

Reagents from vegetable origin for gold adsorption in acid solutions

Daniel Suárez Zelada, Estudiante¹, Larry Noel Arévalo Hernández, Estudiante², and Gustavo Jamanca-Lino³,
Magister

¹Universidad Privada del Norte, Perú, N00194915@upn.pe

²Universidad Privada del Norte, Perú, N00190251@upn.pe

³Universidad Privada del Norte, Perú, gustavo.jamanca@upn.pe

Abstract— Mining is the reason for great technological advances, which through science make it possible to manufacture electronic equipment. These devices, after their useful lifetimes, are discarded, becoming part of the millions of tons of electronic scrap produced. This huge mountain of electronic scrap has the potential for gold extraction through an acid leaching process for subsequent recovery with solvents or chemical adsorption agents. However, a series of materials have been postulated, among which are carbons, gels, and compounds extracted from vegetable matter, to manufacture adsorbent materials, giving a second use to organic matter residues, which are an interesting alternative on the way towards a sustainable industrial process. This review presents alternatives of materials such as barley, rice, orange, persimmon and apricot, capable of being transformed into adsorbent materials that achieved a 99% recovery in an estimated contact time of 0.5 to 100 contact. Since Peru is a country with enormous agricultural potential, these new applications could increase the reach of this market internationally, favoring the consolidation of sustainable technologies.

Keywords-- Vegetable reagents, electronic scrap, adsorption, alternative reagents, gold recovery.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Reactivos de origen vegetal para la adsorción de oro en soluciones ácidas

Resumen— La minería es motivo de grandes avances tecnológicos, la cual a través de la ciencia hace posible la fabricación de equipos electrónicos. Estos equipos después de su tiempo de vida son desechados pasando a formar parte de millones de toneladas de chatarra electrónica. Esta gran montaña de chatarra electrónica tiene potencial para la extracción de oro, a través de la lixiviación ácida para su posterior recuperación con solventes o agentes químicos de adsorción. Además, se ha postulado una serie de materiales, entre ellos carbones, geles y compuestos extraídos de la materia vegetal, para fabricar materiales adsorbentes, dando un segundo uso a los desechos de materiales orgánicos, que son una alternativa interesante en el camino hacia un proceso industrial sostenible. Este artículo de revisión señala siete alternativas que incluyen materiales como: arroz, cebada, arándano, caqui, naranja y limón, capaces de ser transformados en materiales adsorbentes que logran una recuperación del 99% en un tiempo estimado de 0.5 a 100 horas de contacto. Siendo el Perú un país con un enorme potencial agrario, estas nuevas aplicaciones podrían incrementar el alcance de este mercado a nivel internacional favoreciendo la consolidación de tecnologías sostenibles.

Palabras claves— Reactivos vegetales, chatarra electrónica, adsorción, reactivos alternativos, recuperación de oro.

I. INTRODUCCIÓN

La minería ha generado grandes avances en cuanto al progreso tecnológico, extracción y uso de materiales, que nos ha permitido la fabricación de nuevos componentes tecnológicos, sin los cuales sería difícil imaginar el actual desarrollo de nuestra sociedad. Todas estas grandes creaciones impulsadas por la ciencia e ingeniería, con el pasar de los años se van convirtiendo en productos de desuso, y son eliminados como chatarra electrónica [1].

Como ejemplo, en el año 2019 a nivel mundial se produjeron alrededor de 53.6 millones de toneladas métricas de residuos electrónicos. Los países que generaron grandes cantidades de residuos electrónicos son China y Estados Unidos [1].

Por otro lado, el Perú en el año 2019 generó casi 205 mil toneladas de chatarra electrónica o Residuos de Aparatos Electrónicos y Eléctricos (RAEE) [3].

A pesar de que estos materiales de desechos aún tienen valor económico (debido a los metales del grupo platino, elementos de tierras raras, y metales preciosos como el oro y la plata), solo el 17.4% de estos residuos se recicla con métodos eficaces y seguros desde una mirada ambientalista y vuelven al círculo de consumo [1].



Figura 1: Chatarra electrónica. Imagen extraída de [2]

TABLA I
PRODUCCIÓN DE CHATARRA ELECTRÓNICA EN EL AÑO 2019.

Región	Miles de toneladas métricas / año	%
Europa	895 261	34.59%
Asia	835 546	32.28%
Norteamérica	6 918	0.27%
Sudamérica	3 363	0.13%
Medio Oriente	847	32.73%
Total	2588	100%

Fuente: Informe The Global E-waste Monitor 2020 [1].

