

Removal of Chromium and Arsenic by Electrocoagulation in Waters at Neutral pH

Edwin Muñoz Quispe¹, Julián Díaz-Ruiz², Gladys S. Licapa-Redolfo³

¹Universidad Privada del Norte (UPN). Cajamarca, Perú. N00028985@upn.pe

²Universidad Privada del Norte (UPN). Cajamarca, Perú., julian.diaz@upn.edu.pe

³Universidad Privada del Norte (UPN). Cajamarca, Perú., gladys.licapa@upn.edu.pe

Abstract– The objective of the research is to determine the effect of electric current and contact time on the decrease in the concentration of chromium and arsenic in water, for this purpose water sampling was carried out from a stream with concentrations of 11,099 mg/l of Cr and 2.53 mg/L of As, which were subjected to treatment in a reactor with a volume of 1L with stirring using iron electrodes as anode and this was the sacrificial one because it generated the same Fe^{2+} ions as then changed to Fe^{+3} which caused the reduction of chromium (VI) to chromium(III) on a graphite cathode. The results for both runs at both 2 and 3A demonstrated the influence of reaction time, electric current and electrodes are decisive in obtaining a removal of 99.99% of hexavalent chromium and 99.47% of As in the water, which is why we conclude that the application of electric current in the treatment of water contaminated with hexavalent chromium and arsenic is efficient and it is possible to achieve concentrations of 0.016mg/L of Cr and 0.013mg/L of As for a current intensity of 3rd and 15 minutes of contact time which are below the Peruvian laws of both the mining and metallurgical sector regulated by supreme decree No. 010-2010-MINAM that establishes a maximum value of 0.1 mg/L and the supreme decree for discharges to the sewage system No. 010-2019-housing that establishes a value of 0.5 mg/L.

Keywords– Electrical currents, reaction time, electrode, Arsenic, Chromium.

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

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

DO NOT REMOVE

Remoción de Cromo y Arsénico Mediante Electrocoagulación en Aguas a pH Neutro

Edwin Muñoz Quispe¹, Julián Díaz-Ruiz², Gladys S. Licapa-Redolfo³

¹Universidad Privada del Norte (UPN). Cajamarca, Perú. N00028985@upn.pe

²Universidad Privada del Norte (UPN). Cajamarca, Perú., julian.diaz@upn.edu.pe

³Universidad Privada del Norte (UPN). Cajamarca, Perú., gladys.licapa@upn.edu.pe

Resumen. – La investigación tiene por objetivo determinar el efecto de la corriente eléctrica y el tiempo de contacto en la disminución de la concentración de cromo y arsénico en aguas, para ello se realizó el muestreo de agua de una quebrada con concentraciones de 11.099mg/l de Cr y 2.53 mg/L de As, los cuales fueron sometidos a tratamiento en un reactor de un volumen de 1L con agitación empleando como ánodo electrodos de hierro y este fue el de sacrificio debido a que generó los iones Fe^{2+} el mismo que luego pasó a Fe^{+3} que provocó la reducción del cromo (VI) a cromo (III) en un cátodo de grafito. Los resultados para ambas corridas tanto a 2 y 3A, se demostró la influencia de tiempo de reacción, la corriente eléctrica y los electrodos son determinantes para poder obtener una remoción de 99.99% de cromo hexavalente y 99.47% de As en el agua, de lo cual concluimos que la aplicación de la corriente eléctrica en el tratamiento de aguas contaminadas con cromo hexavalente y arsénico son eficientes y se logra conseguir concentraciones de 0.016mg/L de Cr y 0.013mg/L de As para una intensidad de corriente de 3^a y 15 minutos de tiempo de contacto los cuales se encuentran por debajo las leyes peruanas tanto del sector minero metalúrgico normada por el decreto supremo N° 010-2010-MINAM que establece un valor máximo de 0.1 mg/L y el decreto supremo para descargas al sistema alcantarillado N° 010-2019-vivienda que establece un valor de 0.5 mg/L.

Palabras clave: Corrientes eléctrica, tiempo de reacción, electrodo, Arsénico, Cromo

I. INTRODUCCION

El cromo es un metal muy utilizado en procesos industriales como la fabricación de circuitos impresos, el curtido, el tratamiento de metales, la galvanoplastia y el acabado de metales. Suele encontrarse en forma trivalente y hexavalente en soluciones acuosas [1].

