un ácido débil, nonilfenol, el cual proporciona un nuevo método para la extracción por solventes de aniones en soluciones alcalinas, permitiendo que el despojo se lleve a cabo en una solución alcalina fuerte. Las aminas

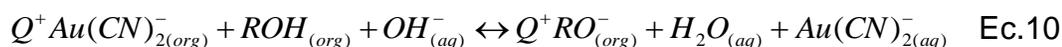
cuaternarias son conocidas por ser excelentes extractantes para muchas especies aniónicas, incluyendo los complejos de cianuro metálicos [5].

El despojo de las especies extraídas es difícil. Mediante la adición de un ácido orgánico débil soluble a la mezcla, la extracción y el despojo se puede controlar variando el pH. El ajuste de la relación de la amina cuaternaria y el ácido débil, debe ser adaptado para satisfacer las necesidades de una aplicación en particular. El proceso global se describe por las siguientes ecuaciones para la extracción de aurocianuro [5].

Extracción:



Despojamiento:



La amina cuaternaria y el ácido débil (QRO^-) es capaz de extraer un protón del agua para formar un catión (ROH) y un anion hidróxido (OH^-) en un rango de pH de 10- 10.5, por lo que la amina se separa de nonilfenol y extrae el ion aurocianuro quedando la amina unida al aurocianuro y el nonilfenol en una misma fase (orgánica). Para llevar a cabo el despojo es necesario un pH mayor que 13, donde la amina cuaternaria y el ácido débil (nonilfenol) se unen de nuevo y el ion aurocianuro pasa a la fase acuosa.

Existen extensos trabajos realizado por Riveros (1988) sugieren que los extractantes de aminas cuaternarias como Aliquat 336, Adogen 481 y Adogen 383 son extractantes prometedores por que extraen fuertemente oro, incluso cuando se diluye al 5% v/v con keroseno [16].

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4.1. Experimentación

Para realizar el trabajo experimental se utilizó el sistema Batch con el fin de determinar las mejores condiciones tanto físicas como químicas para obtener una mayor selectividad del ion aurocianuro utilizando el LIX[®] 7820. El sistema Batch consiste en la simulación del proceso de extracción por solventes por medio de embudos de separación, en los cuales se agrega la solución lixiviada y el solvente, donde posteriormente es agitada manualmente por un tiempo determinado. Finalmente se deja reposar para que ocurra la separación de fases y así poder retirar la solución acuosa de la orgánica. En la Figura 4 se muestra el diagrama de flujo para el proceso de extracción por solventes mediante el sistema Batch.

A continuación se describen los pasos realizados para poder llevar a cabo la preparación de las diferentes fases:

En la Fase acuosa se utilizó primeramente una solución sintética y posteriormente se corroboraron los resultados con una solución real. La fase acuosa sintética es una solución preparada a nivel laboratorio de la siguiente manera: se toman alrededor de 100 mL de agua deionizada en un vaso de precipitado. Se agrega 1 mL de solución estándar de oro, plata, zinc y hierro, seguido de 10 mL de la solución estándar de cobre. Posteriormente, se introduce a la solución un agitador magnético y poco a poco se añade agua deionizada hasta llegar aproximadamente a la mitad del volumen (500 ml). Mientras la solución se agita, se ajusta el pH utilizando hidróxido de sodio (NaOH) para obtener un valor mayor de 10, y poder adicionarle cianuro de sodio (NaCN), y permanezca a una concentración de 200 mg/L. Finalmente se afora en un volumen de 1 litro en una matraz volumétrico.

Cabe mencionar que estas pruebas fueron realizadas a diferentes valores de pH (10, 10.5 y 11) para cada solución sintética. El uso de ácido acético al 10% es de gran importancia para el ajuste del pH deseado.

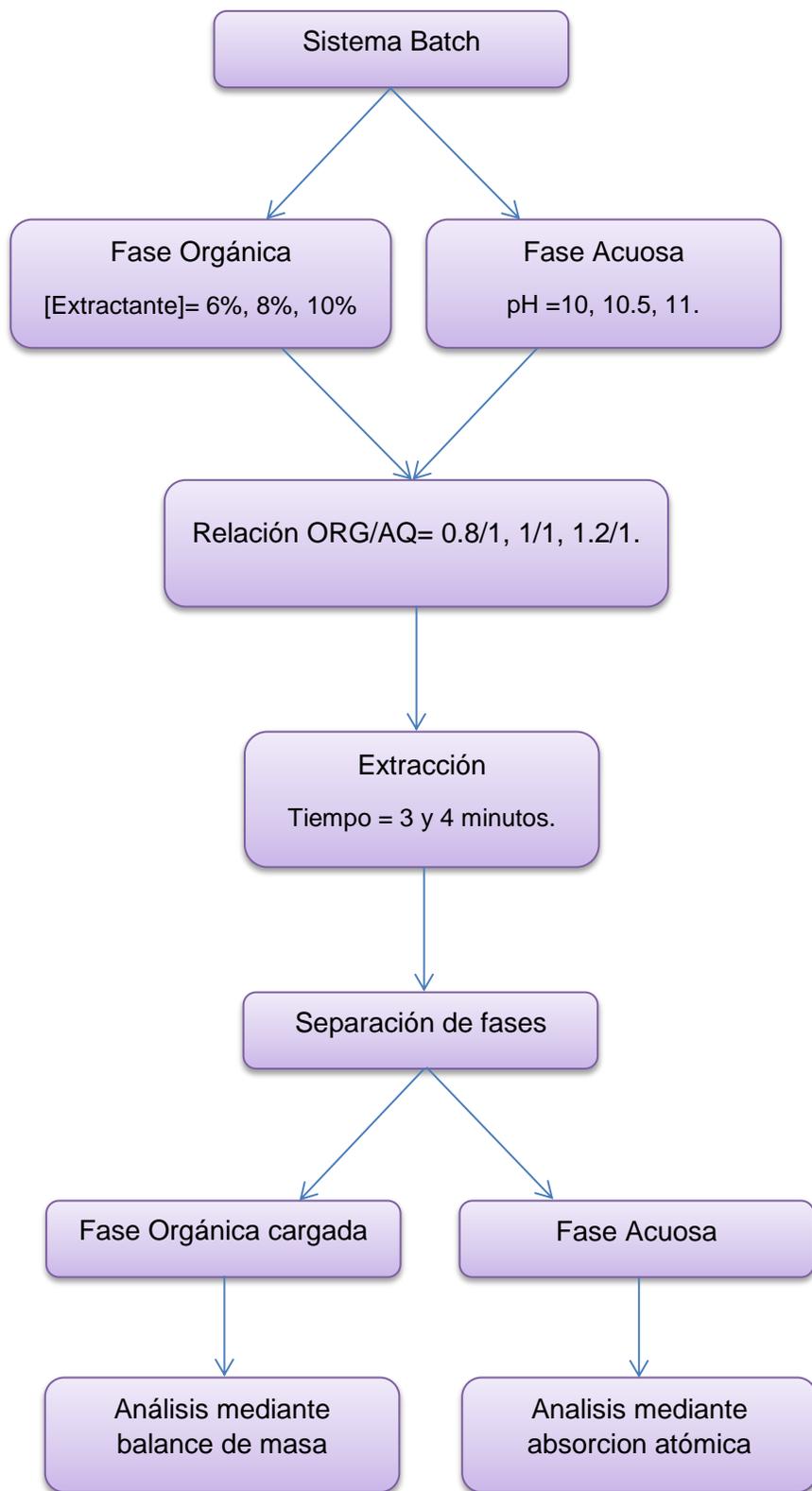


Figura 4. Diagrama de flujo del Sistema Batch.

Para realizar las pruebas con soluciones reales se utilizó una solución de lixiviación de mina La Herradura que pertenece a grupo Fresnillo plc, y está situada a 120 km de la ciudad Heroica de Caborca, Sonora. La Tabla 1 muestra la concentración de los diferentes metales contenidos en solución.

Tabla 1. *Concentración de los diferentes metales presentes en la solución de lixiviación de mina La Herradura, pH = 10.61 y 230 mgCN/L.*

Metal	Concentración mg/L
Au	0.94
Ag	4.2
Cu	2
Zn	5.1
Fe	1.25

La Fase orgánica que se utilizó durante la experimentación es una mezcla entre el extractante, modificador y el diluyente. En esta experimentación se utilizó LIX[®] 7820 que es una mezcla entre el modificador y el reactivo extractante, el cual fue proporcionado por la empresa BASF.

El solvente se realiza de la siguiente manera: en un vaso de precipitado de 1 litro se introducen 400 mL de diluyente, variando la concentración del extractante LIX[®] 7820 (6%, 8% y 10%) según los requisitos por la prueba a realizar. Mediante el uso de una propela se realiza una agitación manual, con la finalidad de dispersar el extractante en el diluyente.

Los métodos utilizados para desarrollar los objetivos del presente trabajo fueron los siguientes:

- Selectividad.

Las soluciones sintéticas y orgánicas se colocan dentro de embudos de separación a diferentes relaciones orgánico/acuoso (O/A = 0.8/1, 1/1, 1.2/1),

tomándose un tiempo de agitación de 3 minutos. Una vez agitada la solución, se deja en reposo para que logren separarse las fases, y pueda ser analizada la fase acuosa por medio de un equipo de absorción atómica, el cual permite medir el contenido de los iones metálicos ya mencionados anteriormente. A través de un balance de masa se determinan los valores metálicos en la fase orgánica:

$$V_{AQ}([Au]_E - [Au]_S) = V_{ORG}([Au]_S - [Au]_E) \quad \text{Ec. 11}$$

Las pruebas también se realizaron en un reactor de vidrio adaptado con un agitador tipo turbina a una velocidad de 200 rpm durante un tiempo de 4 minutos. Posteriormente se efectuaron los mismos pasos realizados en las pruebas de 3 minutos.

Cada prueba se hizo por triplicado con el fin de obtener resultados semejantes, y con ello generar confianza en los valores obtenidos.

- Comportamiento con soluciones reales.

Se realizó el mismo procedimiento que en las pruebas de selectividad, pero ahora con la diferencia de emplear soluciones de lixiviación de la mina La Herradura. Antes de iniciar con la experimentación, la solución proporcionada por la mina fue analizada con el equipo de absorción atómica para conocer la concentración inicial (Tabla 1).

- Cinética de extracción.

La fase orgánica se utilizó a concentraciones de 6%, 8% y 10%; sin embargo, a la solución acuosa fue necesario agregar solamente 1 mg/L de oro en 200 mg/L de cianuro de sodio, el cual cumplía el valor de pH de 10.5 deseado.

Las relaciones de orgánico/acuoso en los embudos de separación fueron de 0.8/1, 1/1 y 1.2/1. Al agregar los volúmenes correspondientes a cada embudo, se agita manualmente por 5 segundos dejándose separar las fases. Se toma una muestra de 15 mL de la fase acuosa y otros 15 mL de la solución cianurada ya antes

preparada (solución de inicio) para reponerlo de nuevo al embudo. Este procedimiento se repite cada 5 segundos, hasta alcanzar 4 minutos de agitación.

Las muestras obtenidas durante la experimentación, fueron analizadas por medio de un equipo de absorción atómica para conocer la concentración de metales en la solución acuosa, y a través de un balance de masa se determinó la concentración de iones aurocianuros presentes en la fase orgánica.

- Número de etapas.

Con una solución de oro sintética (1 mg/L) a un pH de 10.5, y un orgánico (con las concentraciones de LIX[®] 7820 de 6%, 8%, 10%), se ponen en contacto en relaciones de 10/1, 5/1, 2/1, 1/1, 1/2, 1/5, 1/10 a tiempos de 3 y 4 minutos respectivamente. Se tomaron muestras a cada uno de los experimentos, las cuales posteriormente se analizaron. El diagrama de McCabe-Thiele se determinó con los datos obtenidos en el análisis de las muestras, con la cual se trazó la isoterma de equilibrio y así poder determinar el número de etapas del proceso de extracción por solventes.

4.2 Variables Experimentales

Las variables experimentales utilizadas en este trabajo son las siguientes:

- ❖ Concentración del extractante =6%, 8%, 10%.
- ❖ pH =10, 10.5, 11.
- ❖ Relación de fases orgánica/acuosa =0.8/1, 1/1, 1.2/1.
- ❖ Tiempo de agitación = 3 minutos y 4 minutos

4.3 Material, Equipo y Reactivos

Material:

- Matraz volumétrico.
- Embudos de separación.
- Pipetas.
- Viales de plástico.
- Soporte universal.

- Propela de acero inoxidable.
- Vasos de precipitados.
- Probetas graduadas.
- Imán para agitador magnético.

Equipo:

- Medidor de pH Thermo Scientific Orion 4 Star.
- Equipo de Absorción Atómica Perkin Elmer, Modelo AANALYST 400.
- Agitador magnético.
- Reactor de vidrio.

Reactivos:

- Cianuro de sodio.
- Hidróxido de sodio.
- Ácido acético.
- Agua deionizada.
- Solución estándar de Au, Ag, Cu, Zn y Fe.
- Keroseno.
- Extractante LIX[®] 7820.
- Licor de lixiviación de mina La Herradura.

Tabla 2. *Propiedades físicas del LIX[®] 7820:*

Apariencia del extractante	Fluido líquido ámbar
Gravedad Específica (25°/25°)	0.866
Punto de inflamación	>160° F = 71.1° C
Viscosidad cinemática (25° C)	50.7 centi poises
Punto de fluidez	<-42° C

Tabla 3. *Propiedades de rendimiento proporcionado por el fabricante:*

Carga máxima de $Au(CN)_2^-$	>0.4 gpl Au
Cinética de extracción	>95% @ 30 seg.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Porcentaje de Extracción

Se le conoce como la transferencia de los iones metálicos que inicialmente se encontraban en la solución alcalina cianurada hacia la fase orgánica. Para conocer el porcentaje de extracción se utilizó la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Extracción} = \frac{100}{1 + \frac{V_o}{E^\circ * V_a}} \quad \text{Ec. 12}$$

Dónde:

V_a = Volumen de la fase acuosa.

V_o = Volumen de la fase orgánica.

E° = Coeficiente de extracción.

5.1.1 Porcentaje de Extracción con un tiempo de agitación de 3 minutos.

Las Tablas 4, 5, 6 muestran el porcentaje de extracción a diferentes concentraciones de extractante LIX[®]7820, así como variaciones de relación de fases y pH en soluciones sintéticas.

En la Tabla 4 se puede observar que se obtuvo un porcentaje del 94% de extracción de oro a pH de 10.04 y 10.5, sin embargo a pH de 11 se tiene menor porcentaje de extracción de oro, esto puede deberse a que la solución es muy alcalina. Las mejores condiciones fueron a una concentración = 6% LIX[®] 7820 a una relación 1/1 y pH = 10.5, ya que a esta relación el tiempo de separación de fases es relativamente rápida y la extracción de hierro es menor.

Tabla 4. Extracción de oro utilizando una concentración = 6% LIX[®] 7820.

Muestra	pH Inicial	Relación ORG\AQ	Tiempo de Separación (minutos)	pH Final	Au	Extracción (%)			
						Ag	Cu	Zn	Fe
A1	10.04	0.8\1	5.45	6.81	94	94	94	94	79.83
A2	10.04	1\1	5.17	6.66	94	94	94	15.43	94
A3	10.04	1.2\1	3.52	6.6	94	94	93.78	90.86	69
B1	10.5	0.8\1	2.06	6.88	94	94	94	94	94
B2	10.5	1\1	2.28	6.64	94	94	94	94	92.78
B3	10.5	1.2\1	3.52	6.8	94	94	93.9	96	79.52
C1	11.02	0.8\1	2.11	7.21	89.25	94	94	94	94
C2	11.02	1\1	2.04	7	90.58	94	94	94	94
C3	11.02	1.2\1	2.12	6.91	91	94	94	94	94

En la Tabla 5 se puede observar que se obtuvo un porcentaje del 95% de extracción de oro a pH de 10.06 y 10.98, sin embargo a pH de 10.49 se tiene menor porcentaje de extracción de oro. Las mejores condiciones se obtienen utilizando una concentración = 8% LIX[®] 7820 a una relación de 1/1 y pH = 10.5, ya que a esta relación el tiempo de separación de fases es relativamente rápida y la extracción de hierro es menor.

Tabla 5. Extracción de oro utilizando una concentración = 8% LIX[®] 7820.