La Tabla I muestra un resumen del año 2019 sobre la producción de chatarra electrónica generada por cada región. Sumando el total generaron 2588 toneladas métricas durante el año 2019. Estos materiales contienen oro, plata, cobre, platino los cuales han sido extraídos mediante procesos mineros para su transformación en componentes. Las actividades mineras para producir estos materiales han sido cuestionadas por sus múltiples consecuencias negativas o fuertes impactos que atentan contra el medio ambiente, especialmente en la minería del oro. Por ejemplo, el cianuro (usado por la gran minería) y el mercurio (usado por la minería informal), tienen una alta toxicidad en los organismos vivos, puesto que bloquean las enzimas celulares, impidiendo la respiración y la fotosíntesis [4]. A esto hay que agregar los pasivos ambientales generados por los desmontes mineros, los drenajes ácidos y la polución que afecta a las comunidades cercanas.

La necesidad de reducir el impacto ambiental de la industria nos lleva a buscar nuevos recursos, fuera de la minería convencional, siendo la chatarra electrónica uno de los más importantes, para reutilizar materiales preciosos como el oro y la plata. En general, este metal se encuentra dentro de placas o circuitos impresos de computadoras, como una fina lámina de oro almacenada sobre un sustrato de un metal menos noble

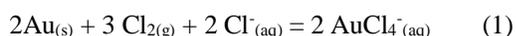
Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

como el níquel y/o cobre, y todo ello dentro de una base polimérica. El oro en placas de computadoras puede albergar de 0.1 a 0.5 gramos por cada circuito impreso [5].

El proceso tradicional de recuperar metales a partir de la chatarra, inicia con la recolección y preparación física, que busca reducir de tamaño la chatarra electrónica y concentrar los elementos valiosos usando concentración magnética y/o electrostática.

Una vez obtenido el concentrado de metales, la extracción se puede realizar a través de tres técnicas metalúrgicas: La primera es el proceso pirometalúrgico, que es la incineración o la fundición en un horno de altas temperaturas donde se somete el concentrado para la recuperación de metales preciosos, basados en la diferencia de la gravedad específica de los metales preciosos (por ejemplo, oro: 19.3 g/cm^3), llegando a eliminar las impurezas como volátiles, a través de la formación de escorias, conducida mediante la reacción química de las impurezas con los fundentes (por ejemplo: el bórax). La segunda ruta es la hidrometalurgia, donde el oro es sometido a una serie de reactivos ácidos o cáusticos, para su disolución, y posterior adsorción de un medio acuoso, por resinas sintéticas o usando un medio adsorbente como el carbón. La tercera es la electro/metalúrgica, sometiendo una solución con metales en forma iónica, a una corriente de energía, recuperando los metales por medio de la electro/obtención, y purificándolos con el uso de electrolitos en el proceso de electrorefinación [6].

Comúnmente, para los metales de chatarra electrónica, el proceso de recuperación de oro inicia con la lixiviación ácida de metales donde la mayoría de ellos son disueltos usando agua regia ($\text{HNO}_3 + 3 \text{HCl}$), o cloro en forma de gas, como muestra la ecuación 1.



En mayor detalle, en la vía hidrometalúrgica, posterior a la disolución se procede a la remoción de metales como el hierro, una etapa de re-acidificación y una etapa de extracción usando una resina de intercambio iónico, a lo cual le sigue una secuencia de desorción, filtración, reducción y eliminación de impurezas por medio de una adición final de ácido nítrico, hasta la obtención final del oro. Esta secuencia de operaciones se presenta en la Figura 2, y se puede ver las subetapas para pasar de la chatarra electrónica hasta obtener un producto final de oro de alta pureza [7].

Volviendo a la secuencia de extracción química usando resinas y ácidos, esta es bastante compleja, ya que los metales en solución deben ser separados a través de una extracción selectiva. Desde hace años se ha buscado reemplazar parcial o totalmente los reactivos usados en la etapa de adsorción, a través de soluciones, geles o carbón activado de origen vegetal, apuntando a un proceso amigable con el medio ambiente, que promueva el reciclaje de la materia orgánica. Las propiedades de adsorción de metales han sido estudiadas a partir de reactivos de origen cereal y desechos de frutas como cáscaras, a fin de ofrecer un proceso sostenible.

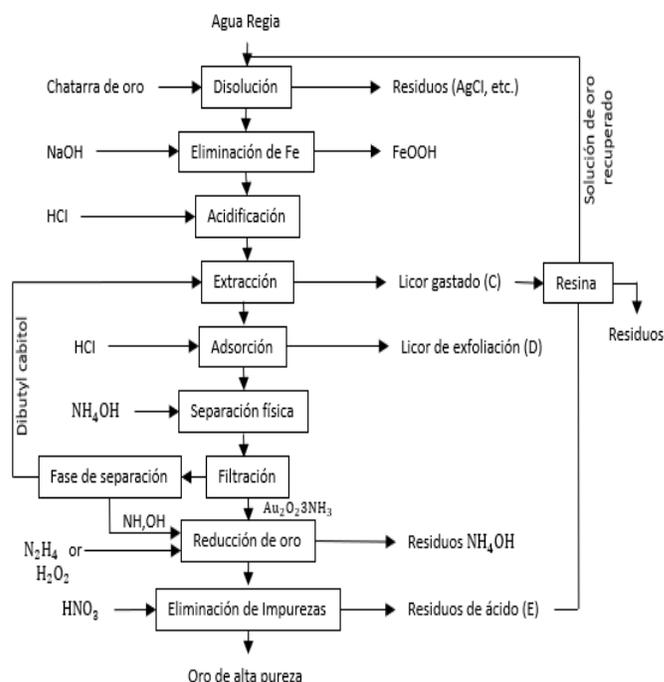


Figura 2 Secuencia de obtención del oro de la chatarra electrónica. Traducido de Syed [7]