El Perú ocupa el quinto lugar como exportador en el rubro del calzado elaborado de cuero a nivel de Latinoamérica, siendo los departamentos de La Libertad, Lima y Arequipa los que presentan la mayor cantidad de industrias dedicadas a esta actividad económica. La libertad cuenta con 85 curtiembres, entre negocios formales e informales, pero 20 de ellas están ubicadas en un parque industrial que no cuenta con suficientes instalaciones de tratamiento de aguas residuales para atender esta actividad [2].

El arsénico un elemento natural en la corteza terrestre; se encuentra ampliamente distribuido en todo el medio ambiente y se encuentra en el aire, el agua y la tierra. Su forma inorgánica es altamente tóxica. La contaminación por arsénico del agua subterránea es un problema generalizado y varias áreas tienen altos niveles de contaminación por arsénico en el agua potable. Se estima que 140 millones de personas en al menos 70 países beben agua con niveles de arsénico superiores a la directriz provisional de 10 μ g/l de la Organización Mundial de Salud [3].

Los problemas ambientales causados por la minería han aumentado significativamente, ya que diversos elementos químicos ingresan al medio circundante (suelo, agua y aire) [4], [5].

Además, estas operaciones mineras y metalúrgicas generan grandes cantidades de residuos, llamados relaves, que contienen metales y sulfuros [5].

El drenaje ácido de mina (AMD), agua contaminada por la oxidación de sulfuros metálicos, a menudo tiene un pH ácido y niveles elevados de metales y sulfatos que se liberan al medio ambiente [6].

Su generación, aislamiento, transferencia y mitigación involucran procesos complejos que combinan factores físicos, biológicos y químicos [7], [8].

De lo expuesto anteriormente podemos concluir que sea el tipo de actividad genera impacto al medio ambiente, las leyes peruanas norman los vertidos a los cuerpos de aguas, así el límite máximo permisible se presenta en la tabla 1 [9]:

TABLA I
LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LA DESCARGA DE EFLUENTES LIQUIDOS DE ACTIVIDADES MINERO – METALURGICOS EN PERU

Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el promedio anual
pH		6-9	6-9
Sólidos totales en suspensión	mg/L	50	25
Aceites y Grasas	mg/L	20	16
Cianuro total	mg/L	1	0.8
Arsénico total	mg/L	0.1	0.08
Cadmio Total	mg/L	0.05	0.04
Cromo Hexavalente	mg/L	0.1	0.08
Cobre Total	mg/L	0.5	0.4
Hierro (Disuelto)	mg/L	2	1.6
Plomo Total	mg/L	0.2	0.16
Mercurio Total	mg/L	0.002	0.0016
Zinc Total	mg/L	1.5	1.2

Según la tabla 1, el valor máximo para una descarga de tipo minero metalúrgico en el Perú es 0.1 mg/L en cualquier momento y para el promedio anual es 0.08 mg/L, por otro lado, el valor máximo para arsénico 0.1mg/L y 0.08mg/L promedio anual según decreto supremo N° 010-2010-MINAM [9].

Los estándares nacionales de calidad ambiental para la valoración máxima admisible (VMA) se muestra en la tabla 2 [10].

TABLA II
VALORES MAXIMOS ADMISIBLES EN EL PERU

Parámetro	Unidad	Simbología	VMA para sistemas de alcantarillado
Aluminio	mg/L	Al	10
Arsénico	mg/L	As	0.5
Boro	mg/L	B	4
Cadmio	mg/L	Cd	0.2
Cianuro	mg/L	CN-	1
Cobre	mg/L	Cu	3
Cromo Hexavalente	mg/L	Cr ⁺⁶	0.5
Cromo Total	mg/L	Cr	10
Manganeso	mg/L	Mn	4
Mercurio	mg/L	Hg	0.02
Níquel	mg/L	Ni	4
Zinc Total	mg/L	1.5	1.2

Esta valoración es 10mg/L para cromo total y 0.5 mg/L para arsénico de descargas al sistema de alcantarillado en el Perú, de acuerdo con el decreto supremo N° 010-2019-vivienda [10].

Los metales pesados producidos por diversas industrias se vierten en aguas superficiales sin ningún tratamiento, lo que tiene un impacto negativo importante en el medio ambiente, ya que muchos de estos contaminantes no son biodegradables y son altamente tóxicos para los organismos acuáticos, incluso en pequeñas [11].

