

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA Y LA EFICACIA DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE RESIDUALES GALVÁNICOS EN UNA EMPRESA METALMECÁNICA

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY AND EFFECTIVENESS OF THE GALVANIC RESIDUAL TREATMENT PROCESS IN A METALWORKING COMPANY

 Héctor Sánchez Vargas¹  Yainerys Martínez Fernández¹  Pablo Galindo Llanes¹
 Gregorio Saenz Pohl²

¹Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz, Cuba.

²Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú.

Correspondencia:

Dr. Héctor Sánchez Vargas

hector.sanchez@reduc.edu.cu

Para citar este artículo: Sánchez, V., Martínez, F.,

Galindo, P., & Saenz, G. (2022). Análisis de la

eficiencia y la eficacia del proceso de tratamiento de

residuales galvánicos en una empresa metalmeccánica.

Revista de Investigación Hatun Yachay Wasi, 1(1), 96 - 111.

<https://doi.org/10.57107/hyw.v1i1.14>

RESUMEN

El incremento de la concentración de metales pesados en las aguas superficiales y subterráneas es un problema global que requiere de acciones dirigidas a la mejora de la eficacia y la eficiencia de los procesos de tratamiento de residuales en empresas generadoras de estos tóxicos. El objetivo de esta investigación fue analizar los factores que afectan la eficacia y eficiencia del tratamiento de residuales galvánicos en una empresa metalmeccánica, para la adopción de acciones de mejora. Se aplicó una metodología para la generación de tecnologías más limpias a través de la evaluación de desempeño con el empleo de indicadores. El metal más prevalente en las aguas residuales fue el cromo hexavalente; y la empresa cumplió con los requisitos en cuanto a su vertimiento. Se concluyó que, en el proceso no se encontraron factores que afectaban la eficacia; sin embargo, el sobreconsumo de los reactivos metabisulfito de sodio y ácido sulfúrico fueron factores que afectaban la eficiencia del proceso de reducción de Cromo hexavalente. Se elaboró una herramienta gráfica para el seguimiento del consumo de reactivos químicos, para mejorar la eficiencia del proceso.

Palabras clave: cromo hexavalente, tratamiento de residuales, eficacia, eficiencia.



ABSTRACT

The increase in the concentration of heavy metals in surface and groundwater is a global problem that requires actions aimed at improving the effectiveness and efficiency of waste treatment processes in companies that generate these toxins. The objective of this research was to analyze the factors that improved the efficacy and efficiency of the galvanic waste treatment in a metalworking company, for the adoption of improvement actions. A methodology was applied for the generation of cleaner technologies through performance evaluation with the use of indicators. The most prevalent metal in the wastewater was hexavalent chromium; and the company complied with the requirements regarding its dumping. It was concluded that, in the process, no factors were found that affected the efficacy; however, the overconsumption of sodium metabisulfite and sulfuric acid reagents were factors that affected the efficiency of the hexavalent Chromium reduction process. A graphic tool was developed to monitor the consumption of chemical reagents, to improve the efficiency of the process.

Keywords: hexavalent chromium, waste treatment, efficacy, efficiency.

INTRODUCCIÓN

Como constituyentes de muchos cuerpos de aguas se pueden encontrar un número importante de metales pesados, aunque su cuantificación sea a niveles de trazas. Cualquier catión que tenga un peso atómico superior a 23 (que corresponde al peso atómico del sodio), se considera un metal pesado; así, las aguas residuales suelen contener gran número de metales pesados diferentes. Entre ellos se puede destacar el aluminio, níquel, bario, cobalto, manganeso, plomo, cromo, cadmio, zinc, cobre, hierro y mercurio, entre otros. Todos ellos se encuentran catalogados como sustancias contaminantes (Navarro - Aviñó et al., 2007; Senior, 2015; Londoño - Franco et al., 2016) que deben tenerse obligatoriamente en consideración, para fijar valores límites de emisiones.