Con la finalidad de profundizar más sobre los reactivos de origen vegetal y, por ende, su nivel de eficiencia, y postular las mejores opciones para un futuro proceso experimental, esta investigación se ha planteado como objetivo determinar cuál(es) son los mejores reactivos de origen vegetal para aplicar en la adsorción de oro en soluciones ácidas.

Para una mayor comprensión, la Figura 3, muestra las principales frutas y cereales reportadas en la literatura con resultados promisorios a nivel de “Pruebas de concepto”, como adsorbentes de oro en soluciones ácidas.



Figura 3. Frutas y cereales con potencial de usarse como reactivos de adsorción

II. METODOLOGÍA

La evaluación de reactivos se realizó a través de una revisión sistemática teniendo en cuenta la exploración de artículos acreditados. Se ha evaluado el periodo 2007 – 2022, en las siguientes plataformas: Scopus, Scielo y Google Académico. La búsqueda inicial recopiló una lista de 20 reactivos alternativos usados en alguna etapa de la obtención de oro (flotación, lixiviación o adsorción), para luego seleccionar solo aquellos que pueden ser utilizados en la etapa de adsorción, y que derivan directamente de frutas y/o cereales. Al final se seleccionaron cuatro frutas y dos cereales de los cuales se ha reportado en la literatura la fabricación de reactivos adsorbentes, clasificados en tres categorías como: materiales para la preparación de carbón activado, materiales para la extracción de solventes de adsorción y materiales para la fabricación de geles de adsorción. La investigación resume la secuencia de preparación de estos compuestos, así como el uso y los resultados preliminares de las pruebas de laboratorio encontradas en la literatura científica. Los resultados fueron comparados en base a su costo (de fruta o cereal por kilogramo en el Perú), disponibilidad en el mercado (producción de baja a gran escala en el Perú, en una escala: bajo = 1, medio = 2, alto = 3), reutilización de deshechos (bajo = 1, medio = 2, alto = 3), resultados de adsorción en términos de recuperación, tiempo para alcanzar el equilibrio (máxima recuperación en el menor tiempo) y la carga de adsorción en mol/Kg. Finalmente se realizó un análisis de alternativas, una evaluación matemática usada en diversos estudios de ingeniería de sistemas para la selección de una tecnología respecto a otras.

III. RESULTADOS

En general, el proceso inicia con la adsorción de la chatarra electrónica en un medio ácido. Por ello, se busca capturar al oro que está en estado iónico en una solución de ácido clorhídrico, para llevarlo a una posterior etapa de desorción. Los reactivos seleccionados para la adsorción en medio ácido se resumen en la Tabla II.

TABLA II
TIPO DE REACTIVOS Y MECANISMO DE PREPARACIÓN.

Material orgánico	N°	Reactivo final	Preparación
Cáscara de arroz	01	Carbón	Calcinción
Paja de cebada	02	Carbón	Calcinción
Tanino de arándano	03	Adsorbente líquido	Extracción
Tanino de caqui	04	Adsorbente líquido	Extracción + Fermentación
Cáscara de caqui	05	Gel	Reticulación
Cáscara de naranja	06	Gel	Reticulación
Cáscara de limón	07	Gel	Reticulación

Fuente: Elaborado por los autores [8-13]

A. Preparación de materiales de adsorción

El proceso de preparación va a depender de acuerdo con el tipo de material adsorbente. La Tabla III, da a conocer las condiciones de preparación de los siete reactivos orgánicos

(cereales, taninos y cáscaras de frutas), teniendo en cuenta el tiempo y la temperatura para finalmente obtener el producto de adsorción.