Muestra	pH Inicial	Relación ORG\AQ	Tiempo de Separación (Minutos)	pH Final	Au	Extracción (%)			
						Ag	Cu	Zn	Fe
D1	10.06	0.8\1	4.25	6.62	95	95	95	95	91.34
D2	10.06	1\1	3.14	6.34	95	95	95	95	78.40
D3	10.06	1.2\1	4.25	6.42	95	95	95	95	73.11
E1	10.49	0.8\1	3.39	6.69	94.63	95	95	95	95
E2	10.49	1\1	3.21	6.61	94.25	95	95	95	77.10
E3	10.49	1.2\1	3.28	6.29	94.57	95	95	95	95
F1	10.98	0.8\1	3.39	6.96	95	94.49	94.98	77.36	93.63
F2	10.98	1\1	3.42	6.7	95	95	94.76	73.86	95
F3	10.98	1.2\1	4.21	6.7	95	95	95	7.21	95

En la Tabla 6 se puede observar que se obtuvo un porcentaje del 96% de extracción de oro, plata, cobre y zinc. Las mejores condiciones utilizando una concentración = 10% LIX[®] 7820 es a la relación 1/1 y pH = 10.5, ya que a esta relación el tiempo de separación de fases es rápida y la extracción de hierro es menor.

Tabla 6. Extracción de oro utilizando una concentración = 10% LIX[®] 7820.

Muestra	pH Inicial	Relación ORG\AQ	Tiempo de Separación (Minutos)	pH Final	Extracción (%)				
					Au	Ag	Cu	Zn	Fe
G1	10.05	0.8\1	5.33	6.66	96	96	96	96	76.32
G2	10.05	1\1	3.33	6.5	96	96	96	96	64.29
G3	10.05	1.2\1	4.04	6.34	96	96	96	96	43.75
H1	10.51	0.8\1	3.26	6.75	96	96	96	96	53.72
H2	10.51	1\1	2.42	6.63	96	96	96	96	27.39
H3	10.51	1.2\1	3.11	6.39	96	96	96	96	28.9
I1	10.96	0.8\1	3.51	6.77	96	96	96	96	83.9
I2	10.96	1\1	4.19	6.66	96	96	96	96	59.27
I3	10.96	1.2\1	4.47	6.55	96	96	96	96	58.42

Mediante el análisis de resultados de la información anterior, se puede observar que la condición que favorece una mejor extracción de los iones aurocianuros con un tiempo de agitación de 3 minutos es a un pH = 10.5, donde se tiene menor tiempo de separación, la concentración = 10% de LIX[®]7820 y la relación de fase orgánico/acuoso = 1/1. Es importante notar que en el presente estudio el porcentaje de extracción de oro es de un 96%, y la concentración de hierro decrece, lo cual favorece al sistema, ya que este metal es uno de los principales contaminantes del proceso.

5.1.2 Porcentaje de Extracción con un tiempo de agitación de 4 minutos.

Las Tablas 7, 8 y 9 muestran el porcentaje de extracción a diferentes concentraciones de extractante LIX[®] 7820, así como las variaciones de relación de fases y de pH en soluciones sintéticas.

En la Tabla 7 se puede observar que el porcentaje de extracción de oro varía dependiendo del pH, sin embargo a pH de 10.4 se tiene un mayor porcentaje de extracción de oro, esto puede deberse al nivel de pH con el que se trabajó. Las mejores condiciones utilizando una concentración = 6% LIX[®] 7820 es a una relación 1/1 y pH = 10.04, ya que a esta relación el tiempo de separación de fases es relativamente rápida y la extracción de hierro es menor.

Tabla 7. Extracción de oro utilizando una concentración = 6% LIX[®] 7820.

Muestra	pH Inicial	Relación ORG\AQ	Tiempo de Separación (minutos)	pH Final	Extracción (%)				
					Au	Ag	Cu	Zn	Fe
J1	10.04	0.8\1	4.18	7.02	92.48	94	94	94	74.66
J2	10.04	1\1	4.12	7.04	93.51	94	94	94	58.12
J3	10.04	1.2\1	4.08	6.85	93.51	94	94	94	72.96
K1	10.5	0.8\1	4.30	7.22	84	94	94	94	88.10
K2	10.5	1\1	6.04	7.15	84.71	94	94	94	78.95
K3	10.5	1.2\1	5.19	7.03	91.97	94	94	94	80.65
L1	10.98	0.8\1	3.51	7.5	85.40	94	94	94	79.23
L2	10.98	1\1	4.41	7.23	90.55	94	94	94	86.64
L3	10.98	1.2\1	4.05	7.15	92.27	94	94	94	91

En la Tabla 8 se observa un porcentaje del 95% de extracción de oro a pH de 10.47 y 10.95, sin embargo a pH de 10.07 se tiene un menor porcentaje de extracción a relación de 0.8/1. Las mejores condiciones utilizando una concentración = 8% LIX[®] 7820 es a la relación 1/1 y pH = 10.5, ya que a esta relación el tiempo de separación de fases es relativamente rápida y la extracción de hierro es menor.

Tabla 8. Extracción de oro utilizando una concentración = 8% LIX[®] 7820.

Muestra	pH Inicial	Relación ORG\AQ	Tiempo de Separación (minutos)	pH Final	Au	Extracción (%)			
						Ag	Cu	Zn	Fe
M1	10.07	0.8\1	4.21	6.86	94.08	95	95	95	55.74
M2	10.07	1\1	4.26	6.62	94.74	95	95	95	58.15
M3	10.07	1.2\1	4.14	6.52	95	95	95	95	27.16
N1	10.47	0.8\1	3.28	6.85	95	95	95	95	61.18
N2	10.47	1\1	3.48	6.56	95	95	95	95	44.09
N3	10.47	1.2\1	3.41	6.63	95	95	95	95	64.82
O1	10.95	0.8\1	3.47	6.89	95	94.38	95	95	82.05
O2	10.95	1\1	3.38	6.7	95	94.69	95	95	92.68
O3	10.95	1.2\1	3.42	6.6	95	94.69	95	95	57.63

En la Tabla 9 se obtuvo un porcentaje del 96 % de extracción de oro a pH de 10 y 10.53, sin embargo a pH de 11.02 se puede observar que se tiene un menor porcentaje de extracción, esto se puede deber a que la solución es muy alcalina. Las mejores condiciones utilizando una concentración = 10% LIX[®] 7820 es a la relación 1.2/1 y pH = 10.53, ya que a esta relación el tiempo de separación de fases es relativamente rápida y la extracción de hierro es menor.

Tabla 9. Extracción de oro utilizando una concentración = 10% LIX[®] 7820.

Muestra	pH Inicial	Relación ORG\AQ	Tiempo de Separación (minutos)	pH Final	Au	Extracción (%)			
						Ag	Cu	Zn	Fe
P1	10	0.8\1	5.10	6.58	96	96	96	96	96
P2	10	1\1	5.13	6.44	96	96	96	96	96
P3	10	1.2\1	4.08	6.46	96	96	96	96	96
Q1	10.53	0.8\1	8.33	6.59	96	96	96	96	93.7
Q2	10.53	1\1	8.17	6.49	96	96	96	96	86.9
Q3	10.53	1.2\1	7.13	6.38	96	96	96	96	48.9
R1	11.02	0.8\1	4.29	6.79	94.17	96	96	96	96
R2	11.02	1\1	3.50	6.62	94.61	96	96	96	86.54
R3	11.02	1.2\1	4.51	6.56	95.67	96	96	96	86.74

Los resultados experimentales mostrados en las Tablas anteriores indican que las condiciones que favorecen mejor la extracción de los iones aurocianos con un tiempo de agitación de 4 minutos es a un pH = 10.3, donde la concentración = 8% de LIX[®] 7820 y una relación orgánico/acuoso = 1.2/1. La recuperación de oro es a

un 95%, pero haciendo un análisis de resultados es un valor eficiente, obteniendo un porcentaje menor de hierro. El tiempo de separación es muy bueno, ya que se encuentra en un rango muy pequeño comparado con otros.

5.1.3 Porcentaje de Extracción en soluciones reales.

A continuación se presentan las Tablas 10 y 11 con los datos del porcentaje de extracción de la experimentación hecha para soluciones reales (soluciones de mina La Herradura), donde se variaron las concentraciones de extractante LIX[®] 7820, al igual que la relación de fase orgánico/acuoso. Cabe mencionar que la solución de La Herradura tiene un pH = 10.6, la cual se mantiene siempre constante.

En la Tabla 10 se puede observar que el porcentaje de extracción de oro varía dependiendo de la concentración del extractante LIX[®] 7820 y que el tiempo de separación utilizando soluciones reales de lixiviación es más rápido que las muestras realizadas con soluciones sintéticas, esto puede deberse a que las soluciones reales tiene más oxígeno presente. Las mejores condiciones utilizando soluciones reales de lixiviación es a una concentración = 6% LIX[®] 7820 a una relación 0.8/1, ya que el tiempo de separación de fases es relativamente rápida y se tiene mayor porcentaje de extracción.

Tabla 10. *Extracción de oro variando la concentración de LIX[®] 7820 a una agitación de 3 minutos.*

Muestra	Concentración de Extractante	Relación ORG\AQ	Tiempo de Separación (minutos)	pH Final	Extracción (%)				
					Au	Ag	Cu	Zn	Fe
MR1	6%	0.8\1	2.05	8.44	94	87.17	93.99	93.98	94
MR2	6%	1\1	2.15	8.32	94	89.56	94	94	94
MR3	6%	1.2\1	2.09	8.07	93.99	90.27	94	94	93.99
MR4	8%	0.8\1	1.44	8.19	90.27	90.39	92.2	94.91	94.48
MR5	8%	1\1	1.38	8.01	94.33	91.39	92.95	94.98	95
MR6	8%	1.2\1	1.45	7.88	93.98	91.87	92.93	95	95
MR7	10%	0.8\1	2.15	7.96	94	92.66	96	96	96
MR8	10%	1\1	2.14	7.79	94	93.11	96	96	96
MR9	10%	1.2\1	2.12	7.63	93.99	93.42	96	96	96

En la Tabla 11 se puede observar que el porcentaje de extracción de oro varía dependiendo de la concentración del extractante LIX[®] 7820 y que el tiempo de separación utilizando soluciones reales de lixiviación es más rápido que las muestras realizadas con soluciones sintéticas, esto puede deberse a que las soluciones reales tienen más oxígeno presente. Las mejores condiciones utilizando soluciones reales de lixiviación es a una concentración del 10% de extractante LIX[®] 7820 a una relación 1/1, ya que a esta relación el tiempo de separación de fases es relativamente rápida y se tiene mayor porcentaje de extracción de oro.

Tabla 11. *Extracción de oro variando la concentración de LIX[®] 7820 a una agitación de 4 minutos.*

Muestra	Concentración de Extractante	Relación ORG\AQ	Tiempo de Separación (minutos)	pH Final	Extracción (%)				
					Au	Ag	Cu	Zn	Fe
MR10	6%	0.8\1	2.42	8.42	94	91.06	93.99	93.99	93.99
MR11	6%	1\1	2.03	8.23	94	91.82	94	94	94
MR12	6%	1.2\1	2.02	8.12	93.99	92.32	94	94	94
MR13	8%	0.8\1	1.56	8.22	94.99	92.92	95	95	94.99
MR14	8%	1\1	1.49	7.93	94.99	93.49	95	95	95
MR15	8%	1.2\1	0.57	7.7	94.99	93.97	94.99	94.99	94.99
MR16	10%	0.8\1	3.13	7.96	96	94.70	96	96	96
MR17	10%	1\1	2.10	7.8	96	95.16	96	96	96

El análisis de resultado muestra que las condiciones que favorecen mejor la extracción de los iones aurocianuro es a un tiempo de agitación de 3 minutos, a una concentración de extractante de LIX[®] 7820 al 8% y una relación de fase orgánico/acuoso = 1/1 dando como resultado una extracción de oro de 94.33%, siendo un valor no de los más altos, pero con menor porcentaje de extracción de otros cianoaniones presentes en la solución.

Comparando los resultados de las soluciones reales con las sintéticas, se pueden observar que al poner el reactivo en contacto con una solución real de lixiviación se tiene un tiempo de separación menor que el tiempo obtenido con muestras realizadas mediante soluciones sintéticas y menor porcentaje de extracción de plata en soluciones reales.

5.2 Selectividad

La selectividad cumple una gran función en el análisis porque indica que tan efectivo es el solvente para extraer el metal deseado, es decir, la afinidad que tiene éste hacia el ion aurocianuro con respecto a otros metales. La selectividad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Selectividad(Sc) = \frac{E^{\circ}(Au)}{E^{\circ}(M)} \quad Ec.13$$

Dónde:

$E^{\circ}Au$ = Coeficiente de extracción del oro.

$E^{\circ}M$ = Coeficiente de extracción de otro cianoaniones.

5.2.1 Selectividad en soluciones sintéticas.

En las Figuras 5, 6 y 7 se muestra la selectividad del extractante LIX[®] 7820 en soluciones sintéticas a una concentración de reactivo = 6%, 3 minutos de agitación, a diferentes pH y relaciones de orgánico/ acuoso.

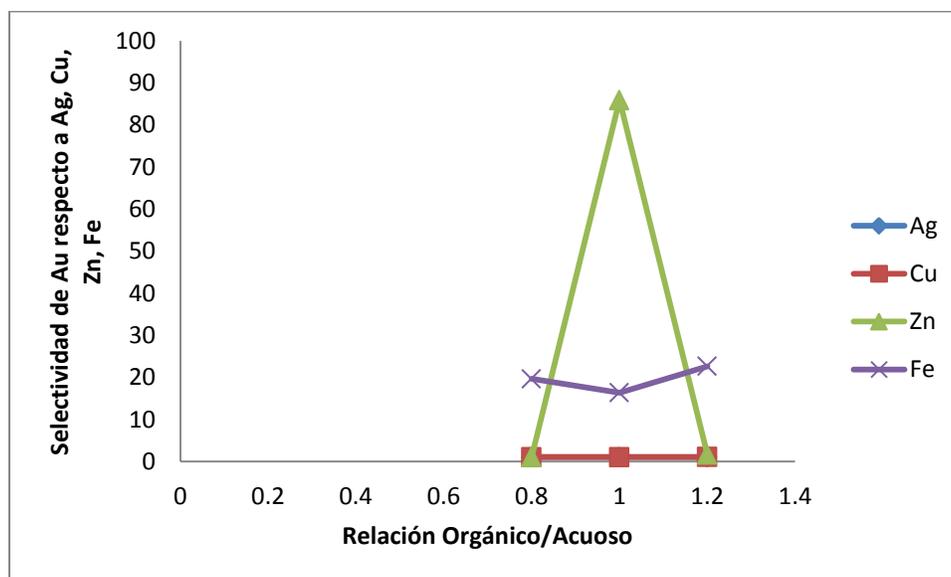


Figura 5. Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 6%, y pH = 10.02.

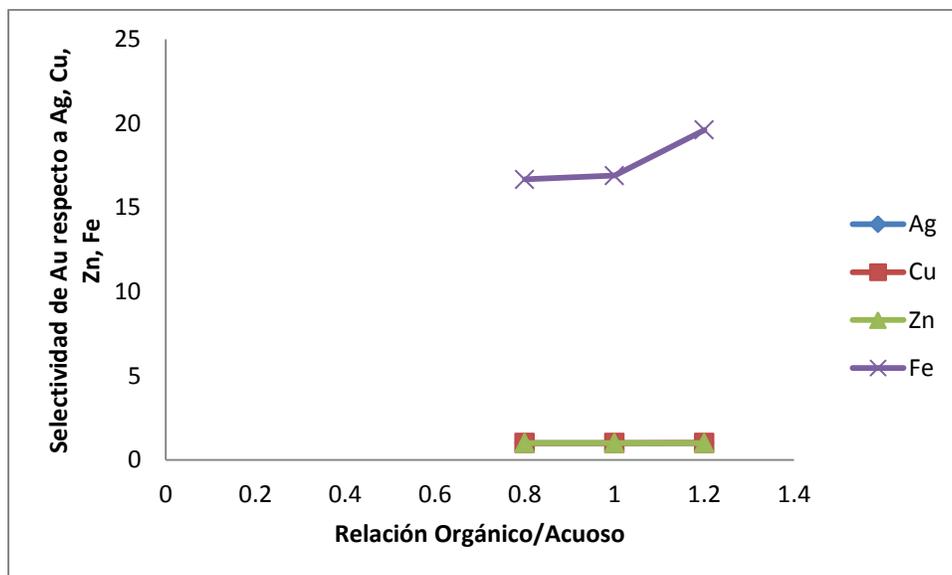


Figura 6. Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 6%, y pH = 10.5.