La presencia de los metales pesados en el medio ambiente provoca efectos negativos, tales como, mortalidad de los peces, envenenamiento de ganado, mortalidad de plancton, acumulaciones en el sedimento de peces y moluscos, entre otros (Navarro - Aviñó et al., 2007; Red de Seguridad Alimentaria - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas [RSA - CONICET], 2017); aunque, algunos de ellos son imprescindibles para el normal desarrollo de la vida biológica, y la ausencia de cantidades suficientes de ellos podría limitar, por ejemplo, el crecimiento de las algas (Arunakumara et al., 2007).

Existe un grupo importante de industrias que emiten al medio metales pesados en diferente cuantía y proporción, entre ellas

se destacan las industrias de metalurgias, las fábricas de cementos, cerámicas, baterías y tejidos. Los metales pesados también son considerados tóxicos para los seres humanos y provocan un grupo importante de trastornos, enfermedades crónicas y cáncer (Navarro - Aviñó et al., 2007; Senior, 2015; Londoño - Franco et al., 2016; Reyes et al., 2016; RSA - CONICET, 2017).

La presente investigación se desarrolló en una empresa metalmeccánica cubana en la que se identificó que el metal con mayor presencia en las aguas residuales industriales es el cromo en estado hexavalente (Cr^{6+}), llegando a concentraciones cercanas a 100 mg/L, cuando su concentración permisible para ser vertido al medio es de 0,5 mg/L según la NC 27/2012, referente al vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado - Especificaciones (Oficina Nacional de Normalización [ONN], 2012).

El efecto cancerígeno de los compuestos de cromo hexavalente no solo ha sido demostrado experimentalmente con animales, sino también ha sido confirmado por los resultados de estudios epidemiológicos realizados a grupos humanos expuestos a estas sustancias en su lugar de trabajo (Becerra - Torres et al., 2014; Ministerio de Salud de Chile [MINSAL], 2020).

El cromo hexavalente es más tóxico que el cromo trivalente, debido a la gran rapidez con que es absorbido en el tracto digestivo y a su potente carácter oxidante, dándole esto la

posibilidad de penetrar fácilmente en las membranas y provocar daños en la piel, mucosa y ojos.

Además, actúa sobre el sistema respiratorio, ocasionando laringitis, bronquitis, fibrosis pulmonar, entre otros. Cabe señalar que, el 80 % de sus compuestos se eliminan por la orina y el resto por heces, cabello y uñas. Está demostrado que si se ingieren sales de cromo hexavalente se producen intoxicaciones gastrointestinales e insuficiencia renal. Investigaciones epidemiológicas han mostrado una correlación positiva entre la actividad profesional de trabajadores bajo la acción de los cromatos y los casos de cáncer (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo [INSST], 2019).

El objetivo de esta investigación estuvo dirigido a analizar los factores que afectan la eficacia y eficiencia del tratamiento de residuales galvánicos en una empresa metalmeccánica para la adopción de acciones de mejora.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo es derivado de un estudio previo en el que se aplicó una metodología para la generación de tecnologías más limpias en la empresa objeto de estudio. El referido estudio incluyó un análisis, para la implementación de un sistema de gestión ambiental según las exigencias del entorno y un grupo de procedimientos dirigidos a, (1) la aplicación de la política ambiental; (2) la evaluación del desempeño técnico,

económico y ambiental de la industria; (3) la identificación y análisis de posibles alternativas para la solución de los problemas ambientales y (4) el monitoreo y control del desempeño técnico – económico y ambiental de la industria.

La investigación se desarrolló en el marco del procedimiento 3, el que prevé la posibilidad de reducción de la emisión, desde la fuente, el reúso y el tratamiento, siendo esta última alternativa la abordada en el presente trabajo.