Para la preparación de los geles de adsorción se tuvo en cuenta un concentrado de ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 96% para la Naranja, 72% para el Caqui y 3.38% para el limón. La información seleccionada para el análisis incluye las condiciones fisicoquímicas (temperatura, reactivo de lixiviación/reticulación, concentración). El proceso empieza con el secado al ambiente de la cáscara, seguido de la trituración. Las partículas trituradas son puestas en contacto con una solución ácida como el ácido sulfúrico, durante 24 horas a una temperatura de $100^\circ C$ [8]. El producto es filtrado, y el residuo sólido se neutraliza, lava y seca por 24 horas para ser triturado nuevamente y alcanzar un tamaño micrométrico. Por ejemplo, el reactivo, gel de cáscara de caqui es producto de la trituración en pedazos finos de la cáscara y la mezcla en una solución concentrada en ácido sulfúrico agitando durante 24 h a $100^\circ C$, luego se neutraliza con solución de bicarbonato de sodio, se lava con agua destilada, pasa a un proceso de secado durante 24 h, para luego triturarlo obteniendo un polvo [9]. Por otro lado, la cáscara de naranja es sumergida en ácido sulfúrico al 96%, durante 24 horas a $100^\circ C$. La cáscara lixiviada es neutralizada y triturada a un tamaño de 300 mm. Una opción al uso de los geles de adsorción es la preparación de carbón activado a partir de la materia orgánica. En general el carbón activado ha sido ampliamente usado en soluciones básicas, para la adsorción de oro. Para soluciones ácidas, el carbón es preparado a través de un proceso de calcinación a $800^\circ C$ durante 1 hora, y luego es molido, lavado y secado a $50^\circ C$ durante 24 horas [10]. Finalmente, la tercera opción es la fabricación de soluciones adsorbentes derivadas de compuestos orgánicos como el tanino, que son directamente obtenidos de las frutas, usando soluciones como la acetona y en algunos casos, fermentando el material extraído y mezclado la solución con dióxido de sílice mesoporosa para sostener la cadena de “reticulación”.



Figura 4. Preparación de reactivos con cereales y taninos de frutas [8-13].

Por ejemplo, el tanino fabricado del arándano (BT) se mezcla para unir sus enlaces covalentemente sobre una muestra de sílice mesoporosa (SiO₂), utilizando el glutaraldehído como agente de reticulación. La preparación de BT-SiO₂ se realiza en un medio de agitación a 298 K (25°C) durante 2 h, previo a añadirse el glutaraldehído. Finalmente, la mezcla se agita por 24 horas adicionales a 303 K (30°C), para obtener el adsorbente BT-SiO₂ por filtración; el cual es lavado con agua desionizada y secado al vacío a 323 K (50°C) durante 12 horas [11]. Por otro lado, el tanino de caqui se extrae mediante el proceso del kakishibu (zumo de kaki verde) el cual se fermenta y los polímeros de tanino se entrecruzan mediante una reacción de condensación. La Figura 4, resume la preparación de los reactivos orgánicos específicamente con cereales y taninos de frutas, mientras que la Figura 5, describe el proceso de los reactivos orgánicos (geles) de las cáscaras de frutas.

TABLA III
CONDICIONES DE PREPARACIÓN

Código	Preparación	Tiempo	Temperatura
01	Calcínación Secado	1 hora 24 horas	800° 50°C
02	Carbonización	1 hora	800°C
03	Extracción	24 h	30°C
04	Extracción + Fermentación	No especifica	25°C
05	Reticulación	30 horas	30°C
06	Reticulación	24 horas	100°C
07	Reticulación	24 horas	40-50°C

Fuente: Elaborado por los autores [8-13].

B. Resultados experimentales de adsorción reportados en la literatura

Los desechos agrícolas como la cáscara de arroz y la paja de cebada (que se obtiene a bajos costos de producción) son altamente selectivos y eficientes para el oro. Ambos son transformados en carbones con un área específica de 319 y 792 m²/g respectivamente. Por un lado, la cáscara de arroz es bastante selectiva a la adsorción del oro en presencia de otros metales como Pt (IV), Pd (II), Cu (II), Fe (III) y Ni (II). Por otro lado, la paja de cebada adsorbe también el platino y el paladio de la solución siendo menos selectiva. La baja cinética de la cáscara de arroz reduce su recuperación de oro frente a soluciones industriales [10].

El tanino de arándano es obtenido de la selección de la fruta verde del cual se extrajo el zumo para su fermentación y mezclado con sílice mesoporosa finalizando en una condensación (BT-SiO₂). Los experimentos de adsorción se realizaron en un agitador orbital, se añadió 0,1 de BT-SiO₂ a 100,0 mL de una solución de 50 mg/l de Au³⁺, cuyo rango de pH se encontraba de 2,0 a 7,0. El proceso de adsorción se realizó a 303 K (30°C) con agitación frecuente durante 24 h dando como resultado una adsorción efectiva de oro hasta 642,0 mg/g (0.003 M/kg) a 323 K (50°C) [11]. Por otro lado, para el tanino de caqui, el proceso de adsorción se realizó a temperatura ambiente en un agitador termostático, se colocaron 0.20g de este biosorbente en 40 mL de soluciones en matraces Erlenmeyer de 100 mL. Las concentraciones antes y después de

la adsorción de iones metálicos se determinaron utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica [12].