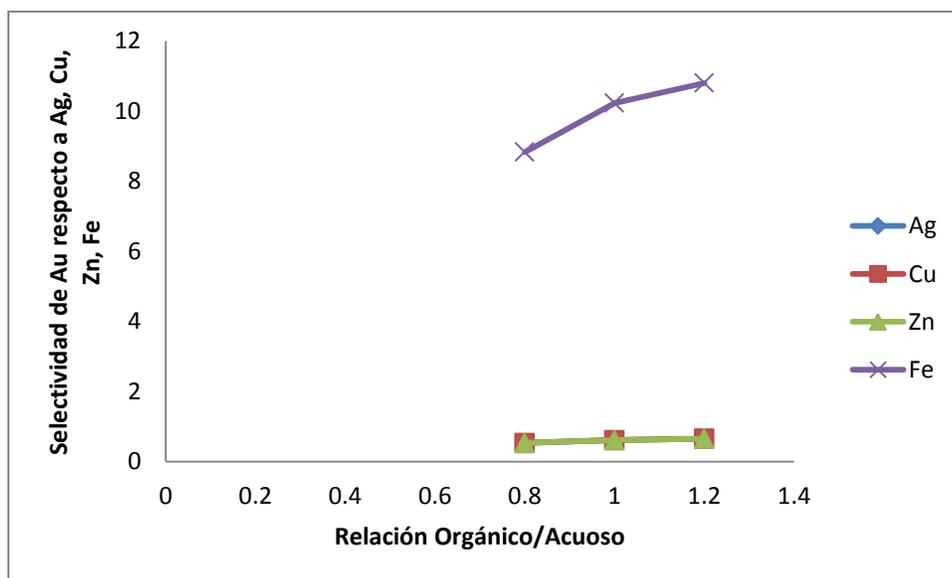


Figura 7. Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 6%, y pH = 11.

En las Figuras anteriores se puede observar que la selectividad es baja para el oro sobre otros cianoaniones a pH de 11, esto se puede deber a que la solución es muy alcalina, además que a cualquiera de los pH analizados se tiene poca selectividad para el hierro.

En las Figuras 8, 9 y 10 se muestra la selectividad del extractante LIX[®] 7820 en soluciones sintéticas a una concentración de reactivo = 8%, 3 minutos de agitación, a diferentes pH y relaciones de orgánico/ acuoso.

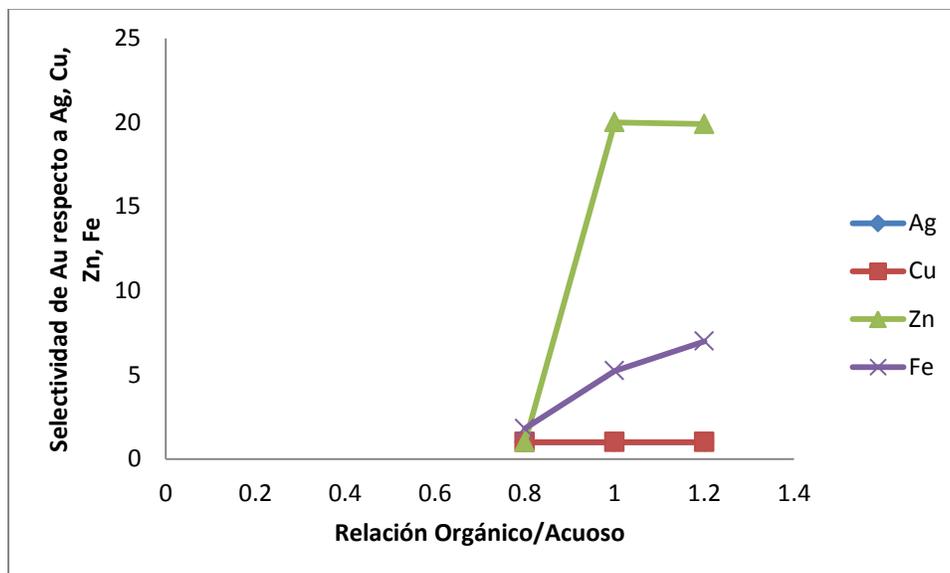


Figura 8. Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 8%, y pH = 10.03.

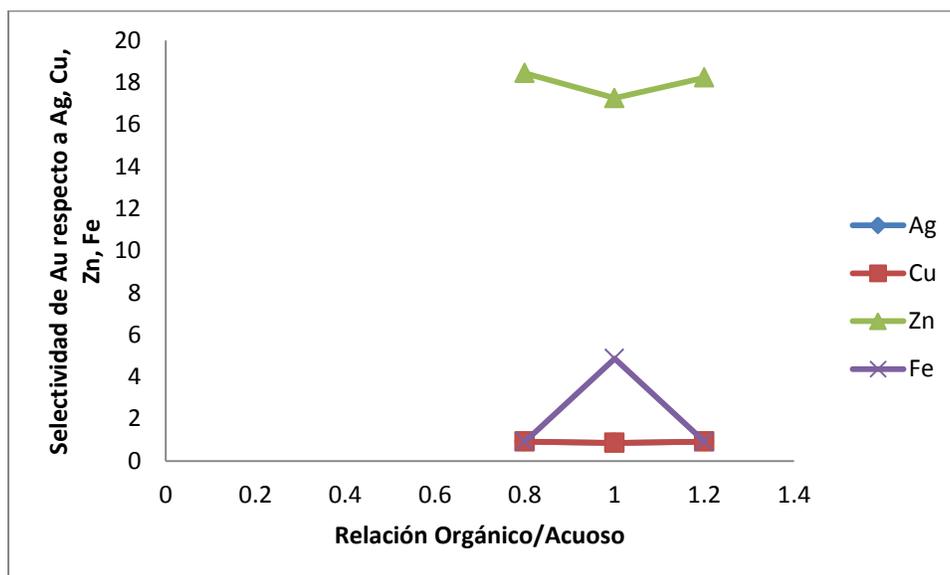


Figura 9. Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 8%, y pH = 10.49.

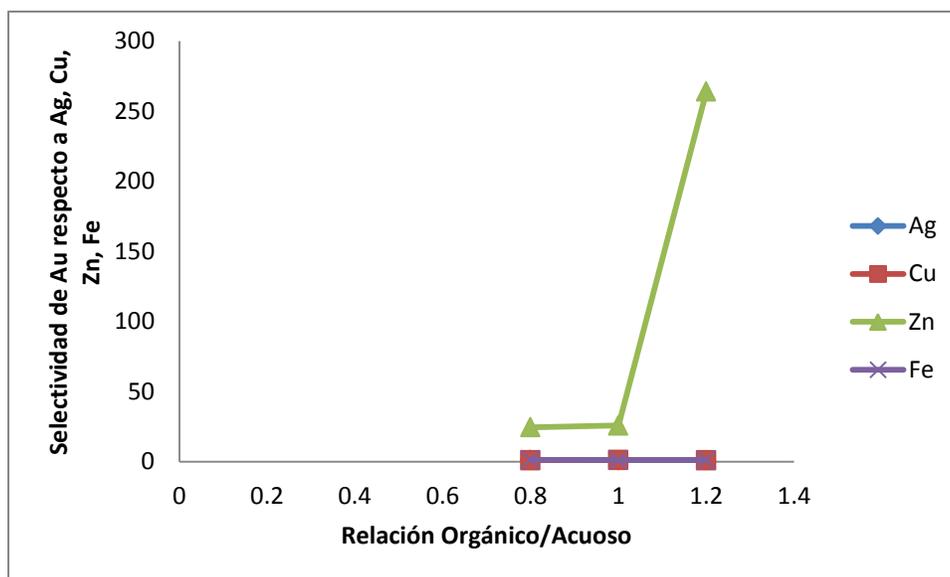


Figura 10. Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 8%, y pH = 11.

En las Figuras anteriores se puede observar que la selectividad es baja para el oro sobre otros cianoaniones a pH de 10.49, sin embargo para los otros diferentes pH presenta la misma selectividad, además presenta poca selectividad para el zinc a pH = 10.03.

En las Figuras 11, 12 y 13 se muestra la selectividad del extractante LIX[®] 7820 en soluciones sintéticas a una concentración de reactivo = 10%, 3 minutos de agitación, a diferentes pH y relaciones de orgánico/ acuoso.

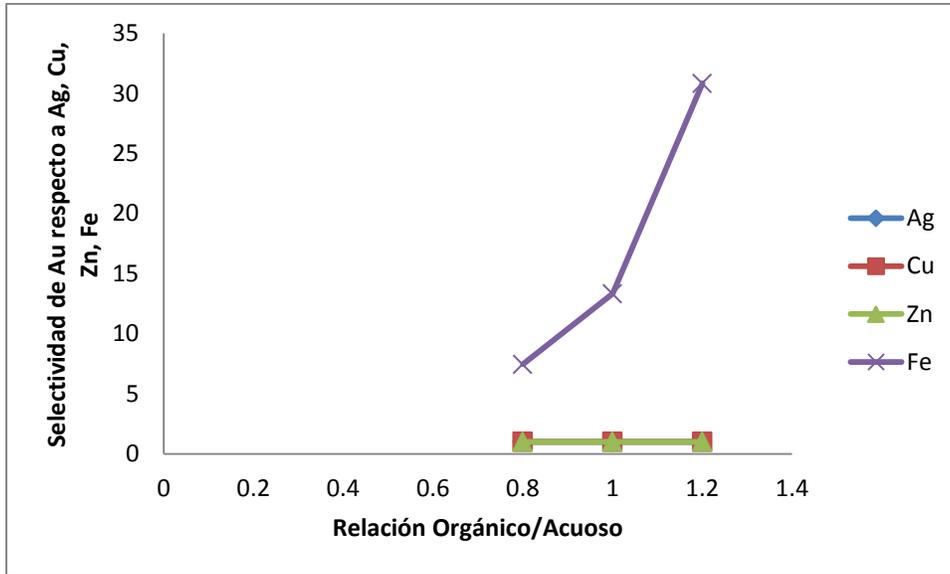


Figura 11. Selectividad de LIX® 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 10%, y pH = 10.02.

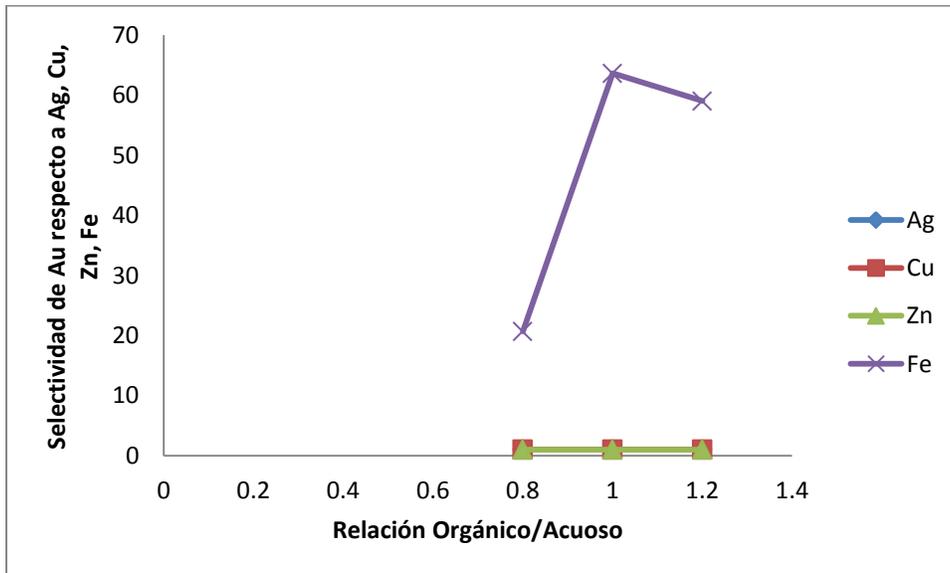


Figura 12. Selectividad de LIX® 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 10%, y pH = 10.51.

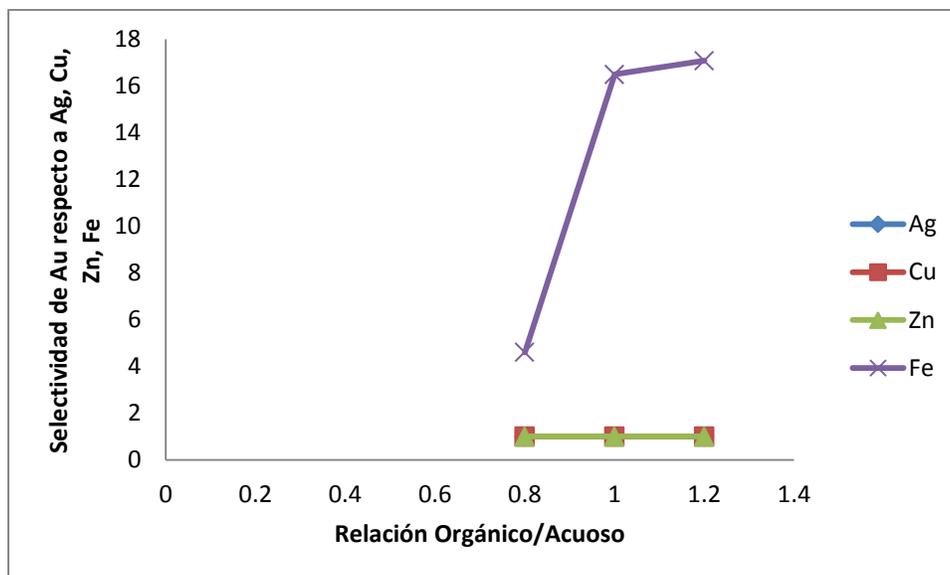


Figura 13. Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 10%, y pH = 10.98.

En las Figuras anteriores se puede observar que la selectividad del oro es igual para casi todos los cianoaniones presentes en la solución, excepto para el hierro, donde la selectividad del extractante es menor respecto a la del oro.

En las Figuras 14, 15 y 16 se muestra la selectividad del extractante LIX[®] 7820 en soluciones sintéticas a una concentración de reactivo = 6%, 4 minutos de agitación, a diferentes pH y relaciones de orgánico/ acuoso

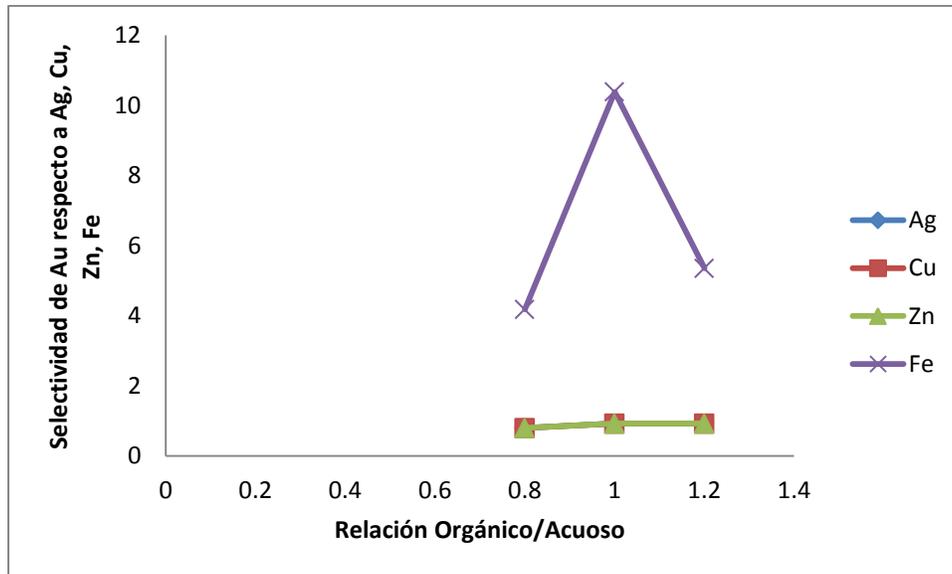


Figura 14. Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 6%, y pH = 10.04.

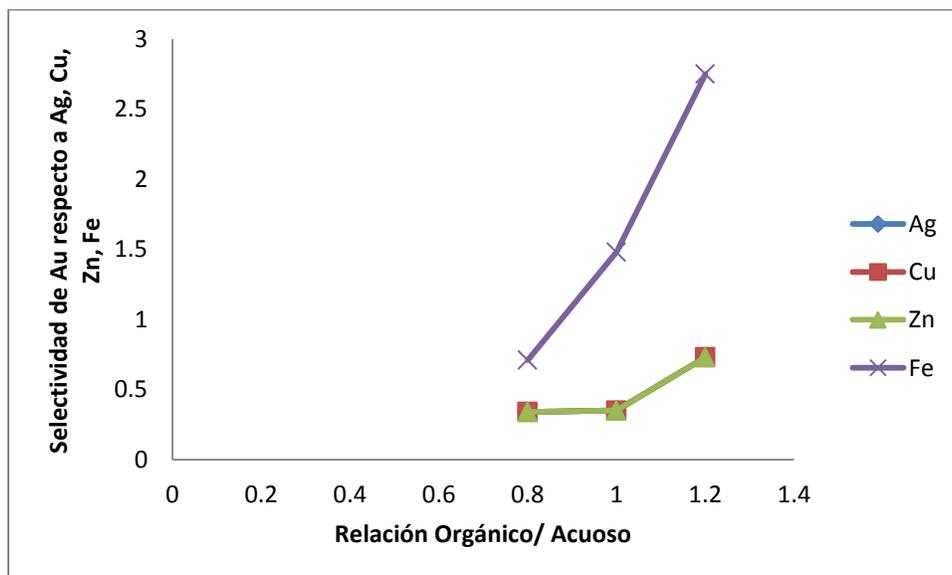


Figura 15. Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 6%, y pH = 10.5.