Como parte de la investigación fue necesario realizar primeramente un análisis del sistema industrial de reducción de cromo hexavalente con el que cuenta la empresa objeto de estudio. Se identificó, que consta de un reactor discontinuo, el cual es cargado parcialmente con una solución al 10 % de ácido sulfúrico con el objetivo de fijar en 3 el valor del pH, luego se le añade una solución de metabisulfito de sodio ($\text{Na}_2 \text{S}_2 \text{O}_5$), para que ocurra la reacción de reducción durante un tiempo aproximado de 27 minutos. Para realizar la descarga del reactor se verifica previamente la eliminación total del Cr^{6+} . Esto se comprueba cualitativamente, empleando la técnica analítica con difenilcarbazida, especificada en la norma cubana NC 1313:2019 (ONN, 2019).

El contenido del reactor de reducción pasa a un reactor de neutralización en el que se ajusta el pH en un rango entre 6,5 y 7,5, en función de lograr la precipitación del cromo trivalente y posteriormente el agua residual es alimentada a los sedimentadores, que

separan un lodo rico en compuestos metálicos del agua tratada. El lodo extraído del fondo del sedimentador es filtrado y preparado para su disposición final. El agua clarificada es monitoreada, verificando el cumplimiento de los parámetros de vertimiento según NC 27/2012 (ONN, 2012). En efecto de esta investigación, se adoptaron conceptos de eficacia y eficiencia (International Organization for Standardization [ISO], 2015).

En correspondencia, se asumió como eficacia, al grado en el que se realizan las actividades planificadas y se logran los resultados planificados; entretanto, eficiencia como la relación entre el resultado alcanzado y los recursos utilizados.

Se realizó una evaluación técnica, económica y ambiental del sistema de tratamiento. Esta evaluación partió de la identificación de indicadores de desempeño del proceso. Se seleccionaron como indicadores de eficacia, el conjunto de los parámetros de vertimiento a las aguas terrestres y el alcantarillado. La norma de vertimiento de referencia es la norma cubana NC 27/2012.

En la Tabla 1, se muestran los parámetros permisibles promedio para los residuales líquidos dispuestos por esta norma que pudieran estar presentes en los residuales de la empresa, según los procesos con los que cuenta la misma. Entre ellos se tienen parámetros físicos (temperatura, pH y conductividad) y concentraciones de sustancias contaminantes.

TABLA 1

Límites máximos permisibles promedio (LMPP)
para los parámetros de los residuales líquidos

Parámetros	UM	LMPP
Temperatura	°C	< 50
pH	-	6 - 9
Sólidos sedimentables	ml/L	< 10
Grasas y aceites	mg/L	< 50
Conductividad	μs/cm	< 4000
Fenoles	mg/L	< 5
Al	mg/L	< 10
Arsénico	mg/L	< 0,5
Cd	mg/L	< 0,3
Cianuro	mg/L	< 0,5
Cu	mg/L	< 5
Cr ⁶⁺	mg/L	0,5
Cr total	mg/L	2,0
Hg	mg/L	0,01
Pb	mg/L	1,0
Zn	mg/L	5,0
Sulfuros	mg/L	5,0

La evaluación de la eficacia, se basó en la comparación del valor de los indicadores especificados por la norma y los valores reales medidos en el proceso. El muestreo se realizó directamente en la corriente de salida del residual. Se tomaron 18 muestras de forma aleatoria en días y horarios en el marco de un mes de trabajo.

Para evaluar la eficiencia, se seleccionó como indicador el consumo de materias primas y materiales. Este indicador de consumo (i_C) está referido a los reactivos que se consumen en el proceso de reducción de cromo hexavalente y está dado en kg de materiales/kg de cromo hexavalente tratado.

$$i_C = \frac{\text{kg de reactivo consumido}}{\text{kg de Cr}^{6+} \text{ tratado}} \quad (1)$$

El cálculo se realizó con relación al consumo de los reactivos metabisulfito de sodio y ácido sulfúrico. Este indicador se seleccionó debido al peso del consumo de los referidos reactivos en los costos de tratamiento para la empresa.