En el tratamiento de aguas residuales industriales se suelen utilizar diversos procesos para asegurar que el agua cumpla con los parámetros marcados por la normativa ambiental, pero el proceso de eliminación de metales pesados es complejo y costoso, y la desventaja es que las aguas residuales se producen mediante diferentes métodos de tratamiento [12].

Los estudios Eco toxicológicos han puesto de relieve que la ingesta de agua con niveles elevados de iones de cromo, en concreto el cromo hexavalente, podría tener efectos perjudiciales directos sobre la salud humana a través de la bioacumulación, los animales, los organismos acuáticos y el medio ambiente, en la salud humana a través de la bioacumulación, en los animales, en los organismos acuáticos y en el medio ambiente en general [13]. Según un estudio toxicológico, el límite máximo permitido en el agua potable debe ser de < 0,05 ppm [14]. En respuesta a este estricto marco normativo y la norma, diversos estudios idearon formas de tratar, eliminar y recuperar los iones de cromo de las matrices de agua y aguas residuales. Entre ellas se incluyen la electrocoagulación [15].

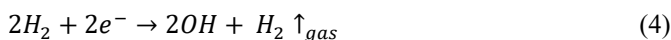
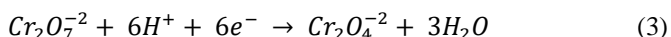
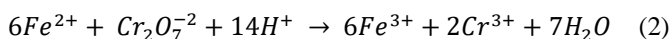
El tratamiento electroquímico se considera una buena opción para remediar problemas que presenta cromo hexavalente, en este proceso se realizan dos depuraciones simultáneamente con aguas residuales contaminadas con cromo hexavalente: electro oxidación y electro-reducción de hierro. La concentración de cromo hexavalente en aguas residuales se puede reducir con materiales de electrodos usados [16].

Utilizando un prototipo de electrocoagulación (EC) para eliminar el arsénico y el fluoruro del agua de pozo para abordar los problemas actuales del consumo humano en el acuífero del Valle del Guadiana en Durango, donde históricamente las concentraciones de fluoruro oscilaban entre 0,18 y 27ppm y las concentraciones de arsénico entre 0,0049 y 0.3202ppm, los cuales son superan los estándares sin embargo disminuyen significativamente las concentraciones [17].

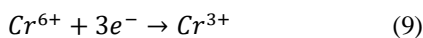
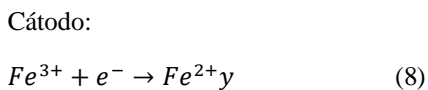
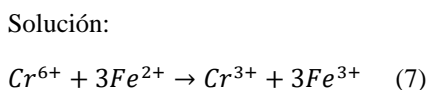
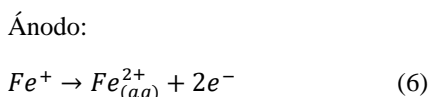
Existen estudios donde se describe el proceso electroquímico para la reducción de Cr (VI) a cromo trivalente Cr (III), este proceso se logra cuando se pasa una corriente continua a través de un electrodo de acero al carbono y el ánodo se desgasta y libera iones de hierro Fe (II) [18]. Las ecuaciones que se describen en este estudio son las siguientes:



Solución



Estudios posteriores describen los cambios en la valencia del hierro y cromo [19], [20], describiendo el proceso de forma simplificada por medio de las siguientes ecuaciones:



Estas ecuaciones se pueden representar mediante la siguiente figura.

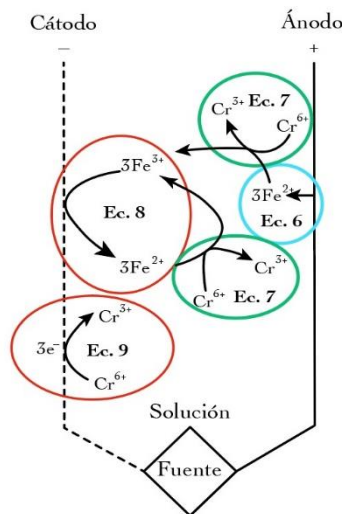


Fig.1 Esquema de las reacciones dentro de un reactor electroquímico [19].

Durante este proceso, los iones Fe (II) deben moverse a través del líquido para reaccionar con el Cr (VI) y reducirlo, y es útil agitar la solución porque aumenta la velocidad de eliminación del Cr (VI) porque se evita la acumulación de Fe (II) en la superficie del electrodo, impidiendo su pasivación. Además, se mejora la transferencia de iones Cr (VI) al cátodo y su posterior reducción [21].