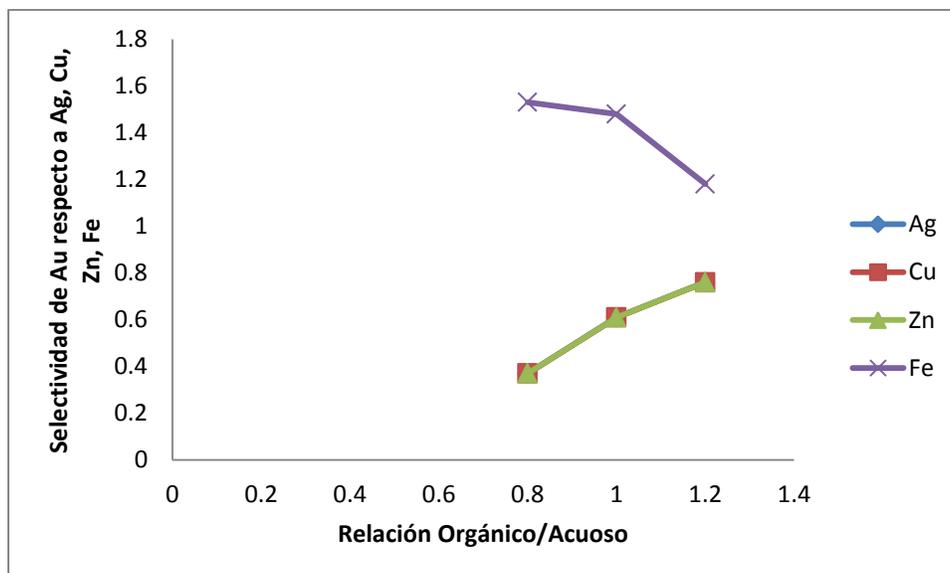


Figura 16. Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 6%, y pH = 10.98.

En las Figuras anteriores, se puede observar que la selectividad es baja para el oro sobre otros cianoaniones presentes en la solución a cualquier pH, esto se puede deber a que se tiene mayor tiempo de contacto.

En las Figuras 17, 18 y 19 se muestra la selectividad del extractante LIX[®] 7820 en soluciones sintéticas a una concentración de reactivo = 8%, 4 minutos de agitación, a diferentes pH y relaciones de orgánico/ acuoso

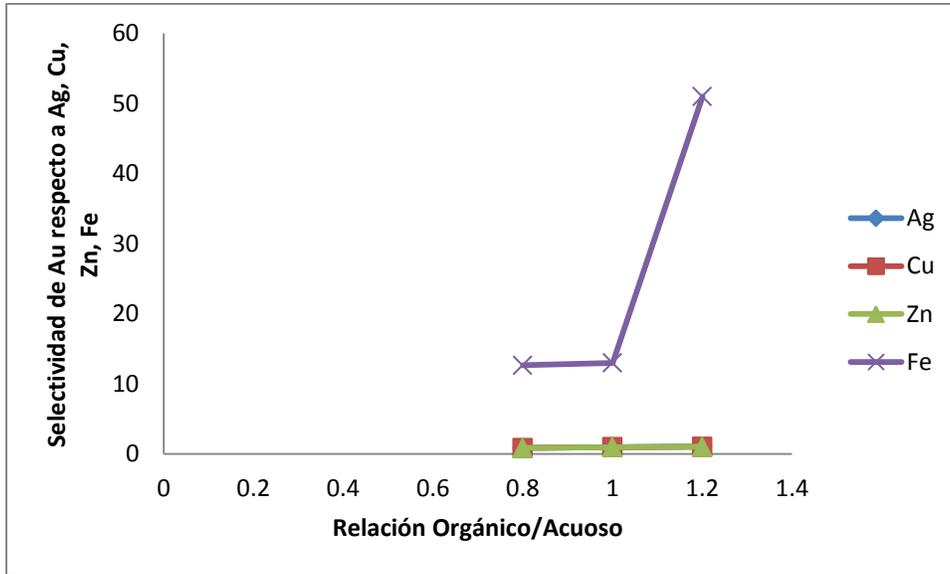


Figura 17. Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 8%, y pH = 10.07.

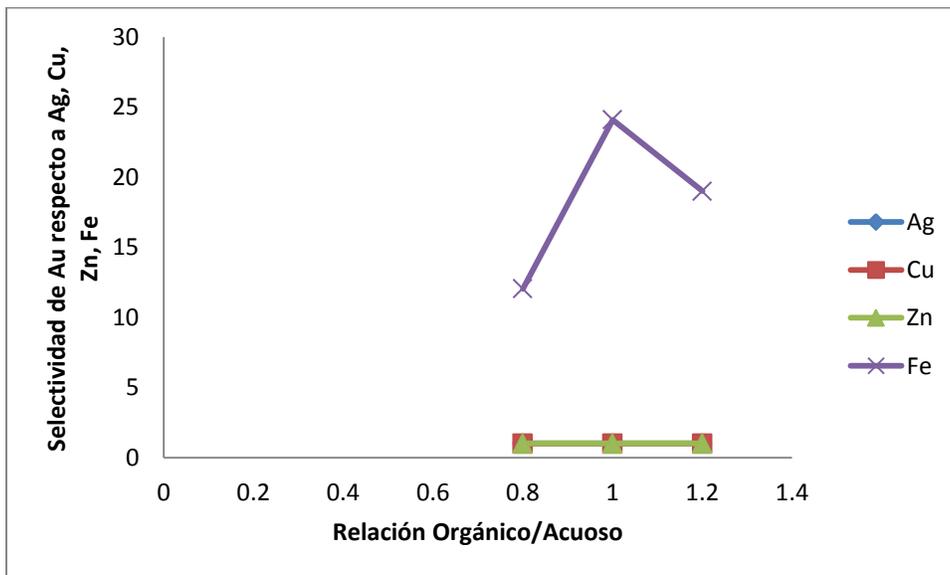


Figura 18. Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 8%, y pH = 10.47.

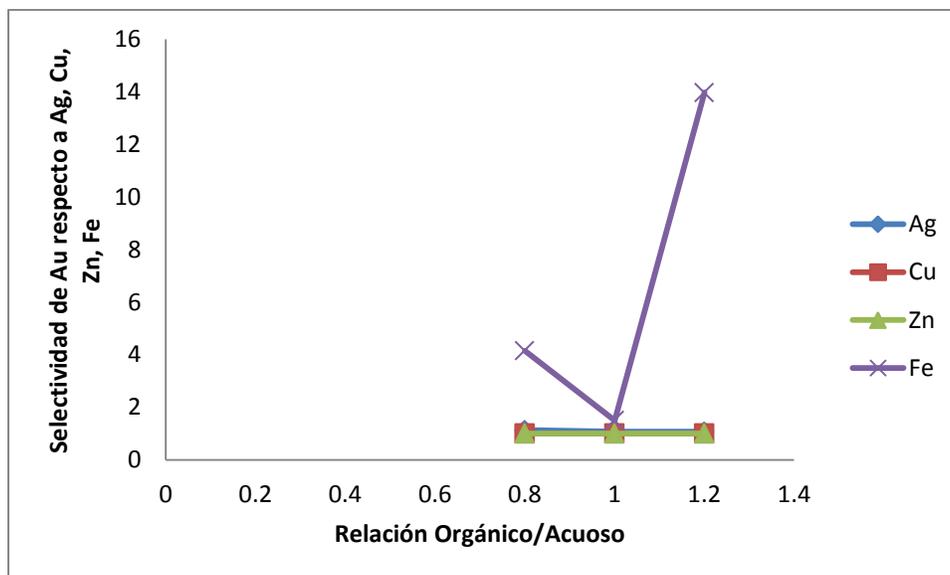


Figura 19. Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 8%, y pH = 10.95.

En las Figuras anteriores se puede observar que la selectividad de oro es igual que para otros cianoaniones presentes en la solución a pH de 10.47 y 10.95, excepto para el hierro, que presenta una baja afinidad al reactivo.

En las Figuras 20, 21 y 22 se muestra la selectividad del extractante LIX[®] 7820 en soluciones sintéticas a una concentración de reactivo = 10%, 4 minutos de agitación, a diferentes pH y relaciones de orgánico/ acuoso.

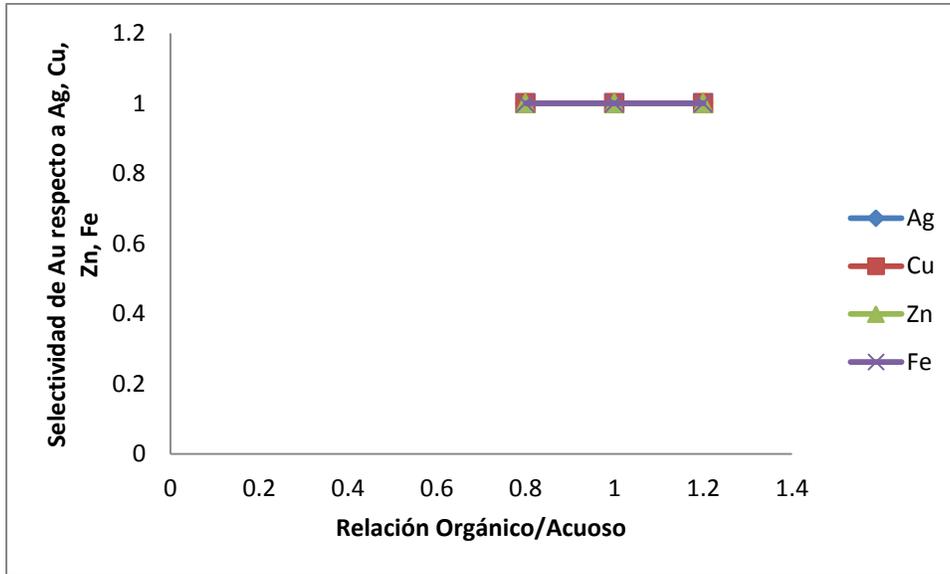


Figura 20. Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 10%, y pH = 10.

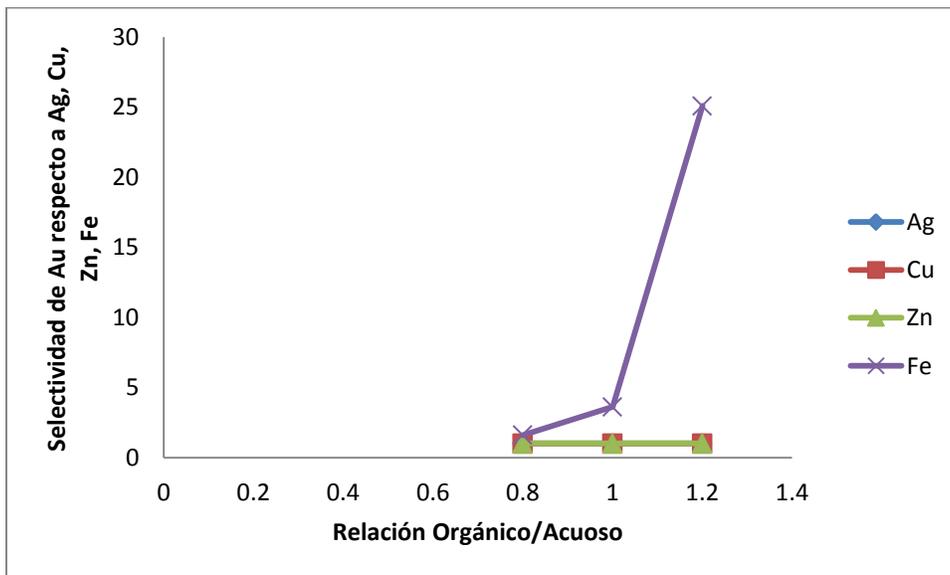


Figura 21. Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 10%, y pH = 10.53.

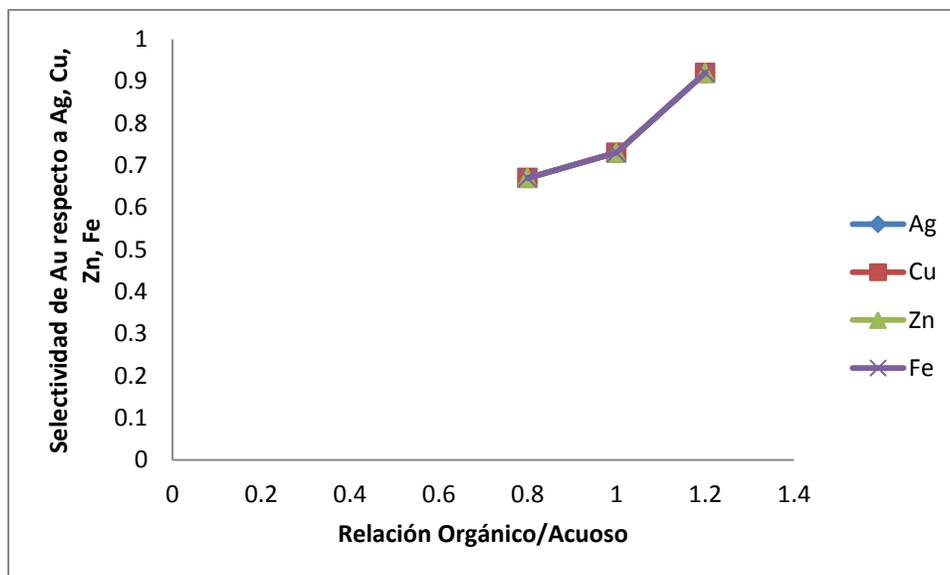


Figura 22. Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 10%, y pH = 11.02.

En las Figuras anteriores se puede observar que la selectividad es baja para el oro sobre otros cianoaniones presentes en la solución a pH de 11.02 esto se puede deber a que la solución es muy alcalina, además, a pH = 10.53 se tiene menor afinidad del reactivo

En base a la información de las gráficas anteriores se puede apreciar que la selectividad del extractante se da, dependiendo de la concentración de LIX[®] 7820, el pH de la solución, la relación de fase y el tiempo de agitación ya que a mayor agitación se obtiene menor selectividad para el oro.

5.2.2 Comportamiento de la selectividad en soluciones reales.

En las Figuras 23, 24 y 25 se muestra cómo se comporta la selectividad del extractante LIX[®] 7820 al estar en contacto con una solución de lixiviación real a un pH de 10.61, un tiempo de agitación de 3 minutos, a diferentes concentraciones del reactivo y diferente relación de fases.

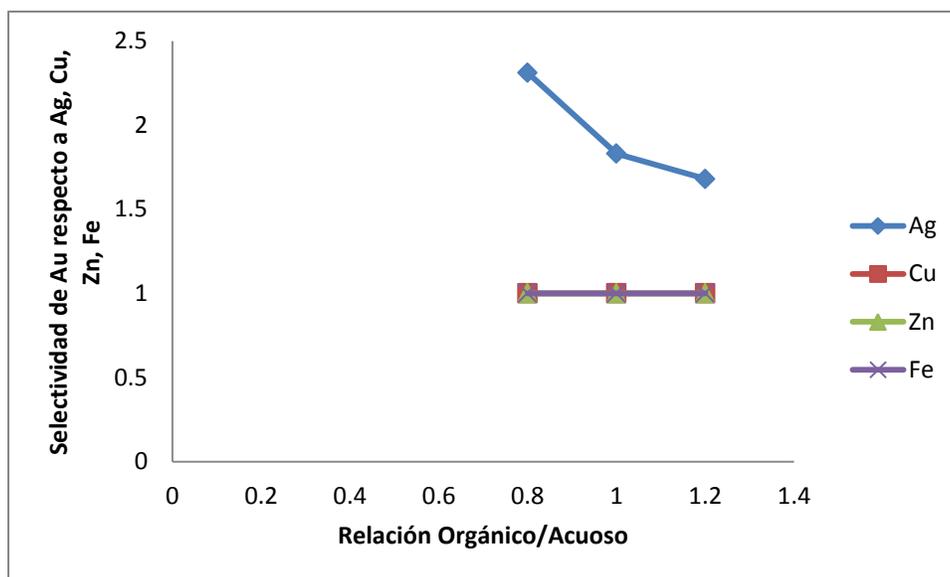


Figura 23. Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 6%, y pH = 10.61.