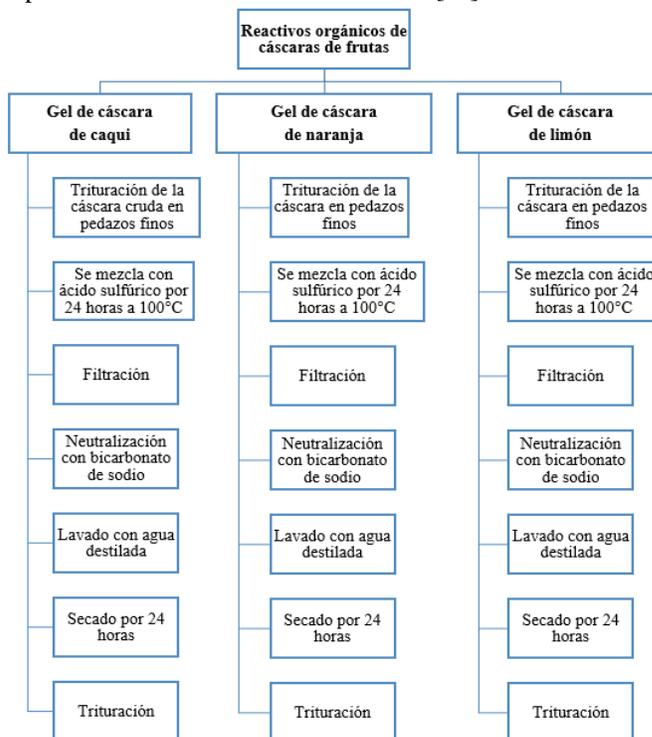


Figura 5. Preparación de reactivos con cáscaras de frutas.

Para la fabricación de gel a partir de la cáscara de caqui, se observa una buena adsorción del oro recuperando un 100% en solo 20 horas, a temperatura moderada (30°C) y con una carga de hasta 9 mol Au/ Kg de gel seco.

Este gel, presenta una selectividad alta a la adsorción de oro (III) a partir de un medio cloruro acuoso, con la presencia de otros metales como Cu (II), Fe (III), Pd (II), Pt (IV), Sn (IV) y Zn (II). El gel de naranja por su parte llega hasta a un nivel de adsorción de 10 mol Au/Kg de cáscara de naranja procesada, lo cual lo hace un elemento importante en comparación a materiales convencionales como el carbón activado (2.5 mol/Kg).

A pesar de esta gran ventaja, la cinética es lenta y a la adsorción le toma más de 100 horas alcanzar el equilibrio [8]. Para finalizar, el gel de cáscara de limón, también evidencia una alta afinidad y selectividad por el oro, pero con cinética lenta y requiere de un incremento de temperatura.

El reporte en la literatura muestra que, para alcanzar el equilibrio de adsorción, se necesitó un tiempo de agitación de 24 h a 30°C, donde el oro estaba en forma iónica en un medio HCl 0,1 M junto con 10mg de gel de limón. La adsorción de Au (III) se puso a prueba con varias temperaturas, conforme va subiendo a 30°C se nota más del 50% de recuperación, a las 24 h llega a estar cerca del 100% por encima de los 40°C [13], mostrando el efecto benéfico de la temperatura en la cinética. Los resultados de todos estos experimentos se resumen en la Tabla IV.

C. Análisis de alternativas

En este apartado vamos a seleccionar el mejor reactivo potencial de origen vegetal para aplicar en la adsorción de oro en soluciones ácidas.

TABLA IV
RESULTADOS EXPERIMENTALES [8 - 13].

1	2	3	4	5	6	7	Referencias
01	1.30	3	0.76	96%	23 h	3	(Chand, 2009)
02	0.32	1	1.40	97%	4 h	3	(Chand, 2009)
03	5.47	1	3.26	100%	0.5 h	1	(Huang, 2010)
04	0.78	1	3.8	97%	72 h	1	(Kawakita, 2008)
05	0.78	1	9.0	100%	20 h	3	(Parajuli, 2007)
06	0.81	3	10.8	100%	100 h	3	(Kawakita, 2009)
07	0.54	3	15.0	100%	24 h	3	(Parajuli, 2008)
Mayor valor	5.47	3	15.0	100	100	3	

Leyenda: 1= Código. 2 = Costo \$/kg. 3=Disponibilidad. 4 = valor q de adsorción en mol/Kg. 5 = Porcentaje de recuperación. 6 = Tiempo. 7 = reutilización de materiales.

Para poder comprender el grado de influencia en la selección final de cada criterio, en la Tabla V se han asignado los factores de ponderación en una escala del 1 al 5 (1= Muy poca influencia, 2 = Poca influencia, 3= Regular influencia, 4=Alta influencia y 5= Muy alta influencia). Los factores de ponderación se consideran positivos porque el valor mayor es el deseado y es negativo porque se busca el menor valor.

TABLA V
FACTORES DE PONDERACIÓN

1	2	3	4	5	6	7
	-4	+5	+4	+4	-3	+3

Leyenda: 1= Código; 2 = Costo \$/kg; 3=Disponibilidad; 4 = q mol/Kg; 5 = Porcentaje de recuperación; 6 = Tiempo; 7= Reutilización de materiales.