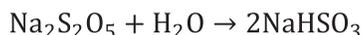
La evaluación de la eficiencia se basó en la comparación del indicador determinado estequiométricamente, evitando excedentes de los reactivos empleados (i_{CE}) y el determinado a partir de datos históricos reales registrados por la empresa (i_{CR}).

Para la determinación de (i_{CE}) fue necesario definir primeramente el sistema de reacciones químicas que tiene lugar en el sistema. El anhídrido crómico (CrO_3) es la forma que presenta el Cr^{6+} , que es empleado en los procesos de la empresa.

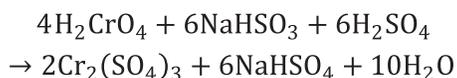
En solución acuosa se combina con el agua formando el ácido crómico a partir de la reacción:



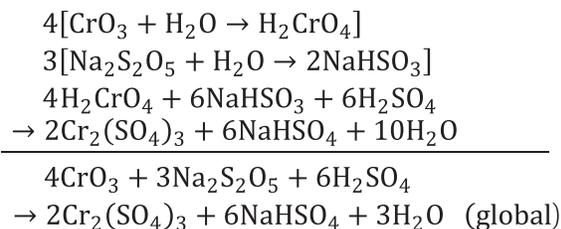
Por otro lado, el metabisulfito de sodio, potente agente reductor empleado en el sistema, al combinarse con el agua da lugar al bisulfito de sodio.



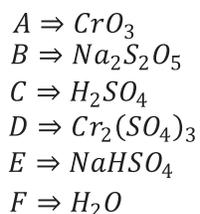
La ecuación de reducción del cromo hexavalente con bisulfito de sodio en presencia de ácido sulfúrico es:



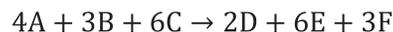
El sistema de reacciones descrito se corresponde con el esquema:



La ecuación resultante o global fue usada como referencia para el balance de masa con reacción química, definiendo:



De manera que la reacción química se puede expresar como:



Tomando a $\text{CrO}_3(\text{A})$ como el reactante de referencia y con el propósito de determinar (i_{CE}) se desarrollaron los balances de masa con reacción en un reactor discontinuo, lo que permitió determinar las cantidades de reactantes necesarios para la reducción completa del Cr^{6+} en el reactor. La ecuación general de este balance en el reactor de reducción, sobre la ecuación global de reducción previamente definida, es la siguiente:

$$n_i = n_{i0} \pm \frac{i}{a} n_{A0} X \quad (2)$$

donde

- X : Conversión de **A** que ha alcanzado el sistema reaccionante
- n_i : Número de moles de la especie **i** presentes en el reactor para una conversión dada
- n_{i0} : Número de moles iniciales de la especie **i**
- n_{A0} : Número de moles iniciales de la especie de referencia **A**
- i : Número de moles estequiométricos de la especie **I** en la reacción
- a : Número de moles estequiométricos de la especie de referencia **A** en la reacción

Nota: El operador será (+) cuando la especie química que se determina es un producto y será (-) cuando se trata de un reactante.

El balance de masa para los casos de los reactantes B y C:

$$n_B = n_{B0} - \frac{b}{a} n_{A0} X \quad (3)$$

$$n_C = n_{C0} - \frac{c}{a} n_{A0} X \quad (4)$$

Considerando que no quede excedente de los reactantes B y C al término de la reacción y que ocurre la conversión completa de Cr^{6+} se tiene que:

$$n_B = 0$$

$$n_C = 0$$

$$X = 1$$

Resultando que:

$$n_{B0} = \frac{3}{4} n_{A0} X \quad (5)$$

$$n_{C0} = \frac{3}{2} n_{A0} X \quad (6)$$

n_{B0} y n_{C0} se refiere a los moles iniciales necesarios en el reactor de reducción para la completa reducción del Cr^{6+} . A partir del desarrollo de la ecuación 1, los indicadores de consumo estequiométrico para cada uno de los reactantes B y C se determinan según las ecuaciones siguientes:

$$i_{CEB} = \frac{m_{B0}}{m_{A0}} = \frac{n_{B0} MM_B}{n_{A0} MM_A} = \frac{\frac{3}{4} n_{A0} X MM_B}{n_{A0} MM_A} = \frac{\frac{3}{4} MM_B}{MM_A} \quad (7)$$

$$i_{CEC} = \frac{\frac{3}{2} MM_C}{MM_A} = \frac{n_{C0} MM_C}{n_{A0} MM_A} = \frac{\frac{3}{2} n_{A0} X MM_C}{n_{A0} MM_A} = \frac{\frac{3}{2} MM_C}{MM_A} \quad (8)$$

Donde MM_A, MM_B, MM_C son las masas moleculares de las especies químicas.

Para la determinación del indicador de consumo real (i_{CR}) se recopilaron de los registros de control diario, los siguientes datos correspondientes a un periodo de tres años consecutivos previos a este estudio:

$C_{Cr^{6+}}$: Concentración de cromo hexavalente promedio diaria

N_{CR} : Número de cargas diarias del reactor

m_B : Masa diaria de B consumida

m_C : Masa diaria de C consumida

A partir del desarrollo de la ecuación 1, los indicadores de consumo real para cada uno de los reactantes B y C se determinaron según las ecuaciones siguientes:

$$i_{CRB} = \frac{m_B}{m_A} = \frac{m_B}{C_{Cr^{6+}} V_R N_{CR}} \quad (9)$$

donde V_R es el volumen del reactor de 4500 L.

La medición de las concentraciones de Cr^{6+} se realizaron empleando un método espectrofotométrico establecido en la norma cubana NC 1313:2019 Calidad del agua- Determinación de cromo hexavalente (ONN, 2019).

Para el montaje de la técnica analítica, se realizó inicialmente la revisión de la actitud del espectrofotómetro en uso y se trazó una nueva curva de calibración del referido equipo. Las lecturas de la medición fotométrica se realizaron usando el espectrofotómetro ajustado a 540 nm de longitud de onda y con una sensibilidad de 2. La cubeta que se utilizó para esta medición fue la cubeta de 5 mm.

Para el análisis de los datos se empleó el software Statgraphics, se le aplicaron los estadísticos descriptivos y se realizaron histogramas de frecuencia. Luego del análisis del comportamiento de los indicadores de desempeño se propusieron alternativas, para la mejora de la eficacia y la eficiencia del proceso.

RESULTADOS

Los resultados de la determinación de los estadígrafos descriptivos correspondiente a los parámetros presentados en la Tabla 1 y que constituyen indicadores de eficacia, se muestran en la Tabla 2.

Se han exceptuado los casos en los que las concentraciones estuvieron por debajo de 0,05 mg/L en todas las muestras analizadas. También, se exceptuaron la conductividad y la temperatura que se mantuvo siempre en valores muy cercanos a las condiciones ambientales.

Los sólidos sedimentables se comportaron en valores por debajo de la norma para todas las muestras, aunque en este caso se presentó alta variabilidad y el análisis estadístico arrojó que los datos procesados no deriva de una distribución normal.