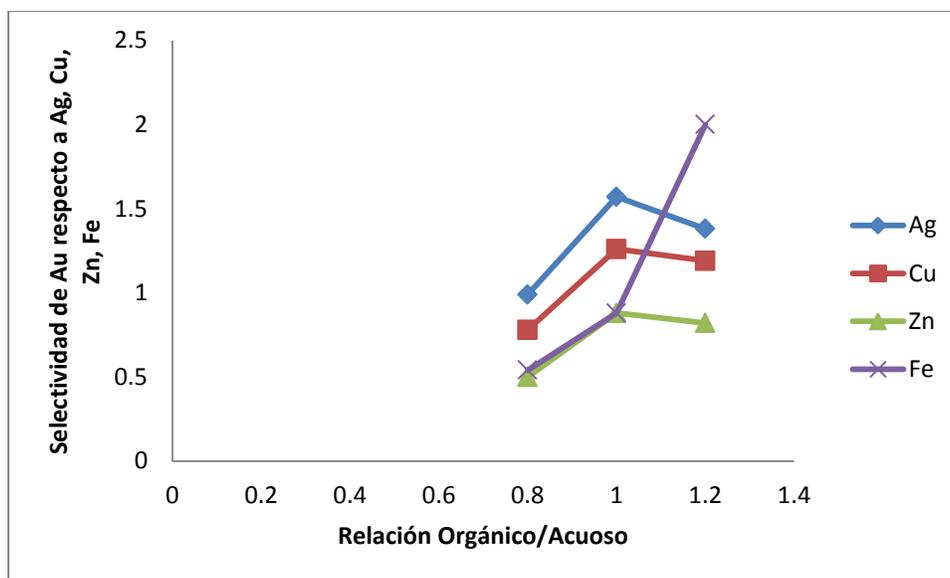


Figura 24. Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 8%, y pH = 10.61.

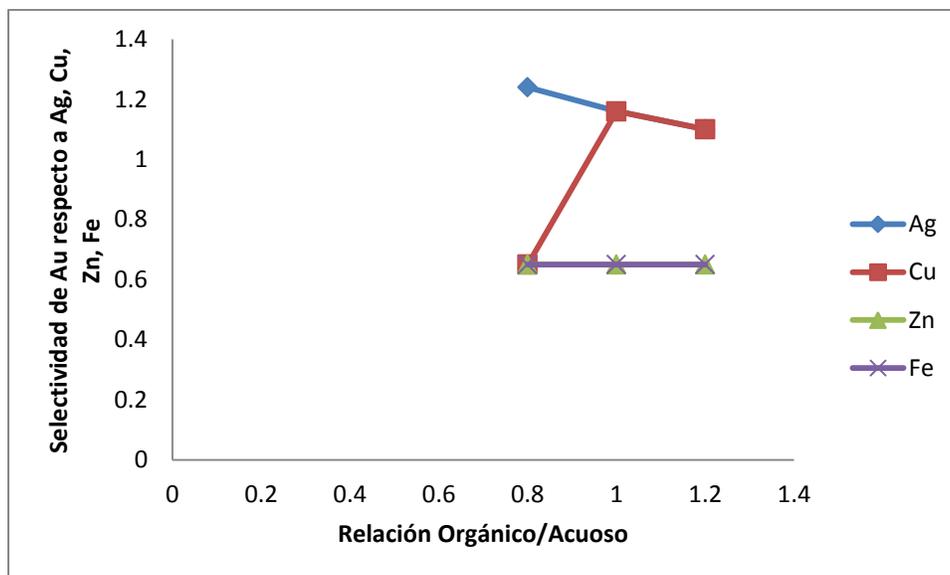


Figura 25. Selectividad de LIX[®] 7820 a 3 minutos de agitación, concentración = 10%, y pH = 10.61.

En las Figuras anteriores se puede observar que la selectividad en soluciones reales es relativamente baja para la plata respecto a la selectividad del reactivo hacia el oro a cualquier concentración de LIX[®] 7820 y relación orgánico/ acuoso, y para los demás cianoaniones se presenta una mayor selectividad respecto al oro a concentraciones de 8% y 10%. Por lo que se puede observar en las gráficas las mejores condiciones utilizando solución real de lixiviación a una agitación de 3 minutos es a una concentración de extractante = 6% y una relación orgánico/acuoso = 0.8.

En las Figuras 26, 27 y 28 se muestra cómo se comporta la selectividad del extractante LIX[®] 7820 al estar en contacto con una solución de lixiviación real a un pH de 10.61, un tiempo de agitación de 4 minutos, a diferentes concentraciones del reactivo y diferente relación de fases.

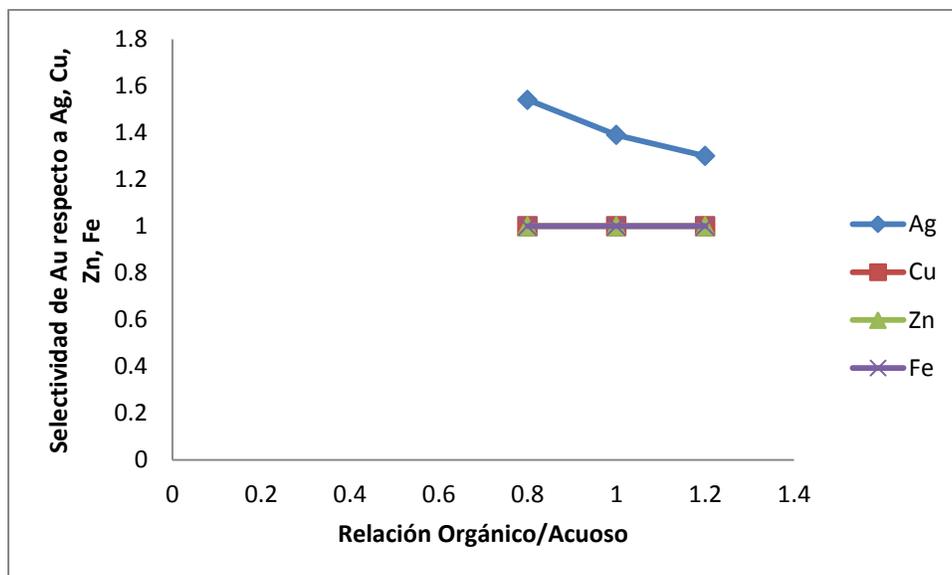


Figura 26. Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 6%, y pH = 10.61.

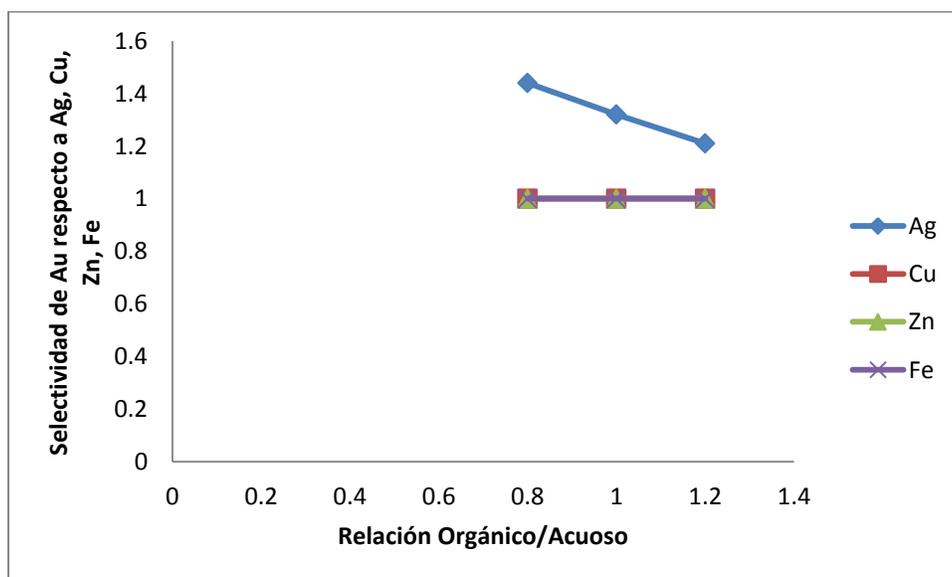


Figura 27. Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 8%, y pH = 10.61.

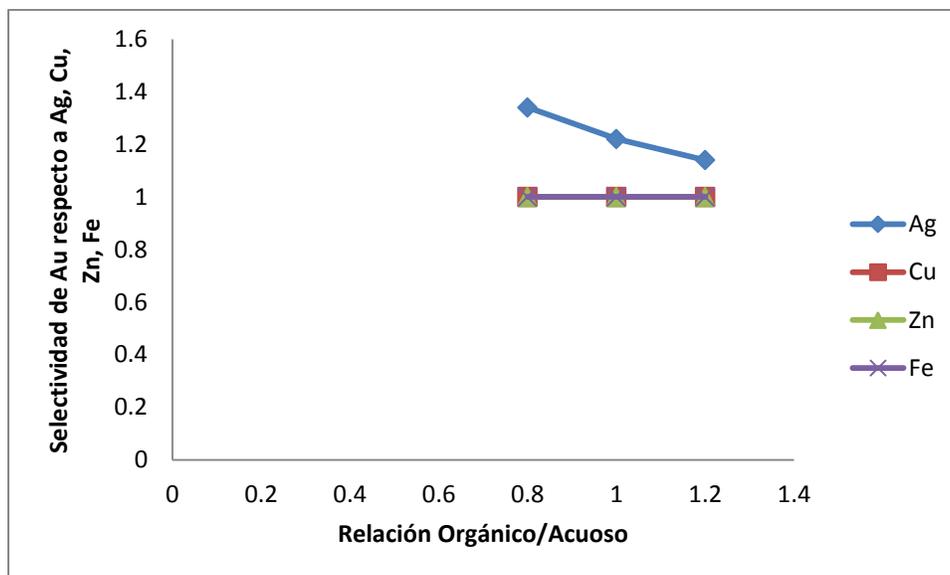


Figura 28. Selectividad de LIX[®] 7820 a 4 minutos de agitación, concentración = 10%, y pH = 10.61.

En las Figuras anteriores se puede observar que la selectividad utilizando soluciones reales es baja para la plata a cualquier concentración del extractante LIX[®] 7820 y ración orgánico/acuoso, y es igual para los otros cianoaniones respecto al oro.

Por lo tanto las mejores condiciones utilizando soluciones reales para tener una selectividad más eficiente es cuando el porcentaje de extractante es al 6%, con un tiempo de agitación de 3 minutos y una relación de fase orgánico/acuoso = 0.8/1.

5.3 Número de etapas de extracción teóricas

La combinación de la isoterma de equilibrio y la línea de operación constituye el diagrama de operación o diagrama de McCabe-Thiele, esto ayudará para calcular el número de etapas teóricas en un sistema de extracción por solventes. La isoterma de equilibrio es fija y solo depende de la química del sistema. La línea de operación se determina mediante el balance de masa, el cual varía con la razón orgánico/acuoso. En la Figura 29 se muestra un diagrama típico de McCabe-Thiele.

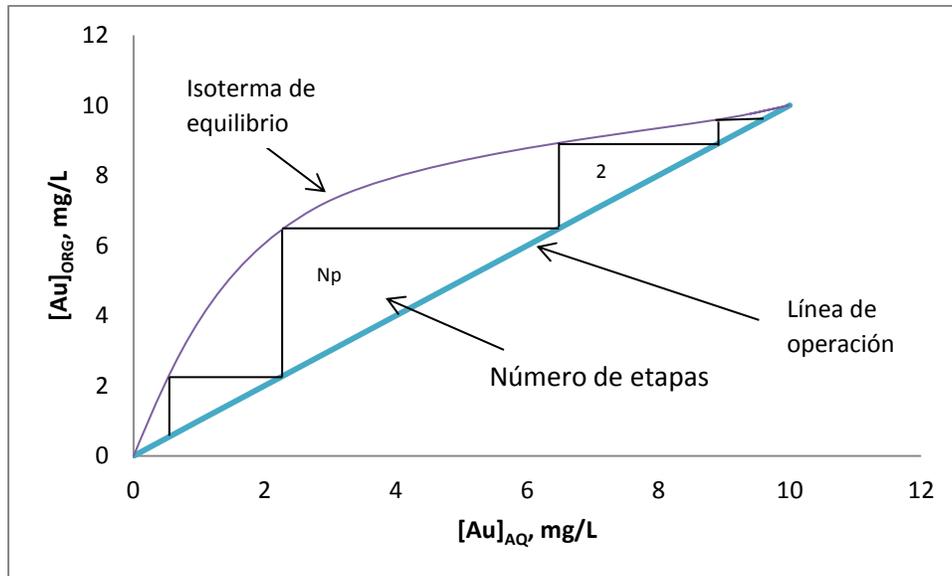


Figura 29. Construcción de diagrama de McCabe-Thiele.

A continuación se muestran los diagramas de McCabe-Thiele para las diferentes concentraciones y relaciones que se llevaron a cabo durante la experimentación.

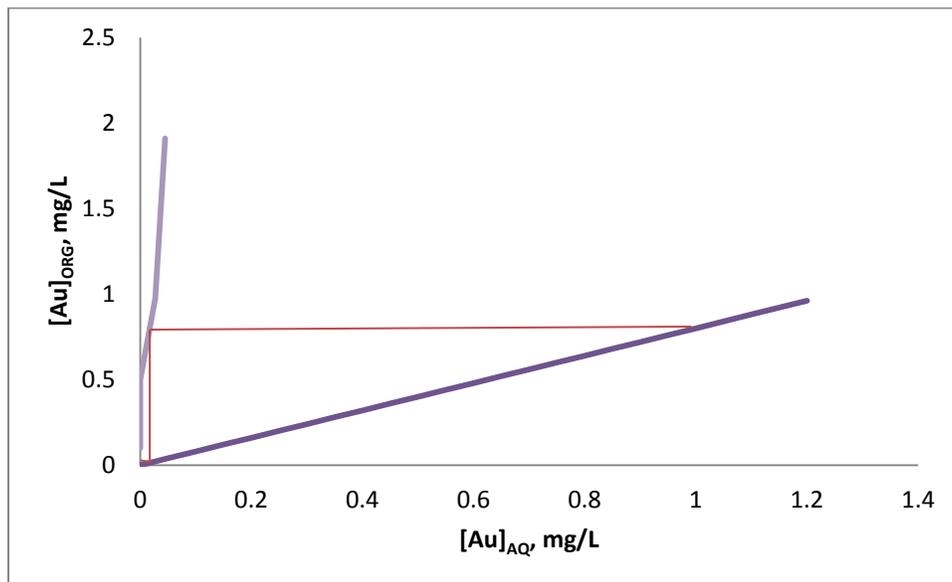


Figura 30. Extracción de oro con concentración = 6% de LIX[®] 7820, pH = 10.5 y relación ORG/AQ = 0.8/1.

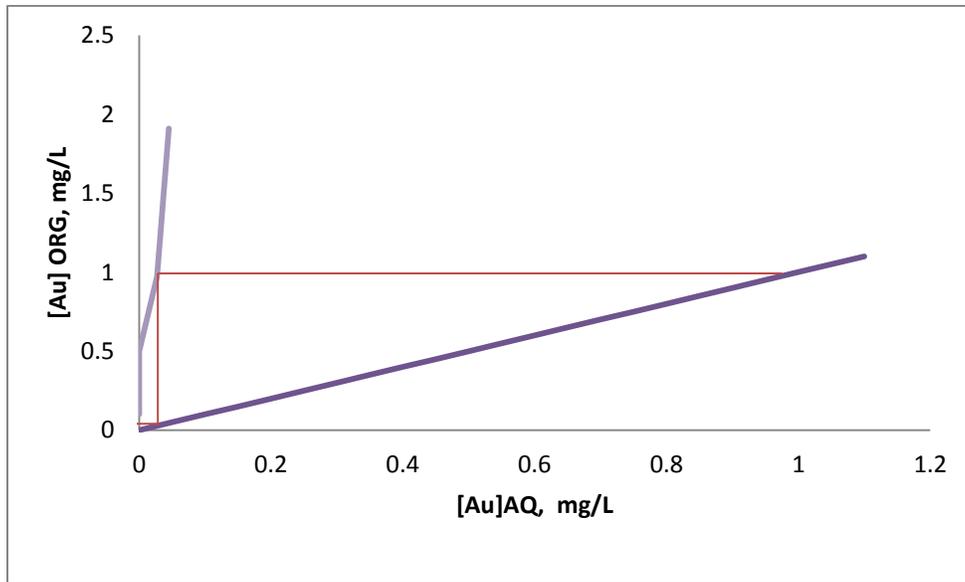


Figura 31. Extracción de oro con concentración = 6% de LIX[®] 7820, pH = 10.5 y relación ORG/AQ = 1/1.