Fig.2 Superficie de los electrodos con una película pasivante por efecto de la falta de agitación.

El pH afecta la eficiencia del proceso de eliminación; en algunos casos se ha determinado que la mayor eficiencia en la eliminación de contaminantes se da dentro de un determinado rango de pH, y este rango puede ser incluso amplio. En general, la mejor eliminación se consigue a un pH cercano a 7 [21].

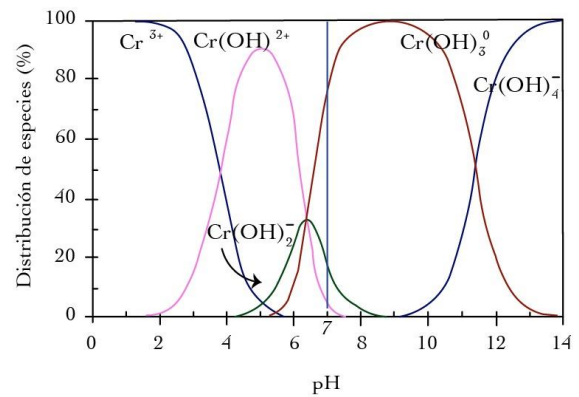


Fig.3 Distribución de especies de cromo (III) a diferentes pH en medio acuoso tomado de [22] página 74.

El efecto de otros factores operativos como: el voltaje y la densidad de corriente, así como las altas concentraciones de otros contaminantes, deben estudiarse cuidadosamente para optimizar el proceso de electrocoagulación, a gran escala. Sin embargo, estos resultados proporcionan pistas útiles para futuras investigaciones, ya que resaltan los efectos de la concentración inicial de As^{3+} , el pH y la conductividad sobre la oxidación electroquímica del arsénico [23].

En este trabajo se utilizaron electrodos de grafito porque el grafito tiene una mayor inercia química y una menor corriente residual con un menor consumo de energía en comparación con otros materiales [24], [25]; el objetivo de este trabajo de investigación fue determinar el efecto de la corriente eléctrica y tiempo de contacto en la disminución de la concentración de cromo y arsénico en aguas.

II. METODOLOGÍA

A. Tipo de Investigación

El tipo de investigación es aplicada o también llamada técnica, y tiene como finalidad resolver problemas que se presentan en la producción, distribución, circulación y consumo de bienes y servicios de cualquier actividad humana. Se llama aplicada porque la investigación básica, pura o fundamental basada en hechos o ciencia formal plantea preguntas o hipótesis de trabajo para resolver problemas en la vida social productiva. También se le llama tecnología porque su producto no es puro conocimiento sino tecnología [26].

El diseño de investigación es experimental, al manipular las variables independientes de investigación en este caso fueron los tiempos de exposición y la corriente eléctrica aplicada en la remoción de cromo y Arsénico [27].

B. Análisis de la muestra antes del tratamiento

El análisis de las muestras antes y durante el tratamiento fueron realizados por el laboratorio certificado S.G.S. se muestra en la figura 7, el envasado, rotulado y envió de muestras al laboratorio.

C. Procedimiento de diseño experimental

Para llevar a cabo la prueba se preparó una muestra sintética con contenido de cromo y arsénico de 11.099 ppm y 2.53 ppm respectivamente a un pH neutro (7.02), como se muestra en la figura 3.



Fig.3 Verificando el pH neutro de la muestra

Para el desarrollo de la prueba se usó un reactor electroquímico de 1 litro se muestra en la figura 4, la figura muestra el sistema completo.

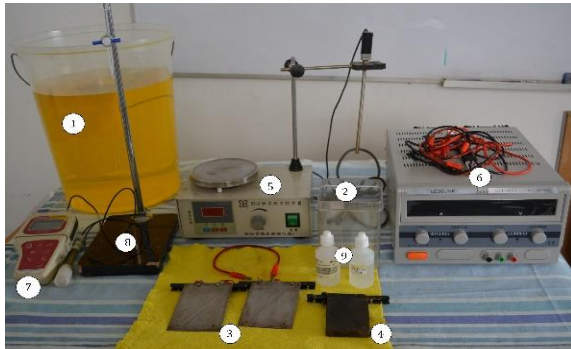


Fig.4 Montaje del sistema completo de prueba

Donde 1 es la muestra, 2 es el reactor electroquímico, 3 y 4 son los electrodos de hierro y grafito respectivamente, 5 es el sistema de agitación, 6 es la fuente de poder, 7 es el medidor de pH, 8 es el soporte universal con la bureta para regular el pH requerido [18].