Para sacar el ranking en la Tabla VI, se procede a dividir cada valor experimental, con el valor mayor de cada categoría, y se multiplica por el factor de ponderación. Seguidamente, se saca el resultado de los valores de cada uno de los vegetales y frutas, y se establece el ranking según las condiciones de costo, disponibilidad, adsorción, porcentaje de recuperación, tiempo, reutilización de materiales y resultados con la finalidad de tener la mejor alternativa que se adapte a las necesidades operativas.

TABLA VI
RESULTADOS DEL RANKING

1	2	3	4	5	6	7	8	9
01	-0.9	5.0	0.2	4.8	-0.6	3	11.5	3
02	-0.2	1.6	0.3	4.8	-0.1	3	9.4	5
03	-4.0	1.6	0.8	5.0	-0.9	1	3.5	7
04	-0.5	1.6	1.0	4.8	-2.1	1	5.8	6
05	-0.5	1.6	2.4	5.0	-0.6	3	10.9	4
06	-0.5	5.0	2.8	5.0	-3.0	3	12.3	2
07	-0.3	5.0	4.0	5.0	-0.7	3	16.0	1

Leyenda: 1= Código. 2 = Costo \$/kg. 3=Disponibilidad. 4 = q mol/Kg. 5 = Porcentaje de recuperación. 6 = Tiempo. 7 = Reutilización de materiales. 8 = Resultados. 9 = Ranking.

D. Oportunidades en Perú

Nuestro país es un gran productor de limón (región Piura), con una amplitud agrícola de 12 mil hectáreas, en las cuales su producción varía entre 4 y 10 ton/ha. Este insumo se utiliza por lo general, para el consumo doméstico, gastronómico,

industrialización, transformación en aceites esenciales y la cáscara triturada es utilizada para extraer gel que funciona como adsorbente para el oro en soluciones ácidas [14]. El limón, que encabeza nuestro ranking, es un fruto que se siembra y se cosecha todos los días del año. El periodo que comprende desde el cultivo hasta la cosecha dura un lapso de cuatro años, teniendo una duración vital de 15 años. [15]. El tipo de suelo que requiere este fruto es un terreno arenoso, profundo y húmedo con un pH de 5.5 a 7.0. Pertenece a una temperatura variada produciendo más rápido en un ambiente cálido y se hace postrero en un clima frío, variando entre dos a cuatro meses para su cosecha [16].

Otra fruta de adsorción es la cáscara de naranja, que se encuentra en el segundo lugar en nuestro ranking. La cosecha de este fruto se da en dos temporadas al año, de septiembre a octubre y de noviembre a abril. El Perú es buen productor de variedades de naranja (Valencia, Washington Navel, New Hall, Navel Late y Lane Late), llegando a 20 toneladas por hectárea. Las zonas de mayor producción se ubican de manera principal en Junín y San Martín (68% de la producción total), y una producción reducida en las zonas de Lima y Cusco (32% del total). El Perú cosecha un promedio de 553 mil toneladas de naranja que abarca 28 mil hectáreas, produciendo 19.5 ton/h [17]. Para el cultivo de esta fruta se requiere un terreno arenoso con alto drenaje con un pH de entre 6 y 7 [18]. La cáscara de naranja tiene aplicaciones para la obtención de oro, debido a su contenido de hesperetina. El material es usado para viabilizar la adsorción de oro disuelto en una solución de ácido hidroclicórico.

Otro ejemplo es la cáscara de arroz, que ocupa el tercer lugar llegando al resultado de un 98% de recuperación de oro, gracias a que lo efectúan como un absorbente efectivo [19]. El arroz es un cereal que tiene las mayores áreas de producción en la Libertad, Lambayeque, Cajamarca y San Martín, aportando el 82.9%. El arroz tiene un proceso vegetativo de cuatro meses teniendo una mayor producción del 62.2% entre enero y junio. Luego de la cosecha pasa por un proceso de pilado, para esta etapa (Arequipa-Perú) cuenta con maquinarias modernas como es el caso del molino en el valle del Tambo con una capacidad de 1 ton/h.

La producción de caqui, que ocupa el cuarto y quinto lugar, está por las 50 ton/ha en el Perú [20], tiene un precio de 5.47 dólares por kilogramo [21]. La producción más alta de caqui se concentra en Huaral con el 80%, que ya se está expandiendo a Huacho, Cañete e Ica. Se requiere cinco años para que la semilla florezca y siete años para la primera cosecha. Es una fruta tropical de sabor dulce y jugosa que proporciona un ligero sabor áspero, compuesta principalmente de agua, hidratos de carbono evidenciándose en su fructosa y glucosa; entre los minerales es rico en potasio, calcio, fósforo, hierro y sodio. Si bien no es muy conocida en Perú, en países como China, Japón y Estados Unidos su consumo es significativo. Para la adsorción se usa tanto el tanino de caqui y la cáscara de caqui. [12].