TABLA 2

Estadígrafos descriptivos de los análisis del residual a la salida de la planta de tratamiento

	Cr III	Cu	Fe	Ni	Zn	pH
Cantidad	18	18	18	18	18	18
Promedio	0,754	0,094	0,992	0,078	0,258	7,389
Diferencia	0,149	0,025	0,785	0,004	0,038	0,082
Desviación Estándar	0,386	0,160	0,886	0,062	0,195	0,287
Error estándar	0,091	0,038	0,209	0,015	0,046	0,068
Mínimo	0,2	0,0	0,1	0,0	0,06	7,0
Máximo	1,37	0,56	3,9	0,24	0,7	7,8
Coefficiente de variación (%)	51,14	170,07	89,27	79,20	75,54	3,88

Como resultado del análisis de los factores que afectan la eficiencia, considerando la especie química A como Cr^{6+} , los indicadores de consumo estequiométricos resultan ser:

$$(i_{CEB}) = 2,742 \text{ kgB/kg de } Cr^{6+}$$

$$(i_{CEC}) = 2,829 \text{ kgC/kg de } Cr^{6+}$$

Al aplicar la ecuación 9 se obtuvieron un conjunto considerable de valores de (i_{CR}) , tanto para B como para C, correspondiente a cada uno de los días en los que operó la planta de tratamiento de la empresa en el periodo de tres años tomados como fuente de los datos de los registros de control.

En la Figura 1, se presenta una muestra representativa de un mes dentro de ese

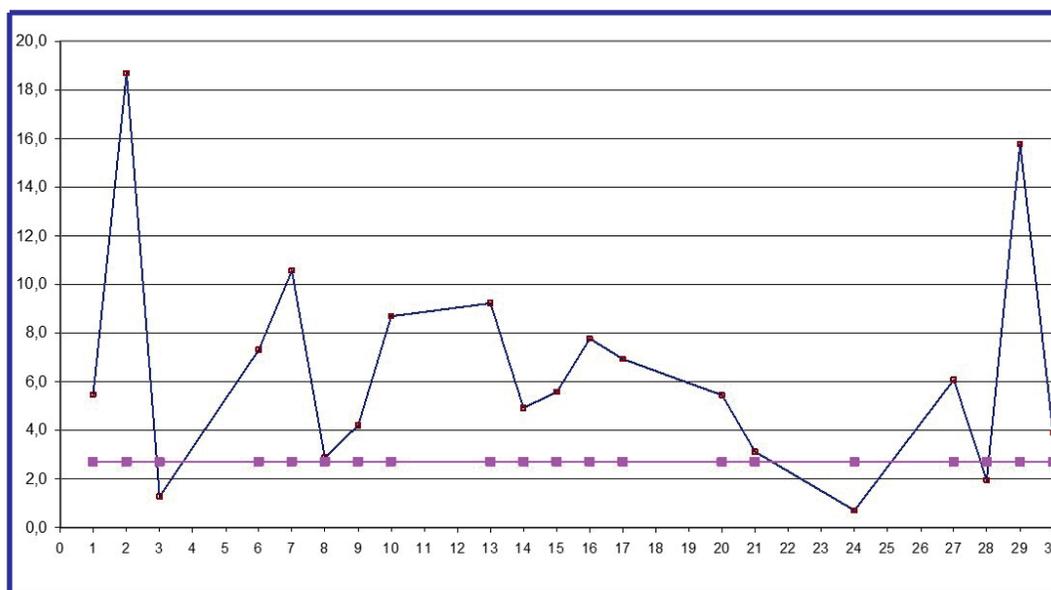
periodo en el que se visualiza la pronunciada diferencia de estos valores respecto a los de (i_{CE}) .

Este comportamiento se mantuvo durante los tres años y denota el elevado sobreconsumo de los reactivos en el que se incurre para el tratamiento del cromo hexavalente.