Para regular la corriente de 2 y 3 amperios se usó un medidor tipo Pinza marca Fluker, como se muestra en la figura 5 y 6.



Fig.5 Medida del amperaje correspondiente a 2A, para la primera prueba.



Fig.6 Medida del amperaje correspondiente a 3A, para la segunda prueba.

El tiempo de exposición a la intensidad de corriente de 2 y 3 amperios fue de 5,10,15,20,25 minutos respectivamente, posteriormente se sacó las muestras para su lectura en el laboratorio interno y otra para el envío al laboratorio certificado S.G.S como se muestra en la figura 7.



Fig.7 Muestras enviadas a laboratorio S.G.S SAC del Perú.

III. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las pruebas experimentales.

A) Efecto de la corriente eléctrica en la variación de la concentración de cromo

Para determinar el efecto de corriente eléctrica se procedió a regular la corriente, primero a un valor de 2 y 3 amperios respectivamente, aun pH de neutro obteniéndose la gráfica en la figura 8 de la disminución de la concentración de cromo hexavalente mostrada en la figura siguiente.

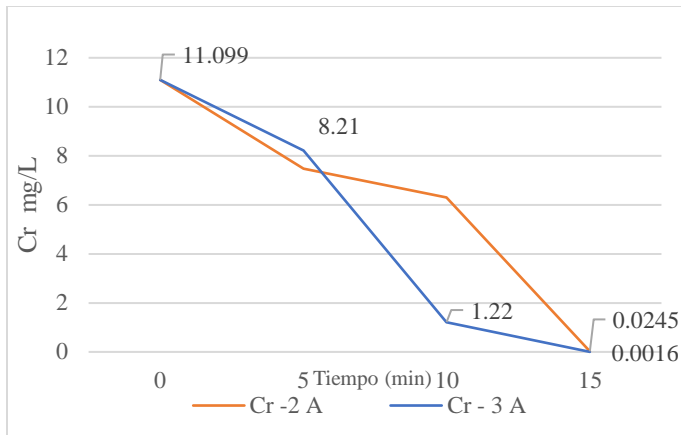


Fig.8 Efectos de la intensidad de corriente en la remoción de cromo

Se puede apreciar en la grafica el comportamiento de la disminución de cromo a 2 y 3 amperios es muy similar, la diferencia es que a una corriente de 3 amperios, la caída de la concentración del analito en menciones en 10 minuto llega a valores < a 0.005 y a 2 amperios se necesita 15 minutos, estos tiempos de disminución de concentración son significativos debido a que están por debajo del decreto supremo N° 010-2010-MINAM que establece como valor máximo 0.1 mg/L para actividades minero metalúrgicos y 10 para valores máximos admisibles en el Perú según el decreto supremo el N° 010-2019-vivienda [10].

B. Efecto de la corriente eléctrica en la remoción de cromo

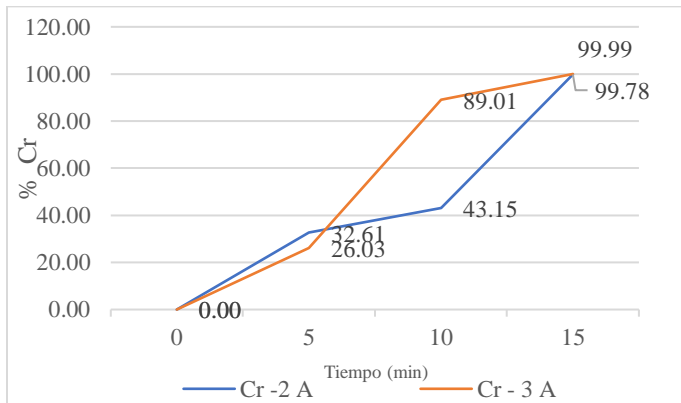


Fig.9. Porcentaje de remoción de Cr en función de la intensidad de corriente

En cuanto a la remoción de Cr se observa en la figura 9 que a 3 A en un tiempo de 10 minutos se llega a una remoción de 99.99% lo que muestra valores por debajo de los decretos supremos de las leyes peruanas tanto para efluentes con Cr de tipo minero metalúrgicos como para los de vivienda, manteniéndose en el mismo valor en los tiempos de 15, 20 y 25 minutos [9], [10], cabe recalcar que un informe de laboratorio no puede registrar valores de cero, por lo que solo indica < a 0.005 debido al límite de cuantificación de sus equipos los que hace suponer que estamos en valores muy cercanos al 100%, en cuanto a la prueba con 2 amperios podemos notar que a las mismas condiciones se llega a un 99.78%, por lo que podemos