La paja de cebada, que se encuentra en el sexto lugar, es considerada como un adsorbente efectivo porque llega al

resultado de un 98% de recuperación de oro. La cebada está considerada como uno de los cereales muy necesarios en el consumo peruano, siendo utilizada el 66% de su producción al forraje para animales, otro tercio se emplea para hacer bebidas y solo el 2% se utiliza en el consumo directo. De esta sale la paja de cebada que es el tallo que ha llegado a su madurez (seco) se corta y es separado de la semilla durante la trilla. Además, es considerada una fuente de energía transformada y usada como combustible en biogás, carbón vegetal o etanol.

El arándano, que ocupa el séptimo lugar con una oferta anual de 13 ton/ha [22]. Esta nueva ruta de producción inició hace más de una década (2004) a través de un proyecto con la Unión Europea, siendo la región de la sierra y el departamento de La Libertad, las zonas climáticas privilegiadas. De esta manera, se prioriza su cultivo en la sierra por sus características agroclimáticas como periodos de heladas o fríos, vientos, suelos, entre otros, con una altura de 1000 a 3000 msnm. El cultivo requiere de una específica condición de los suelos (pH de 4.5 a 5.0 y conductividad menor a 1,5 dS/m). El periodo que pasa desde la floración hasta la maduración es de 60 a 120 días. El tono azul indica madurez, además que gana peso y grados Brix que mide el cociente total de sacarosa/azúcar. En la Libertad se encuentra concentrada la mayor parte de la producción (90%), le sigue Ancash, Arequipa, Cajamarca, Ica, Lima y Lambayeque, que desde el 2012 hasta el 2016 se aprecia un crecimiento considerable en su producción.

De esta manera, podríamos impactar positivamente la industria agrícola, generando valor a las frutas que solo en estos últimos tiempos alcanzan un valor doméstico, no sólo para soluciones auríferas ácidas, sino también para las básicas, como las provenientes de soluciones cianuradas, como es el caso de la cáscara dura de huesos de albaricoque, este material alcanza un área superficial de 1387 m²/g, mayor al del carbón convencional.

En resumen, este proceso es factible y necesario de ser abordado; es decir, sacar a flote este potencial que se encuentra aún en desarrollo con la finalidad de incrementar tanto el interés en la industria del reciclaje, como en la agrícola, para lograr un mimetismo estratégico que permita el uso sostenible de materiales. Incluso, en los próximos años, futuras técnicas de biotecnología o genética permitirían producir frutas con cáscaras más resistentes o adecuadas para un segundo uso de los desechos producidos por la industria alimentaria.

IV. CONCLUSIONES

Este estudio ha recopilado los principales potenciales reactivos orgánicos, de origen natural (frutas y cereales), que pasan por un proceso de conversión para facilitar la extracción de oro en estado acuoso. Las tecnologías que incluyen elementos ya conocidos, como el carbón activado, la creación de geles de adsorción, y soluciones basadas en compuestos orgánicos, como una nueva opción, permitirían darle un segundo uso a los materiales biodegradables, que son diariamente eliminados por la industria alimentaria (como las cáscaras de frutas), dada a las cadenas de compuestos orgánicos que tienen, como los grupos

lignocelulósicos y el tanino, así como otros polifenoles. Estos procesos se darían en un ambiente ácido, que incluye iones cloro, temperaturas accesibles (20°C a 100°C), y con una cinética que llega al equilibrio desde las 0.5 hasta las 100 horas. Estos procesos ya han sido validados experimentalmente como hemos revisado en la sección de resultados. De acuerdo con los resultados que muestra la Tabla VI, todos estos reactivos tienen capacidad de selectividad para el oro, unos más que otros. El más conveniente de acuerdo con nuestros criterios de selección (costo, disponibilidad, adsorción, porcentaje de recuperación, tiempo y reutilización de materiales) es: la cáscara de limón, seguido de la cáscara de naranja, cáscara de arroz, cáscara de caqui, paja de cebada y por último el tanino de arándano. En síntesis, estos potenciales reactivos se muestran muy prometedores en la recuperación de Au (III), con un óptimo nivel selectivo y su gran capacidad de carga.

AGRADECIMIENTO

Se extiende el agradecimiento a la Universidad Privada del Norte y a su Dirección de Investigación, Innovación y Responsabilidad Social, por la gestión y apoyo recibido para la participación de LACCEI 2023, en bien de la producción del conocimiento científico y la promoción de la investigación.