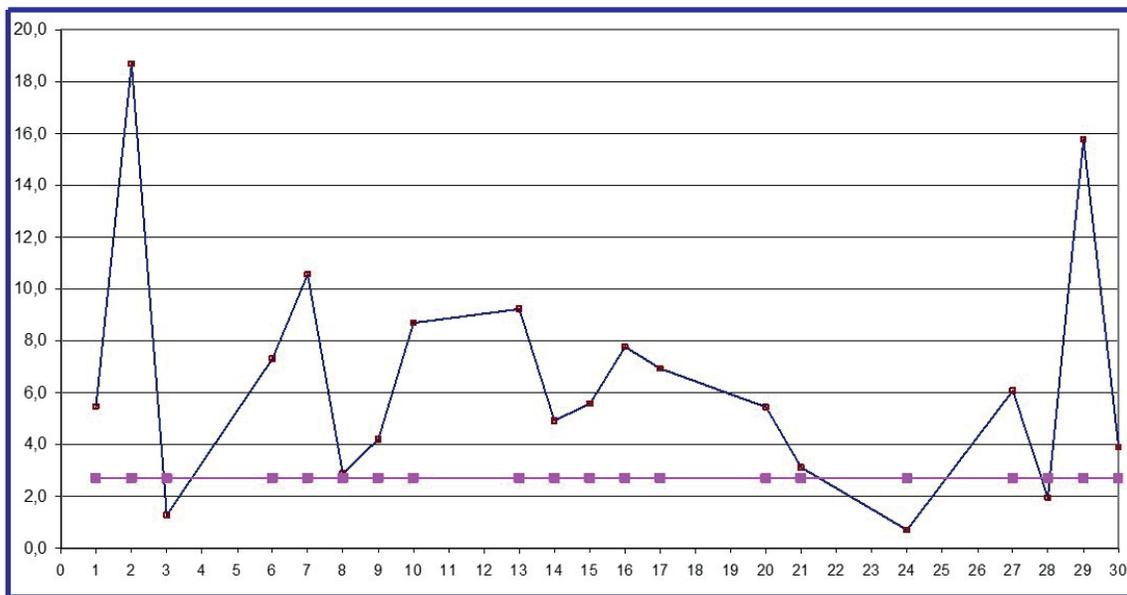
Se identificó, además, que la alta variabilidad pudiera estar influida por las variaciones en las concentraciones de Cr^{6+} en la alimentación del reactor de reducción, lo cual es mostrado en la Figura 2, a partir de los histogramas de frecuencias y el resumen estadístico sobre el comportamiento histórico de la concentración de Cr^{6+} en la alimentación del reactor de reducción.

FIGURA 1

Muestra del comportamiento de los indicadores de consumo en el sistema de tratamiento de aguas crómicas



1(a) Tiempo (días)



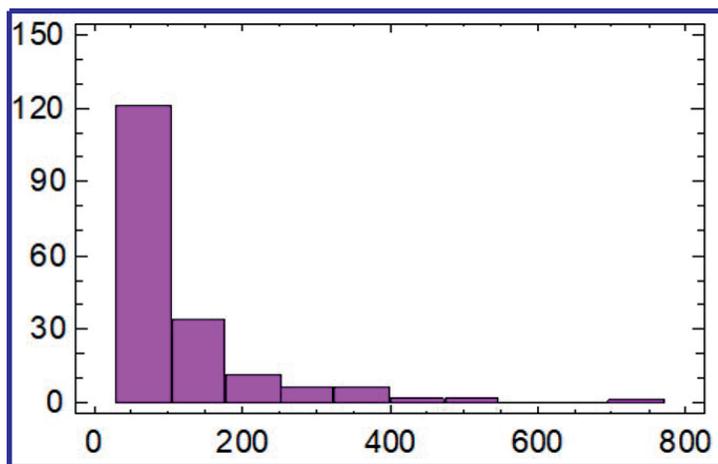
1(b)Tiempo (días)

1(a) para el consumo de B (metabisulfito), 1(b) para el consumo de C (ácido sulfúrico)
 — i_{CR} , — i_{CE} (kg/ kg de Cr^{6+})

FIGURA 2

Comportamiento de la concentración de Cr^{6+} en la alimentación del reactor de reducción (Año 1)

Año 1: frecuencia = 197; media = 114, moda = 89,0; varianza = 9840,26; desviación típica = 99,1981; error estándar = 7,06757; mínimo = 11,9; máximo = 719,0; rango = 707,1; asimetría = 2,72574; coeficiente de variación = 86,7106 %