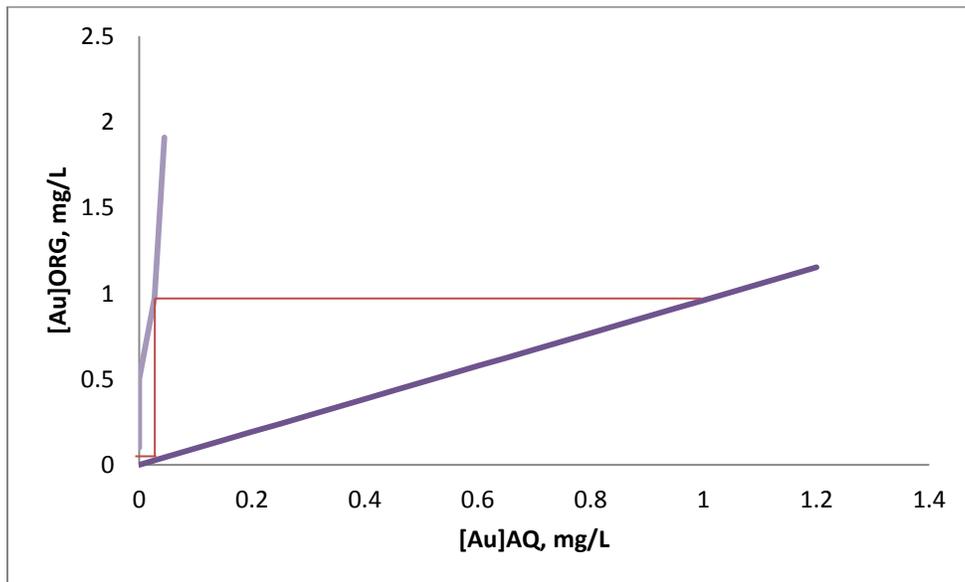


Figura 32. Extracción de oro con concentración = 6% de LIX[®] 7820, pH = 10.5 y relación ORG/AQ = 1.2/1.

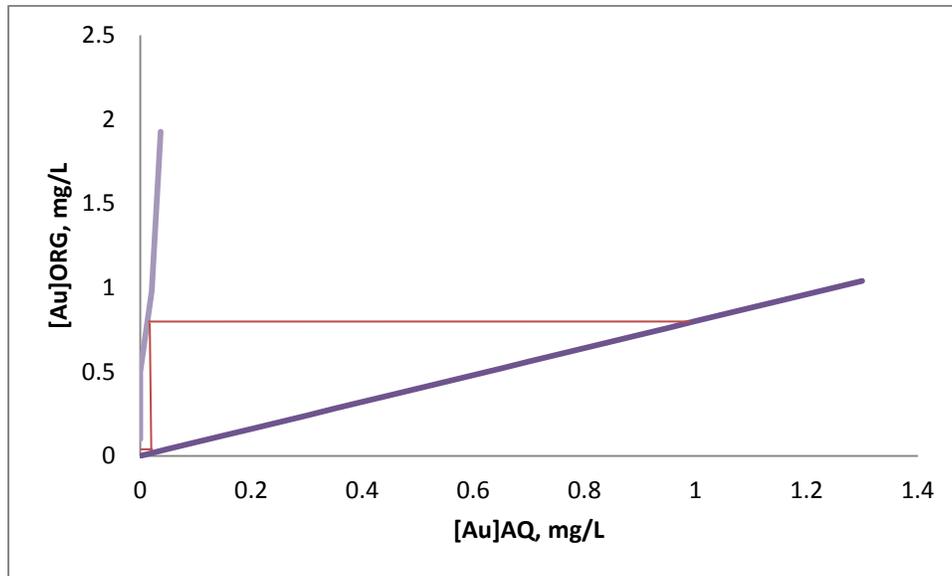


Figura 33. Extracción de oro concentración = 8% de LIX[®] 7820, pH = 10.5 y relación ORG/AQ = 0.8/1.

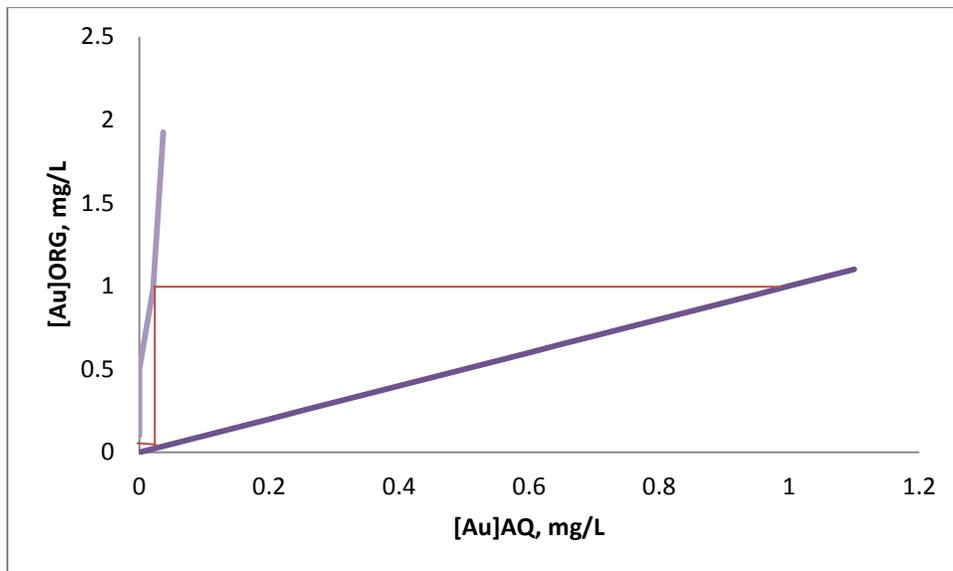


Figura 34. Extracción de oro con concentración = 8% de LIX[®] 7820, pH = 10.5 y relación ORG/AQ = 1/1.

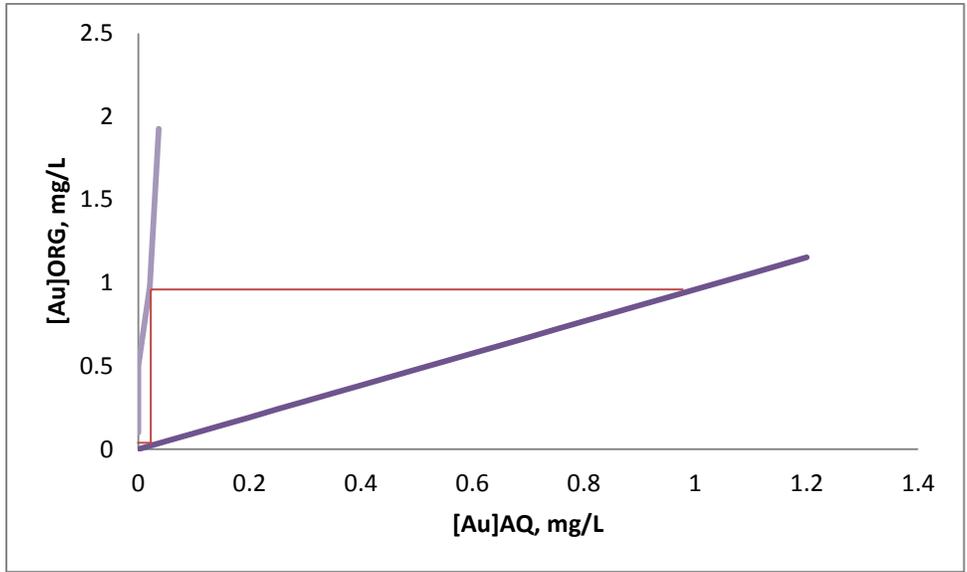


Figura 35. Extracción de oro con concentración = 8% LIX[®] 7820, pH = 10.5 y relación ORG/AQ = 1.2/1.

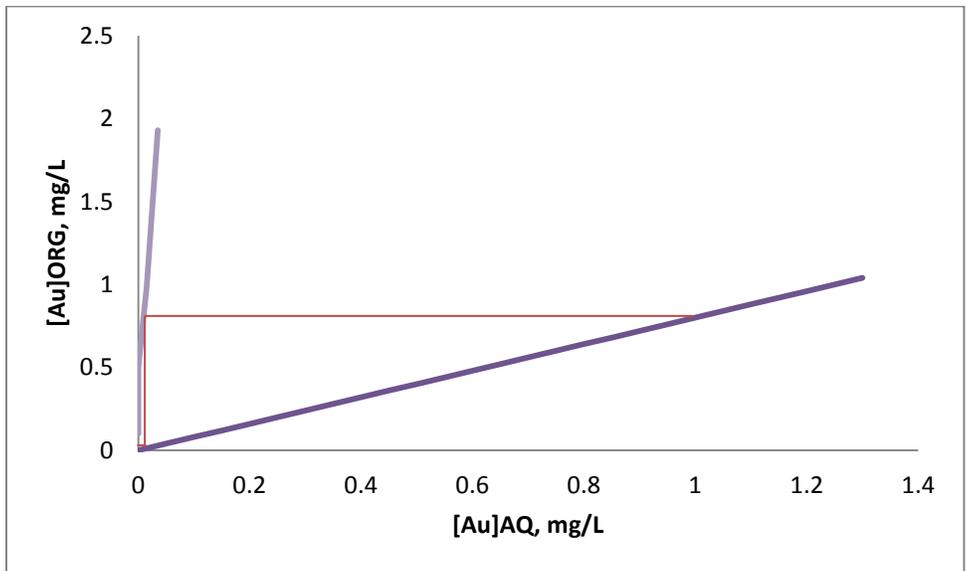


Figura 36. Extracción de oro con concentración = 10% LIX[®] 7820, pH = 10.5 y relación ORG/AQ = 0.8/1.

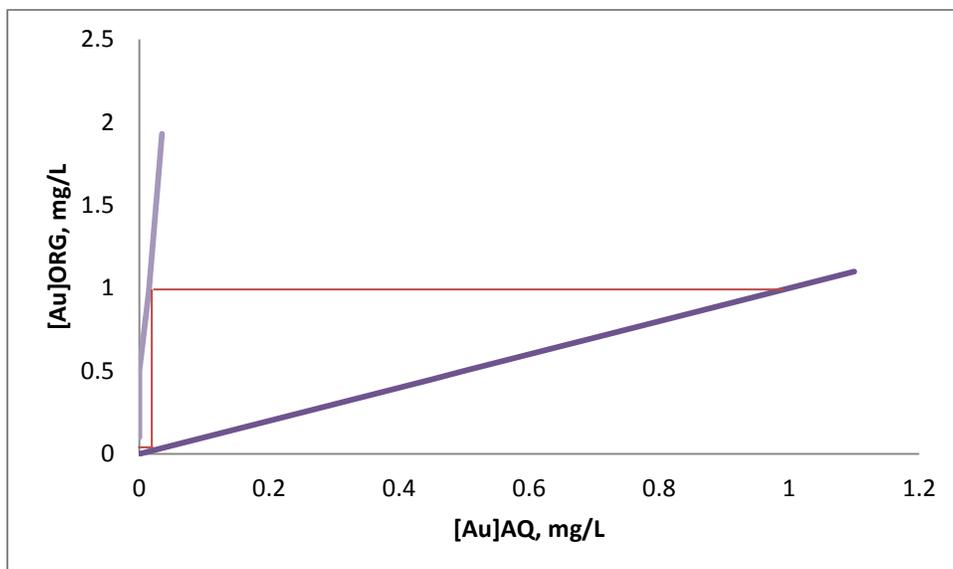


Figura 37. Extracción de oro con concentración = 10% LIX[®] 7820, pH = 10.5 y relación ORG/AQ = 1/1.

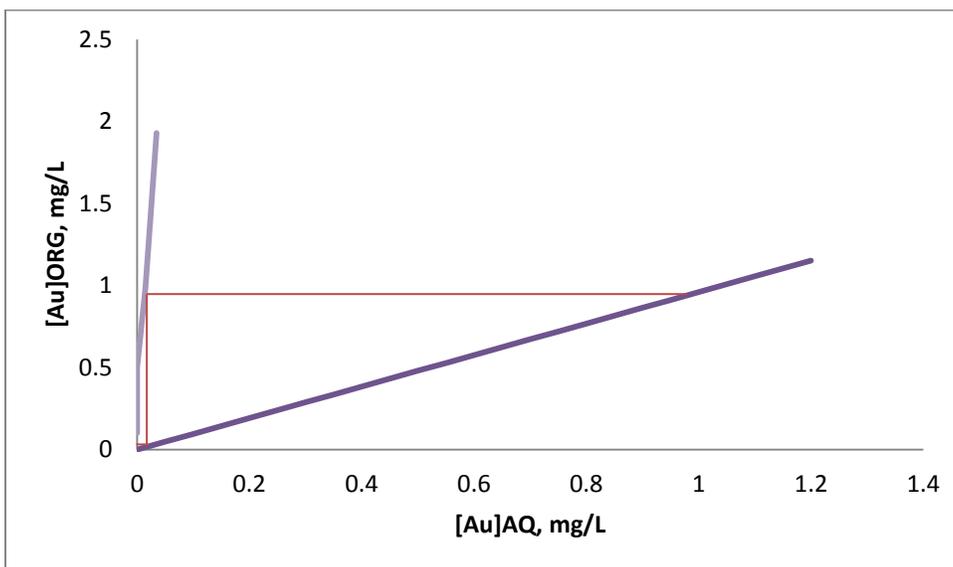


Figura 38. Extracción de oro con concentración = 10% de LIX[®] 7820, pH = 10.5 y relación ORG/AQ = 1.2/1.

Los diagramas muestran que para obtener una buena extracción utilizando LIX[®] 7820 es necesario solamente una etapa utilizando cualquiera de las concentraciones antes mencionadas.

5.4 Cinética de extracción.

Estas pruebas se realizaron a diferentes concentraciones de extractante LIX[®] 7820 y a un pH de 10.5, ya que es el pH que generalmente se utiliza en las minas para cumplir con las normas de seguridad ambiental en la lixiviación de minerales que contienen oro.