REFERENCIAS

- [1] M. M. Roa, "China y Estados Unidos, a la cabeza en la generación de chatarra electrónica," *Statista*, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3NIKIEM>. [Accessed: 05-May-2023].
- [2] David, "Extracción de oro de Chatarra Electrónica," 911 Metallurgist, 2018. [Online]. Available: <http://bit.ly/3ZsHWRr>. [Accessed: 26-Feb-2023].
- [3] M. del Ambiente, "Minam impulsa el reciclaje de residuos eléctricos y electrónicos," *Gob.pe*, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3LHYqj0>. [Accessed: 05-May-2023].
- [4] C. M. A. Vizcarra, "Evaluación de la capacidad biodegradativa del género *Pseudomonas* SP. sobre cianuro de sodio en el efluente minero 'planta D-CRAIN S.R.L.' Distrito de Ocoña – Arequipa," *Bit.ly*, 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/3StsVwm>. [Accessed: 27-Feb-2023].
- [5] J. M. Ramírez, "Recuperación de oro a partir de chatarra electrónica," *Bit.ly*, 2008. [Online]. Available: <https://bit.ly/3SvaeYZ>. [Accessed: 27-Feb-2023].
- [6] Konstantin I. Popov, Stojan S. Djokić, Branimir N. Grgur, *Fundamental Aspects of Electrometallurgy*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002. <https://doi.org/10.1021/ja0252734>
- [7] S. Syed, "Recovery of gold from secondary sources—A review," *Hydrometallurgy*, vol. 115–116, pp. 30–51, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012>
- [8] H. Kawakita, M. Abe, J.-I. Inoue, K. Ohto, H. Harada, and K. Inoue, "Selective gold recovery using orange waste," *Sep. Sci. Technol.*, vol. 44, no. 12, pp. 2797–2805, 2009. <https://doi.org/10.1080/01496390903014615>
- [9] D. Parajuli, H. Kawakita, K. Inoue, K. Ohto, and K. Kajiyama, "Persimmon peel gel for the selective recovery of gold," *Hydrometallurgy*, vol. 87, no. 3–4, pp. 133–139, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.02.006>
- [10] R. Chand et al., "Selective adsorption of precious metals from hydrochloric acid solutions using porous carbon prepared from barley straw and rice husk," *Miner. Eng.*, vol. 22, no. 15, pp. 1277–1282, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.07.007>
- [11] X. Huang, Y. Wang, X. Liao, and B. Shi, "Adsorptive recovery of Au³⁺ from aqueous solutions using bayberry tannin-immobilized mesoporous silica," *J. Hazard. Mater.*, vol. 183, no. 1–3, pp. 793–798, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.07.096>

- [12] H. Kawakita, R. Yamauchi, D. Parajuli, K. Ohto, H. Harada, and K. Inoue, "Recovery of gold from hydrochloric acid by means of selective coagulation with persimmon extract," *Sep. Sci. Technol.*, vol. 43, no. 9–10, pp. 2375–2385, 2008. <https://doi.org/10.1080/01496390802151716>
- [13] D. Parajuli, H. Kawakita, K. Kajiyama, K. Ohto, H. Harada, and K. Inoue, "Recovery of gold from hydrochloric acid by using lemon peel gel," *Sep. Sci. Technol.*, vol. 43, no. 9–10, pp. 2363–2374, 2008. <https://doi.org/10.1080/01496390802148472>
- [14] Cristhian Aldana, Yesenia Saavedra, Jhony Gonzales, David Gálvez, Claudia Palacios, William Aldana, Wilmer Moncada, "Producción agrícola espacial-temporal del Citrus x limon y Mangifera indica, mediante firmas espectrales e imágenes de satélite," 2021. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.060>
- [15] M. de Agricultura y Riego, "Informe del Limón," Dirección General de Políticas Agrarias - DGPA, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/45VfDiD> [Accessed: 15-May-2023].
- [16] S. de Información Agroalimentaria Y Pesquera (SIAP), "Limón," Tam: Gobierno del Estado, 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3WSZQfV> [Accessed: 15-May-2023].
- [17] E. Ramos, "Perú produjo 553 mil toneladas de naranja Valencia en 2020", Agraria, 2021. Dirección General de Desarrollo Agrícola y Agroecología del Midagri [En línea]. Disponible: <https://bit.ly/3WJOKK0>. [Consultado: 01-jun-2023].
- [18] FERVALLE, "Estrategia de cultivo para naranja". *Advance Agriculture*, 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3C8WsUM>. [Accessed: 05-Autumn-2023].
- [19] M. Soleimani and T. Kaghazchi, "Adsorption of gold ions from industrial wastewater using activated carbon derived from hard shell of apricot stones - an agricultural waste," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 13, pp. 5374–5383, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.11.021>
- [20] C. Fukuda, "Agroperú". Universidad Nacional La Molina, Bit.ly, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3IwtXDc>. [Accessed: 27-Feb-2023].
- [21] L. M. Vegas, "Negocios. Agencia Agraria de noticias," Bit.ly, 2022. [Online]. Available: <http://bit.ly/3xRHvUL>. [Accessed: 27-Feb-2023].
- [22] S. Domínguez, "Economía. El peruano" Bit.ly, 2022. [Online]. Available: <http://bit.ly/3Y7MbjX>. [Accessed: 27-Feb-2023].