afirmar que a ese tiempo aun no se alcanzan los máximos permisibles de Cr de las leyes peruanas, necesitando 15 minutos para hacerlo, por lo cual podemos afirmar que a 3A de corriente se llega a la remoción óptima de Cr.

C) Efecto de la corriente eléctrica en la variación de la concentración de Arsénico

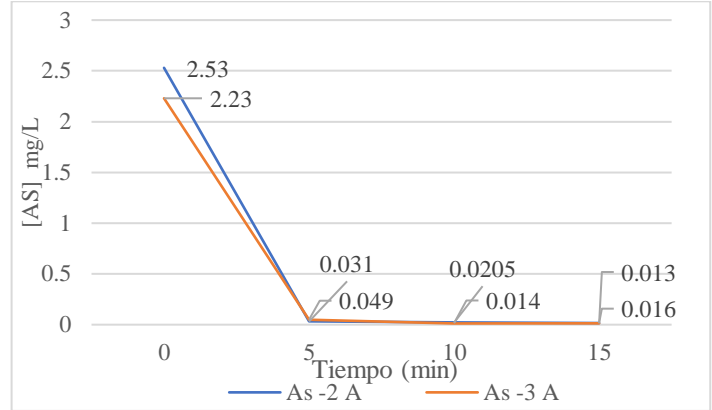


Fig.10. Efectos de la intensidad de corriente en la remoción de cromo (VI)

Se puede observar en la figura 10, la concentración de As sin tratamiento es de 2.53 mg/L y disminuye al aplicar la intensidad de corriente de 2 a 0.049mg/L y para 3 Amperios a 0.039mg/L a los 5 minutos de tiempo de contacto llegando a valores menores a 0.05mg/L según la normativa vigente en la evaluación [9], [10] y a los 15 minutos llega hasta 0.016 mg/L de 2 A Y 0.013mg/L para 3 A.

D) Efecto de la corriente eléctrica en la remoción de Arsénico

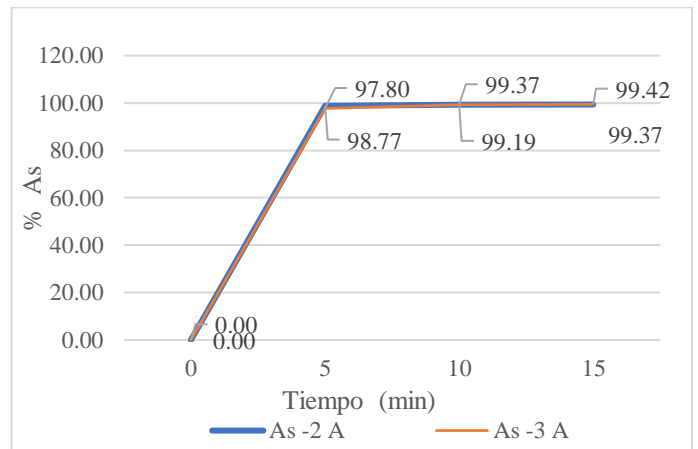


Fig.11 Porcentaje de remoción de Arsénico en función de la intensidad de corriente

Con respecto a la remoción de As, se puede observar en la figura 11, que a los 5 minutos de tiempo de contacto se tiene 97.80% de As a 2 A y 98.77% As para 3 amperios lo que muestra un porcentaje de remoción bastante alto, y a los 15 minutos de

tiempo de contacto se logra resultados de 99.42% As y 99.37% para los 2 y 3 amperios respectivamente.

En la actualidad existen varios métodos para el tratamiento de aguas contaminadas con cromo, sin embargo, en muchos de ellos no se logra a una concentración final que estén dentro de las leyes peruanas como indican los decretos supremos N° 010-2010-MINAM [9] para efluentes de tipo minero metalúrgico siendo este valor de 0.1 mg/L y según el decreto supremo el N° 010-2019-vivienda que estipula un valor de 0.5mg/L.