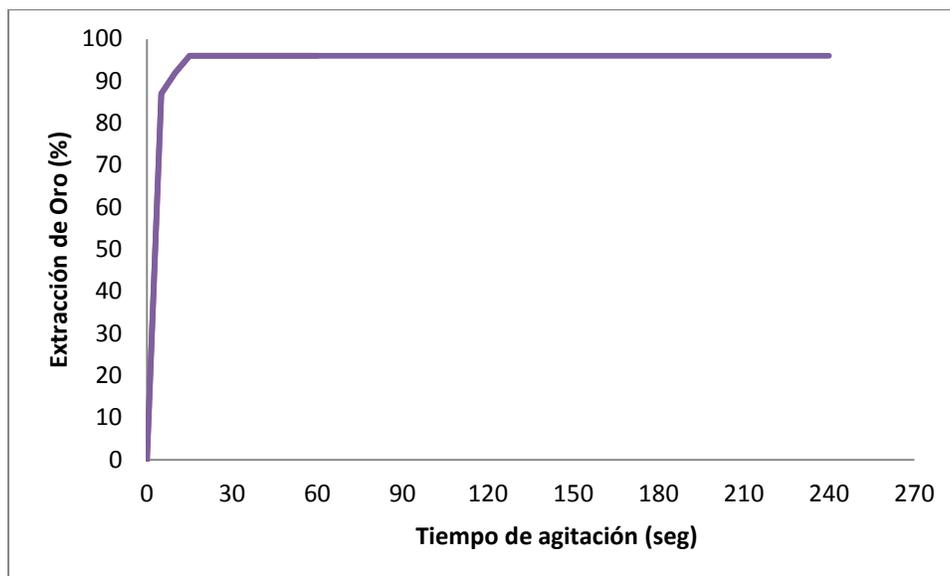


Figura 39. *Cinética a una concentración = 6% de LIX[®] 7820.*

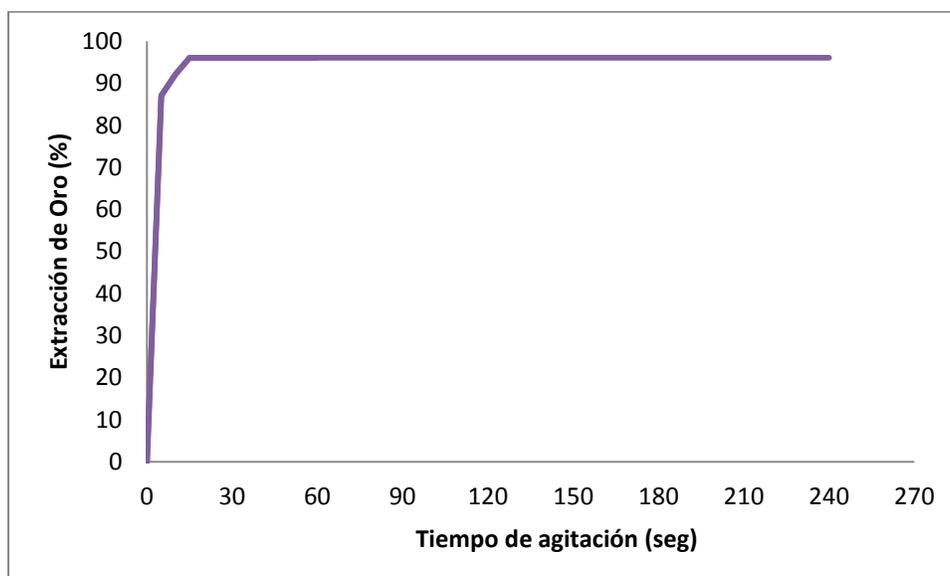


Figura 40. *Cinética a una concentración = 8% de LIX[®] 7820.*

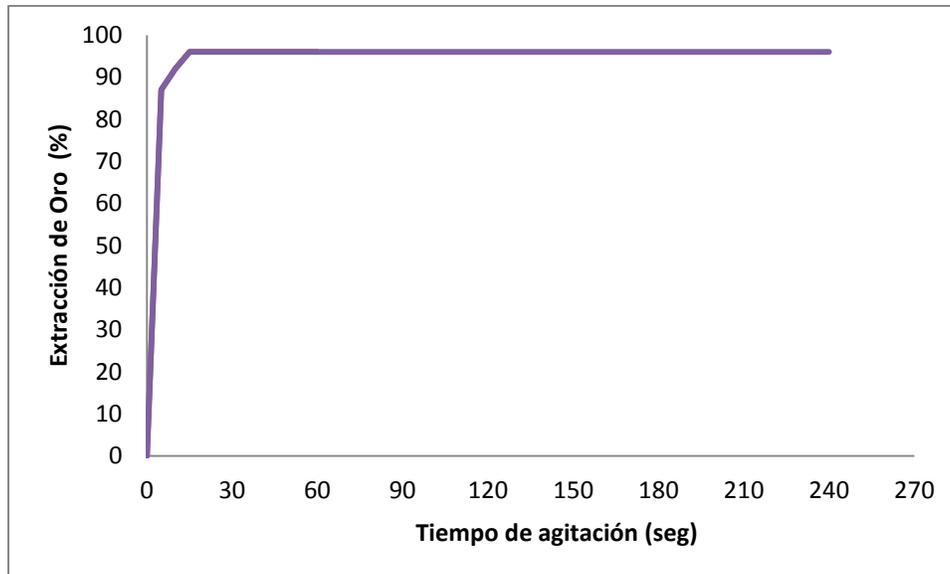


Figura 41. *Cinética a una concentración = 10% de LIX[®] 7820.*

Las gráficas de cinética de extracción muestra que el sistema llega rápidamente al equilibrio en menos de 30 segundos sin importar la concentración de LIX[®] 7820, esto nos indica que el reactivo tiene una cinética muy rápida.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ❖ La velocidad de reacción para la extracción de iones de aurocianuros utilizando LIX[®] 7820 es muy rápida, ya que alcanza el equilibrio a menos de 30 segundos. Es importante mantener una agitación constante y controlada para evitar la formación de emulsiones.
- ❖ Por medio del diagrama de McCabe-Thiele se determinó que para obtener una extracción más adecuada se necesita solamente una etapa.
- ❖ La variación de concentración del reactivo no afecta significativamente el porcentaje de extracción de oro.
- ❖ La relación de fases no afecta en forma importante la selectividad y el porcentaje de extracción.
- ❖ El reactivo LIX[®] 7820 puede ser utilizado para la recuperación de oro en soluciones cianuradas por medio de extracción por solventes, ya que se obtiene un alto porcentaje de extracción de oro a las siguientes condiciones:
 - ✓ pH = 10.5.
 - ✓ Relación ORG/AQ = 1/1.
 - ✓ Concentración de extractante = 10%.
 - ✓ Etapa de extracción = 1.
- ❖ El proceso de extracción por solventes es adecuado ya que el extractante se regenera continuamente y no requiere altas temperaturas para su despojamiento.
- ❖ Se recomienda una etapa de lavado para la separación de cobre, zinc y Hierro.
- ❖ Aunque la selectividad no es muy alta sobre otros cianoaniones, se recomienda realizar más pruebas de selectividad.
- ❖ Es necesario llevar a cabo un sistema continuo ya que puede variar el número de etapas requeridas a nivel industrial, además de ser una representación a pequeña escala del proceso.

APÉNDICE A

Medición de Cianuro Libre por Volumetría.

El análisis de cianuro libre por titulación con una solución de nitrato de plata consiste en la reacción de iones de plata (Ag) con el cianuro libre para formar el ion argentocianuro ($\text{Ag}[\text{CN}]^{-2}$), esta reacción ocurre mientras exista cianuro disponible para acomplejarse con la plata. Una vez que todo el cianuro ha reaccionado, la plata adicionada posteriormente reacciona con el ion argentocianuro para formar un sólido de cianuro de plata (AgCN). Como agente indicador se utiliza yoduro de potasio. El volumen consumido de la solución de nitrato de plata de concentración conocida puede relacionarse directamente con la concentración de cianuro libre en la solución problema.

Para la titulación de CN^{-} libre, son necesarios los siguientes materiales y equipos:

- Nitrato de plata (AgNO_3).
- Agua deionizada.
- 1 matraz volumétrico de un litro.
- 1 frasco ámbar.
- 1 vaso precipitado.
- 1 Bureta.
- Solución de lixiviación (sintética ó real).
- 1 soporte universal.
- Indicador (yoduro de potasio KI).

La solución de titulación se prepara pesando 4.333 gr de nitrato de plata lo más exacto, se coloca en el matraz volumétrico de 1 litro y se afora con agua deionizada. Para una mejor conservación de la solución se recomienda colocarla en un frasco ámbar.

Se coloca la bureta en el soporte universal y se llena de la solución AgNO_3 . Se toman 25 mililitros de la solución de lixiviación y se la agregan 3 gotitas del indicador de yoduro de potasio. De gota en gota se le adiciona nitrato de plata al vaso de precipitado que contiene la solución lixiviada. Cuando se observe que la solución cambia de color cristalina cambia a un tono amarillo claro se detiene la titulación.

Cada mililitro que gaste la solución equivale a 100 gCN/ton de cianuro libre en la solución.

APÉNDICE B

Tabla I. Concentración de metales en la fase orgánica y fase acuosa después de la etapa de extracción a una concentración de LIX® 7820 = 6% y 3 minutos de agitación, utilizando solución de lixiviación sintética.

Muestra	Concentración en Fase Orgánica (mg/L)					Concentración en Fase Acuosa (mg/L)				
	Au	Ag	Cu	Zn	Fe	Au	Ag	Cu	Zn	Fe
A1	1.18	1.18	11.75	1.18	0.99	0.06	0.06	0.6	0.06	0.20
A2	0.94	0.94	9.4	0.15	0.96	0.06	0.06	0.6	0.85	0.04
A3	0.78	0.78	7.81	0.76	0.58	0.06	0.06	0.63	0.09	0.31
B1	1.18	1.18	11.75	1.18	1.18	0.06	0.06	0.6	0.06	0.06
B2	0.94	0.94	9.4	0.94	0.93	0.06	0.06	0.6	0.06	0.07
B3	0.78	0.78	7.83	0.78	0.66	0.06	0.06	0.61	0.06	0.21
C1	1.12	1.18	11.75	1.18	1.18	0.11	0.06	0.6	0.06	0.06
C2	0.91	0.94	9.4	0.94	0.94	0.09	0.06	0.6	0.06	0.06
C3	0.76	0.78	7.8	0.78	0.78	0.09	0.06	0.6	0.06	0.06

Tabla II. Concentración de metales en la fase orgánica y fase acuosa después de la etapa de extracción a una concentración de LIX® 7820 = 8% y 3 minutos de agitación, utilizando solución de lixiviación sintética.

Muestra	Concentración en Fase Orgánica (mg/L)						Concentración en Fase Acuosa (mg/L)					
	Au	Ag	Cu	Zn	Fe	Fe	Au	Ag	Cu	Zn	Fe	Fe
D1	1.19	1.19	11.88	1.19	1.14	1.14	0.05	0.05	0.5	0.05	0.09	0.09
D2	0.95	0.95	9.5	0.95	0.78	0.78	0.05	0.05	0.5	0.05	0.22	0.22
D3	0.79	0.79	7.92	0.80	0.61	0.61	0.05	0.05	0.5	0.05	0.27	0.27
E1	1.18	1.19	11.88	1.19	1.19	1.19	0.05	0.05	0.5	0.05	0.05	0.05
E2	0.94	0.95	9.5	0.95	0.77	0.77	0.06	0.05	0.5	0.05	0.23	0.23
E3	0.79	0.79	7.92	0.80	0.79	0.79	0.05	0.05	0.5	0.05	0.05	0.05
F1	1.19	1.18	11.87	0.97	1.17	1.17	0.05	0.06	0.5	0.22	0.06	0.06
F2	0.95	0.95	9.48	0.74	0.95	0.95	0.05	0.05	0.5	0.26	0.05	0.05
F3	0.79	0.79	7.92	0.06	0.79	0.79	0.05	0.05	0.5	0.93	0.05	0.05

Tabla III. Concentración de metales en la fase orgánica y fase acuosa después de la etapa de extracción a una concentración de LIX® 7820 = 10% y 3 minutos de agitación, utilizando solución de lixiviación sintética.

Muestra	Concentración en Fase Orgánica (mg/L)						Concentración en Fase Acuosa (mg/L)					
	Au	Ag	Cu	Zn	Fe		Au	Ag	Cu	Zn	Fe	
G1	1.2	1.2	12	1.2	0.95	0.04	0.04	0.04	0.4	0.04	0.24	
G2	0.96	0.96	9.6	0.96	0.64	0.04	0.04	0.04	0.4	0.04	0.36	
G3	0.8	0.8	8	0.8	0.37	0.04	0.04	0.04	0.4	0.04	0.56	
H1	1.2	1.2	12	1.2	0.67	0.04	0.04	0.04	0.4	0.04	0.46	
H2	0.96	0.96	9.6	0.96	0.27	0.04	0.04	0.04	0.4	0.04	0.73	
H3	0.8	0.8	8	0.8	0.24	0.04	0.04	0.04	0.4	0.04	0.71	
I1	1.2	1.2	12	1.2	1.05	0.04	0.04	0.04	0.4	0.04	0.16	
I2	0.96	0.96	9.6	0.96	0.59	0.04	0.04	0.04	0.4	0.04	0.41	
I3	0.8	0.8	8	0.8	0.49	0.04	0.04	0.04	0.4	0.04	0.42	

Tabla IV. Concentración de metales en la fase orgánica y fase acuosa después de la etapa de extracción a una concentración de LIX® 7820 = 6% y 4 minutos de agitación, utilizando solución de lixiviación sintética.

Muestra	Concentración en la fase Orgánica (mg/L)					Concentración en la fase Acuosa (mg/L)				
	Au	Ag	Cu	Zn	Fe	Au	Ag	Cu	Zn	Fe
J1	1.16	1.18	11.75	1.18	0.93	0.08	0.06	0.6	0.06	0.25
J2	0.94	0.94	9.4	0.94	0.58	0.07	0.06	0.6	0.06	0.42
J3	0.78	0.78	7.83	0.78	0.61	0.07	0.06	0.6	0.06	0.27
K1	1.05	1.18	11.75	1.18	1.10	0.16	0.06	0.6	0.06	0.12
K2	0.85	0.94	9.4	0.94	0.79	0.15	0.06	0.6	0.06	0.21
K3	0.77	0.78	7.83	0.78	0.67	0.08	0.06	0.6	0.06	0.19
L1	1.07	1.18	11.75	1.17	0.99	0.15	0.06	0.6	0.06	0.21
L2	0.91	0.94	9.4	0.94	0.87	0.10	0.06	0.6	0.06	0.13
L3	0.77	0.78	7.83	0.78	0.76	0.08	0.06	0.6	0.06	0.09

Tabla V. Concentración de metales en la fase orgánica y fase acuosa después de la etapa de extracción a una concentración de LIX® 7820 = 8% y 4 minutos de agitación, utilizando solución de lixiviación sintética

Muestra	Concentración en la fase Orgánica(mg/L)					Concentración en la fase Acuosa (mg/L)				
	Au	Ag	Cu	Zn	Fe	Au	Ag	Cu	Zn	Fe
M1	1.19	1.19	11.88	1.19	0.7	0.06	0.05	0.5	0.05	0.44
M2	0.95	0.95	9.5	0.95	0.58	0.05	0.05	0.5	0.05	0.42
M3	0.79	0.79	7.92	0.79	0.23	0.05	0.05	0.5	0.05	0.73
N1	1.18	1.19	11.88	1.19	0.77	0.05	0.05	0.5	0.05	0.39
N2	0.95	0.95	9.5	0.95	0.44	0.05	0.05	0.5	0.05	0.56
N3	0.79	0.79	7.92	0.79	0.54	0.05	0.05	0.5	0.05	0.65
O1	1.19	1.18	11.88	1.19	1.03	0.05	0.06	0.5	0.05	0.18
O2	0.95	0.95	9.5	0.95	0.93	0.05	0.05	0.5	0.05	0.07
O3	0.79	0.79	7.92	0.79	0.48	0.05	0.05	0.5	0.05	0.42

Tabla VI. Concentración de metales en la fase orgánica y fase acuosa después de la etapa de extracción a una concentración de LIX® 7820 = 10% y 4 minutos de agitación, utilizando solución de lixiviación sintética.

Muestra	Concentración en la fase Orgánica (mg/L)					Concentración en la fase Acuosa (mg/L)				
	Au	Ag	Cu	Zn	Fe	Au	Ag	Cu	Zn	Fe
P1	1.2	1.2	12	1.2	1.2	0.04	0.04	0.4	0.04	0.04
P2	0.96	0.96	9.6	0.96	0.96	0.04	0.04	0.4	0.04	0.04
P3	0.8	0.8	8	0.8	0.8	0.04	0.04	0.4	0.04	0.04
Q1	1.2	1.2	12	1.2	1.17	0.04	0.04	0.4	0.04	0.06
Q2	0.96	0.96	9.6	0.96	0.87	0.04	0.04	0.4	0.04	0.13
Q3	0.8	0.8	8	0.8	0.41	0.04	0.04	0.4	0.04	0.51
R1	1.18	1.2	12	1.2	1.2	0.06	0.04	0.4	0.04	0.04
R2	0.95	0.96	9.6	0.96	0.87	0.05	0.04	0.4	0.04	0.14
R3	0.8	0.8	8	0.8	0.72	0.04	0.04	0.4	0.04	0.13

Tabla VII. Concentración de metales en la fase orgánica y fase acuosa después de la etapa de extracción a diferentes concentraciones de LIX® 7820 y 3 minutos de agitación, utilizando solución de lixiviación de mina La Herradura.

Muestra	Concentración en fase Orgánica (mg/L)					Concentración en fase Acuosa (mg/L)				
	Au	Ag	Cu	Zn	Fe	Au	Ag	Cu	Zn	Fe
MR1	1.1	4.57	2.35	5.99	1.47	0.06	0.54	0.12	0.31	0.08
MR2	0.88	3.76	1.88	4.79	1.18	0.06	0.44	0.12	0.31	0.08
MR3	0.73	3.16	1.57	3.99	0.98	0.06	0.41	0.12	0.31	0.08
MR4	1.06	4.74	2.31	6.05	1.48	0.09	0.4	0.16	0.26	0.07
MR5	0.88	3.83	1.86	4.84	1.19	0.05	0.36	0.14	0.26	0.06
MR6	0.73	3.21	1.55	4.04	0.99	0.06	0.34	0.14	0.26	0.06
MR7	1.1	4.86	2.4	6.12	1.5	0.06	0.31	0.08	0.2	0.05
MR8	0.88	3.91	1.92	4.9	1.2	0.06	0.29	0.08	0.2	0.05
MR9	0.73	3.27	1.6	4.08	1	0.06	0.28	0.08	0.2	0.05

Tabla VIII. Concentración de metales en la fase orgánica y fase acuosa después de la etapa de extracción a diferentes concentraciones de LIX® 7820 y 3 minutos de agitación, utilizando solución de lixiviación de mina La Herradura.

Muestra	Concentración en fase Orgánica (mg/L)					Concentración en fase Acuosa (mg/L)				
	Au	Ag	Cu	Zn	Fe	Au	Ag	Cu	Zn	Fe
MR10	1.1	4.78	2.35	5.99	1.47	0.06	0.38	0.12	0.31	0.08
MR11	0.88	3.85	1.88	4.79	1.18	0.06	0.34	0.12	0.31	0.08
MR12	0.73	3.23	1.57	3.99	0.98	0.06	0.32	0.12	0.31	0.08
MR13	1.11	4.87	2.38	6.06	1.48	0.05	0.3	0.1	0.26	0.06
MR14	0.89	3.92	1.9	4.85	1.19	0.05	0.27	0.1	0.26	0.06
MR15	0.74	3.29	1.58	4.04	0.99	0.05	0.25	0.1	0.26	0.06
MR16	1.12	4.97	2.4	6.12	1.5	0.04	0.22	0.08	0.2	0.05
MR17	0.9	3.99	1.92	4.89	1.2	0.04	0.2	0.08	0.2	0.05
MR18	0.75	3.34	1.6	4.08	1	0.04	0.2	0.08	0.2	0.05

Tabla IX. Coeficiente de distribución a una concentración de LIX[®] 7820 = 6% y 3 minutos de agitación, utilizando solución de lixiviación sintética.