El uso complementario de una técnica que emplea corriente eléctrica como es la electroquímica, dio resultados muy favorables a pH neutro las remociones de cromo llegaron a 99.78% Cr y 99.99% Cr para 2 y 3 A, estando estas dentro de las leyes peruanas según los decretos supremos indicados anteriormente [9], [10], de igual forma el porcentaje de remoción de As llegaron a 99.42% As y 99.37% As para ambos intensidades de corriente, estos reportaron valores por debajo de 10 mg/L para Cr y As [10], y 0.08 mg/L para As [9] por lo que se puede manifestar que se lograron disminuir las concentraciones de ambos elementos por debajo de la normativa vigente.

III. CONCLUSIONES

Se demostró que la reducción de cromo cuando se utilizan métodos electroquímicos, depende principalmente del tiempo de reacción, la intensidad de la corriente aplicada, el valor del pH de la solución y el material del electrodo. Entre los materiales de los electrodos usados se tuvo el de hierro y el de grafito, siendo este último un generador de iones (OH)⁻ que optimizó el paso de iones Fe²⁺ a iones Fe³⁺ que son los que generan la reducción de Cromo (VI) a cromo (III) que es el de menor toxicidad y el que se puede precipitar con suma facilidad. En las pruebas experimentales se mostró la falta de agitación del sistema produce una película de inhibición en los electrodos, los cuales disminuyen la eficiencia de formación de iones Fe²⁺ que son los generadores de la reducción de cromo. Finalmente se puede concluir que es factible la remoción de Cr y As a valores óptimos con muestras neutras empleando corriente eléctrica so eficientes logrando remociones de 99.99%Cr y 99.42% As a los 15 minutos y 3 Amperios de intensidad de corriente eléctrica.

REFERENCIAS

[1] K. Thirugnanasambandham y K. Shine, “Investigation on the Removal of Chromium from Wastewater using Electrocoagulation”, *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, vol. 16, n° 5, pp. 1–10, may 2018, doi: 10.1515/ijcre-2017-0155.

[2] B. Aguilar Ruelas y A. Soto Miranda, “Eficiencia y rentabilidad de la aplicación del tratamiento por electrocoagulación para la reducción del cromo hexavalente en las aguas residuales de Curtiembre, Arequipa, 2021”, Universidad César Vallejo, Arequipa, 2021. Accedido: 15 de enero de 2024. [En línea].

Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/84328>

[3] OMS, “Arsénico: Panorama General”, Organización Mundial de Salud.

[4] D. Varrica *et al.*, “Metals and metalloids in hair samples of children living near the abandoned mine sites of Sulcis-Inglesiente (Sardinia, Italy)”, *Environ Res*, vol. 134, pp. 366–374, oct. 2014, doi: 10.1016/J.ENVRES.2014.08.013.

[5] M. Ye *et al.*, “Removal of metals from lead-zinc mine tailings using bioleaching and followed by sulfide precipitation”, *Chemosphere*, vol. 185, pp. 1189–1196, 2017, doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.07.124.

[6] E. Pavoni *et al.*, “Mobility and fate of Thallium and other potentially harmful elements in drainage waters from a decommissioned Zn-Pb mine (North-Eastern Italian Alps)”, *J Geochem Explor*, vol. 188, pp. 1–10, mayo 2018, doi: 10.1016/j.gexplo.2018.01.005.

[7] G. S. Simate y S. Ndlovu, “Acid mine drainage: Challenges and opportunities”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 2, n° 3. Elsevier Ltd, pp. 1785–1803, 2014. doi: 10.1016/j.jece.2014.07.021.

[8] M. W. Gitari *et al.*, “Physicochemical and mineralogical characterization of Musina mine copper and New Union gold mine tailings: Implications for fabrication of beneficial geopolymeric construction materials”, *Journal of African Earth Sciences*, vol. 137, pp. 218–228, ene. 2018, doi: 10.1016/j.jafrearsci.2017.10.016.

[9] MINAM, *D.S_010-2010-MINAM - Aprueban Límites Máximos Permisibles para la Descarga de Efluentes Líquidos de Actividades Minero - Metalúrgicas*. 2010.

[10] MVCS, *D.S. N° 010-2019 - Vivienda: Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario*. 2019. [En línea]. Disponible en: www.vivienda.gob.pe

[11] J. Perales Vilchez, “Influencia del proceso de electrocoagulación en la remoción de cromo hexavalente (Cr+6) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental, 2019”, Universidad Continental, Huancayo, 2019.

[12] F. Ospina López, A. Rodríguez González, y J. González Guzmán, “Comparación de la reglamentación para el manejo de lodos provenientes de agua residual en Argentina, Chile y Colombia”, *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 8, n° 2145–6097, pp. 227–237, 2017.

[13] M. Shahid *et al.*, “Chromium speciation, bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system: A review”, *Chemosphere*, vol. 178, pp. 513–533, 2017, doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.03.074.

[14] WHO, *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4ta ed. Geneva, Switzerland: WHO, 2017.

[15] Z. Wang *et al.*, “3D hierarchically porous NiO/NF electrode for the removal of chromium (VI) from

- wastewater by electrocoagulation”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 402, dic. 2020, doi: 10.1016/j.cej.2020.126151.
- [16] A. Bustos Cedeño, “Método electroquímico para la reducción de cromo hexavalente de aguas residuales de la industria galvanoplástica”, Universidad central de Ecuador, Quito, 2016.
- [17] M. Murillo-Hernández, J. Páramo-Vargas, L. Reynoso-Cuevas, y M. Murillo - Hernández, “Technical evaluation of electrocoagulation process for the removal of Arsenic and Fluoride present in water for human consumption”, *Revista de Simulación y Laboratorio*, vol. 5, n° 14, pp. 1–12, 2018, [En línea]. Disponible en: www.ecorfan.org/bolivia
- [18] M. G. Rodríguez-Rosales, E. J. Manrique-Ramírez, y V. A. Rodríguez-Román, “Optimización del proceso electroquímico para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con Cr (VI)”, en *2º Congreso Nacional AMICA 2015*, 2015.
- [19] M. G. Rodríguez R., V. Mendoza, H. Puebla, y S. A. Martínez D., “Removal of Cr (VI) from wastewaters at semi-industrial electrochemical reactors with rotating ring electrodes”, *J Hazard Mater*, vol. 163, n° 2–3, pp. 1221–1229, abr. 2009, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2008.07.114.
- [20] J. A. Yáñez Varela, “Diseño del electrodo de un reactor electroquímico mediante modelamiento y simulación hidrodinámica”, Universidad Autónoma Metropolitana, México, 2014. Accedido: 16 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/6097/Diseno_del_electrodo_de_un_reactor_Yanez_Varela_J_A_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [21] S. A. Martínez-Delgadillo, M. G. Rodríguez-Rosales, R. Aguilar-López, y G. Soto-Cortés, “Evaluación del desempeño de reactores electroquímicos para la remoción de Cr (VI) de aguas residuales”, *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. 19, n° 4, pp. 97–103, 2004.
- [22] A. C. Rey de Castro Rosas, “Recuperación de cromo (III) de efluentes de curtido para control ambiental y optimización del proceso productivo”, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 2013.
- [23] S. Sorlini, M. Carnevale Miino, Z. Lazarova, y M. C. Collivignarelli, “Electrochemical Treatment of Arsenic in Drinking Water: Effect of Initial As₃₊ Concentration, pH, and Conductivity on the Kinetics of Oxidation”, *Clean Technologies*, vol. 5, n° 1, pp. 203–214, mar. 2023, doi: 10.3390/cleantechnol5010012.
- [24] C. Comninellis, “Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for wastewater treatment”, *Electrochimica Acta*, vol. 39, n° 11/12, pp. 1857–1862, 1994, doi: 10.1016/0013-4686(94)85175-1.
- [25] B. Marselli, J. Garcia-Gomez, P.-A. Michaud, M. A. Rodrigo, y Ch. Comninellis, “Electrogeneration of Hydroxyl Radicals on Boron-Doped Diamond Electrodes”, *J Electrochem Soc*, vol. 150, n° 3, pp. D79–D83, 2003, doi: 10.1149/1.1553790.
- [26] N. Esteban Nieto, “Tipos de Investigación”, Lima, jun. 2018. Accedido: 16 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.usdg.edu.pe/handle/USDG/34>
- [27] C. Ramos-Galarza, “Diseños de investigación experimental”, *CienciaAmérica*, vol. 10, n° 1, pp. 1–7, feb. 2021, doi: 10.33210/ca.v10i1.356.