Muestra	Coeficiente de Extracción				E°Fe
	E°Au	E°Ag	E°Cu	E°Zn	
A1	19.58	19.58	19.58	19.58	1
A2	15.67	15.67	15.67	0.18	0.96
A3	13	13	12.51	8.28	0.58
B1	19.58	19.58	19.58	19.58	1.18
B2	15.67	15.67	15.67	15.67	0.93
B3	13	13	12.83	13	0.66
C1	10.38	19.58	19.58	19.58	1.18
C2	9.62	15.67	15.67	15.67	0.94
C3	8.42	13	13	13	0.78

Tabla X. Coeficiente de distribución a una concentración de LIX[®] 7820 = 8% y 3 minutos de agitación, utilizando solución de lixiviación sintética.

Muestra	Coeficiente de Extracción				E°Fe
	E°Au	E°Ag	E°Cu	E°Zn	
D1	23.76	23.76	23.75	23.76	13.19
D2	19	19	19	19	3.63
D3	15.84	15.84	15.83	15.92	2.23
E1	21.91	23.76	23.75	23.76	23.76
E2	16.39	19	19	19	3.37
E3	14.51	15.84	15.83	15.92	15.84
F1	23.76	21.47	23.65	4.33	18.37
F2	19	19	18.08	2.82	19
F3	15.84	15.84	15.83	0.06	15.84

Tabla XI. Coeficiente de distribución a una concentración de LIX[®] 7820 = 10% y 3 minutos de agitación, utilizando solución de lixiviación sintética.

Muestra	Coeficiente de extracción				E°Fe
	E°Au	E°Ag	E°Cu	E°Zn	
G1	30	30	30	30	4.03
G2	24	24	24	24	1.8
G3	20	20	20	20	0.65
H1	30	30	30	30	1.45
H2	24	24	24	24	0.38
H3	20	20	20	20	0.34
I1	30	30	30	30	6.52
I2	24	24	24	24	1.46
I3	20	20	20	20	1.17

Tabla XII. Coeficiente de distribución a una concentración de LIX[®] 7820 = 6% y 4 minutos de agitación, utilizando solución de lixiviación sintética.

Muestra	Coeficiente de extracción				E°Fe
	E°Au	E°Ag	E°Cu	E°Zn	
J1	15.37	19.58	19.58	19.58	3.68
J2	14.41	15.67	15.67	15.67	1.39
J3	12	13.05	13.05	13.05	2.24
K1	6.56	19.58	19.58	19.58	9.25
K2	5.54	15.67	15.67	15.67	3.75
K3	9.54	13.05	13.05	13.05	3.47
L1	7.31	19.58	19.58	19.58	4.77
L2	9.58	15.67	15.67	15.67	6.49
L3	9.95	13.05	13.05	13.05	8.42

Tabla XIII. Coeficiente de distribución a una concentración de LIX[®] 7820 = 8% y 4 minutos de agitación, utilizando solución de lixiviación sintética.

Muestra	Coeficiente de extracción				
	E°Au	E°Ag	E°Cu	E°Zn	E°Fe
M1	19.86	23.74	23.75	23.74	1.57
M2	18.01	19	19	19	1.39
M3	15.83	15.83	15.84	15.83	0.31
N1	23.74	23.74	23.75	23.74	1.97
N2	19	19	19	19	0.79
N3	15.83	15.83	15.84	15.83	0.83
O1	23.74	20.98	23.75	23.74	5.71
O2	19	17.83	19	19	12.66
O3	15.83	14.856	15.84	15.83	1.13

Tabla XIV. Coeficiente de distribución a una concentración de LIX[®] 7820 = 10% y 4 minutos de agitación, utilizando solución de lixiviación sintética.

Muestra	Coeficiente de extracción				
	E°Au	E°Ag	E°Cu	E°Zn	E°Fe
P1	30	30	30	30	30
P2	24	24	24	24	24
P3	20	20	20	20	20
Q1	30	30	30	30	18.59
Q2	24	24	24	24	6.63
Q3	20	20	20	20	0.8
R1	20.19	30	30	30	30
R2	17.55	24	24	24	6.43
R3	18.41	20	20	20	5.41

Tabla XV. Coeficiente de distribución a diferentes concentración de LIX[®] 7820 y 3 minutos de agitación, utilizando solución de lixiviación de mina La Herradura.

Muestra	Coeficiente de Extracción				E°Fe
	E°Au	E°Ag	E°Cu	E°Zn	
MR1	19.59	8.5	19.58	19.52	19.59
MR2	15.67	8.58	15.67	15.67	15.67
MR3	13.05	7.73	13.06	13.06	13.05
MR4	11.59	11.76	14.78	23.31	21.39
MR5	16.64	10.62	13.18	18.92	19.01
MR6	13.02	9.42	10.96	15.84	15.84
MR7	19.59	15.78	30	30	30
MR8	15.67	13.52	24	24	24
MR9	13.05	11.833	20	20	20

Tabla XVI. Coeficiente de distribución a diferentes concentración de LIX[®] 7820 y 4 minutos de agitación, utilizando solución de lixiviación de mina La Herradura.

Muestra	Coeficiente de extracción				E°Fe
	E°Au	E°Ag	E°Cu	E°Zn	
MR10	19.59	12.73	19.58	19.58	19.59
MR11	15.67	11.23	15.67	15.67	15.67
MR12	13.05	10.03	13.06	13.06	13.05
MR13	23.74	16.41	23.75	23.75	23.74
MR14	18.99	14.37	19	19	19.01
MR15	15.83	12.98	15.83	15.84	15.84
MR16	30	22.37	30	30	30
MR17	24.01	19.67	24	24	24
MR18	20	17.57	20	20	20

Tabla XVII. Datos experimentales para las figuras 5, 6 y 7.

pH Inicial	Relación ORG\AQ	Selectividad			
		Au/Ag	Au/Cu	Au/Zn	Au/Fe
10.02	0.8\1	1	1	1	19.62
10.02	1\1	1	1	85.87	16.32
10.02	1.2\1	1	1.04	1.57	22.61
10.5	0.8\1	1	1	1	16.67
10.5	1\1	1	1	1	16.89
10.5	1.2\1	1	1.01	1	19.61
11	0.8\1	0.53	0.53	0.53	8.83
11	1\1	0.61	0.61	0.61	10.23
11	1.2\1	0.65	0.65	0.65	10.8

Tabla XVIII. Datos experimentales para las figuras 8, 9 y 10.

pH Inicial	Relación ORG\AQ	Selectividad			
		Au/Ag	Au/Cu	Au/Zn	Au/Fe
10.03	0.8\1	1	1	1	1.8
10.03	1\1	1	1	20	5.23
10.03	1.2\1	1	1	19.9	6.99
10.49	0.8\1	0.92	0.92	18.44	0.92
10.49	1\1	0.86	0.86	17.25	4.87
10.49	1.2\1	0.92	0.92	18.23	0.92
11	0.8\1	1.11	1	24.49	1.29
11	1\1	1	1.1	25.72	1
11	1.2\1	1	1	264	1

Tabla XIX. Datos experimentales para las figuras 11, 12 y 13.

pH Inicial	Relación ORG\AQ	Selectividad			
		Au/Ag	Au/Cu	Au/Zn	Au/Fe
10.02	0.8\1	1	1	1	7.45
10.02	1\1	1	1	1	13.33
10.02	1.2\1	1	1	1	30.82
10.51	0.8\1	1	1	1	20.66
10.51	1\1	1	1	1	63.6
10.51	1.2\1	1	1	1	59
10.98	0.8\1	1	1	1	4.6
10.98	1\1	1	1	1	16.49
10.98	1.2\1	1	1	1	17.08

Tabla XX. Datos experimentales para las figuras 14, 15 y 16.

pH Inicial	Relación ORG\AQ	Selectividad			
		Au/Ag	Au/Cu	Au/Zn	Au/Fe
10.04	0.8\1	0.79	0.79	0.79	4.18
10.04	1\1	0.92	0.92	0.92	10.38
10.04	1.2\1	0.92	0.92	0.92	5.35
10.5	0.8\1	0.34	0.34	0.34	0.71
10.5	1\1	0.35	0.35	0.35	1.48
10.5	1.2\1	0.73	0.73	0.73	2.75
10.98	0.8\1	0.37	0.37	0.37	1.53
10.98	1\1	0.61	0.61	0.61	1.48
10.98	1.2\1	0.76	0.76	0.76	1.18

Tabla XXI. Datos experimentales para las figuras 17, 18 y 19.

pH Inicial	Relación ORG\AQ	Selectividad			
		Au/Ag	Au/Cu	Au/Zn	Au/Fe
10.07	0.8\1	0.84	0.84	0.84	12.63
10.07	1\1	0.95	0.95	0.95	12.96
10.07	1.2\1	1	1	1	50.96
10.47	0.8\1	1	1	1	12.05
10.47	1\1	1	1	1	24.09
10.47	1.2\1	1	1	1	19
10.95	0.8\1	1.13	1	1	4.15
10.95	1\1	1.07	1	1	1.5
10.95	1.2\1	1.07	1	1	13.97

Tabla XXII. Datos experimentales para las figuras 20, 21 y 22.

pH Inicial	Relación ORG\AQ	Selectividad			
		Au/Ag	Au/Cu	Au/Zn	Au/Fe
10	0.8\1	1	1	1	1
10	1\1	1	1	1	1
10	1.2\1	1	1	1	1
10.53	0.8\1	1	1	1	1.61
10.53	1\1	1	1	1	3.62
10.53	1.2\1	1	1	1	25.08
11.02	0.8\1	0.67	0.67	0.67	0.67
11.02	1\1	0.73	0.73	0.73	2.73
11.02	1.2\1	0.92	0.92	0.92	3.4

Tabla XXIII. Datos experimentales para las figuras 23, 24 y 25.

Concentración de Extractante	Relación ORG\AQ	Selectividad			
		Ag	Cu	Zn	Fe
6%	0.8\1	2.31	1	1	1
6%	1\1	1.83	1	1	1
6%	1.2\1	1.68	1	1	1
8%	0.8\1	0.99	0.78	0.5	0.54
8%	1\1	1.57	1.26	0.88	0.88
8%	1.2\1	1.38	1.19	0.82	0.82
10%	0.8\1	1.24	0.65	0.65	0.65
10%	1\1	1.16	0.65	0.65	0.65
10%	1.2\1	1.1	0.65	0.65	0.65

Tabla XXIV. Datos experimentales para las figuras 26, 27 y 28.

Concentración de Extractante	Relación ORG\AQ	Selectividad			
		Au/Ag	Au/Cu	Au/Zn	Au/Fe
6%	0.8\1	1.54	1	1	1
6%	1\1	1.39	1	1	1
6%	1.2\1	1.3	1	1	1
8%	0.8\1	1.44	1	1	1
8%	1\1	1.32	1	1	1
8%	1.2\1	1.21	1	1	1
10%	0.8\1	1.34	1	1	1
10%	1\1	1.22	1	1	1
10%	1.2\1	1.14	1	1	1

Tabla XXV. Datos experimentales para la curva de operación con una concentración de LIX[®] 7820 = 6%.

Relación ORG/AQ	[Au]_{AQ} (mg/L)	[Au]_{ORG} (mg/L)
10\1	0	0.1
5\1	0	0.2
2\1	0	0.5
1\1	0.027	0.973
1\2	0.045	1.91
1\5	0.062	4.69
1\10	0.085	9.15

Tabla XXVI. Datos experimentales para la curva de operación con una concentración de LIX[®] 7820 = 8%.

Relación ORG/AQ	[Au]_{AQ} (mg/L)	[Au]_{ORG} (mg/L)
10\1	0	0.1
5\1	0	0.2
2\1	0	0.5
1\1	0.021	0.979
1\2	0.037	1.926
1\5	0.058	4.71
1\10	0.079	9.21

Tabla XXVII. Datos experimentales para la curva de operación con una concentración de LIX[®] 7820 = 10%.

Relación ORG/AQ	[Au]_{AQ} (mg/L)	[Au]_{ORG} (mg/L)
10\1	0	0.1
5\1	0	0.2
2\1	0	0.5
1\1	0.015	0.985
1\2	0.035	1.93
1\5	0.055	4.725
1\10	0.075	9.25

Tabla XXVIII. Datos experimentales para la Figura 39.

Tiempo de agitación (seg)	Extracción de Oro (%)
0	0
5	86
10	90
15	94
20	94
25	94
30	94
60	94
90	94
120	94
150	94
180	94
210	94
240	94

Tabla XXIX. Datos experimentales para la Figura 40.

Tiempo de agitación (seg)	Extracción de Oro (%)
0	0
5	89
10	92
15	95
20	95
25	95
30	95
60	95
90	95
120	95
150	95
180	95
210	95
240	95

Tabla XXX. Datos experimentales para la Figura 41.

Tiempo de agitación (seg)	Extracción de Oro (%)
0	0
5	87
10	92
15	96
20	96
25	96
30	96
60	96
90	96
120	96
150	96
180	96
210	96
240	96

7. REFERENCIAS

- 1.- Adams, M. (2005). Advances in Gold Ore Processing. *B. A. Wills*, 1077.
- 2.- Ballester, A., Verdeja, L. F., & Sancho, J. (2000). *Metalurgia Extractiva*. SINTESIS.
- 3.- Casassas Simó, E., Valcárcel Casas, M., & Pérez Bendito, M. D. (1988). *Análisis Químico*. Barcelona : REVERTÉ.
- 4.- Castrejón Lemus, M. (1993). Ingeniería básica y recomendaciones técnicas para la construcción de una planta de lixiviación en terrenos de minerales de oro y plata con cianuro de sodio. *Tesis*.
- 5.- Cognis, C. (2001). LIX 7820. *Cognis Mining Chemicals Technology*, 2.
- 6.- Cognis, G. (2008). Reactivo de Extracción por Solventes y sus Aplicaciones. *MTC Redbook*.
- 7.- Cruz Orduño, M. (2002). Extracción de Oro por Solventes en un Sistema Continuo Utilizando LIX 79 para Soluciones de Cianuración. *Tesis*.
- 8.- Domic, E. M. (2001). *Hidrometalurgia: Fundamentos, Procesos y Aplicaciones*. Chile: NULL.
- 9.- Fleming, C., & Cromberge, G. (1984). The Extraction of Gold from Cyanide Solutions by Strong-And Weak-Base Anion-Exchange Resins. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 125-137.
- 10.- Habashi, F. (1999). *Textbook of Hydrometallurgy*. Québec, Canadá.
- 11.- Marsden, J., & House, C. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction*. SME.
- 12.- Mattison, P., & Virnig, M. (s.f.). LIX 7820 A New Reagent for Reversibly Extracting Anions from Alkaline Solutions.
- 13.- Méndez Peralta, D. M. (2009). Procesos Hidrometalúrgicos en la Minería de Oro, Plata, Cobre y Uranio.
- 14.- Millar, C. (1997). *Lixiviación en Montones: Manual Práctico*.
- 15.- Mooiman, M. B. (1984). *The Solvent Extraction of Gold from Cyanide Solution*. Department of Metallurgy and Metallurgical Engineering, University of Utah, 1984.
- 16.- Muir, D. (1988). Prospects for the Recovery of Gold from Cyanide Liquors and Pulps by Solvent Extraction and by Ion Exchange. *CANMET*.

- 17.- Otero de la Gándara, J. (1976). *Operaciones de separación en metalurgia extractiva*. ALHAMBRA, S. A.
- 18.- Parga, J. (1990). Recuperación de Metales Preciosos. En U. d. Sonora, *Avances en la Metalurgia Extractiva* (págs. 37-97). Hermosillo, México.
- 19.- Parga, J., & Carrillo, F. (1995). Avances en los Métodos de Recuperación de Oro y Plata de Minerales Refractarios. *Revista de Metalurgia*.
- 20.- Power, K. (1970). *Operation of the First Commercial Copper Liquid Ion Exchange and Electrowinning Plant*. New York: AIME Meeting.
- 21.- R. L., Paul. (1982). The Recovery of Gold from Concentrated Aurocyanide Solutions. En J. Miller, *Hydrometallurgy Research, Development and Plant Practice* (págs. 689-704).
- 22.- Ritcey, G. M., & Ashbrook, A. W. (1984). *Solvent Extraction in Process Metallurgy*. Elsevier.
- 23.- Robles Vega, A. (1996). Extracción por Solventes para Arsénico Utilizando Cyanex 923 a Partir de Soluciones de Lixiviación de Polvos de Fundición de Cobre. *Tesis para grado de Mestría*.
- 24.- Syed, S. (2006). A green technology for recovery of gold from non-metallic secondary sources. *Hydrometallurgy*, 48-53.
- 25.- Treybal, R. (1968). *Extracción en Fase Líquida*. New York: Uteha.
- 26.- Valenzuela, J. L. (2002). Analisis de las Variables que Afectan la Selectividad del Extractante LIX 79 para el Ion Aurocianuro en Soluciones de Extracción por Solventes. *Tesis que para Obtener el Grado de Doctor*, 149.
- 27.- Wiley, J. (1997). *Manual of Mineralogy*. New York: REVERTÉ.