Concentración de cromo hexavalente

FIGURA 3

Comportamiento de la concentración de Cr^{6+} en la alimentación del reactor de reducción (Año 2)

Año 2: frecuencia = 82; media = 218,223; moda = 28,0; varianza = 291882,0; desviación típica = 540,261; error estándar = 59,6618; mínimo = 11,9; máximo = 4496,4; rango = 4484,5; asimetría = 6,50159; coeficiente de variación = 247,573 %

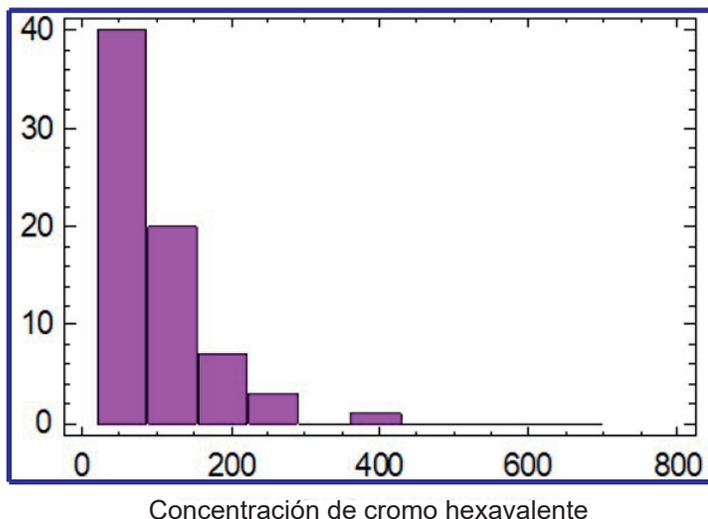
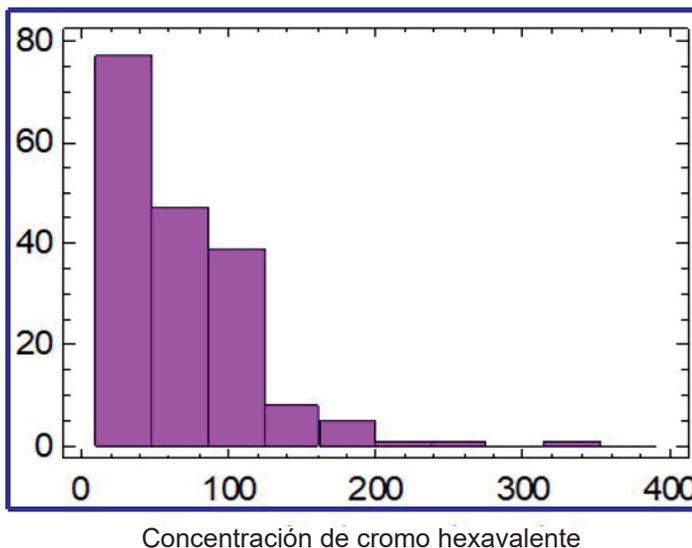


FIGURA 4

Comportamiento de la concentración de Cr^{6+} en la alimentación del reactor de reducción (Año 3)

Año 3: frecuencia = 179; medio = 68,1653; moda = 86,5; varianza = 2194,43; desviación estándar = 3,50134; mínimo = 12,0; máximo 320,0; rango = 308,0; asimetría = 1,88542; coeficiente de variación = 68,7223 %



DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos a partir de la determinación de los indicadores relacionados con la eficacia indican que la NC 27/2012 se cumplió a cabalidad en el periodo estudiado, ya que ninguno de los parámetros sobrepasó los límites máximos permisibles: sin embargo, en este caso no se puede afirmar que en algún momento puedan ocurrir incumplimientos. Las condiciones técnico-organizativas y el hecho de operar un reactor discontinuo, para la reducción del cromo hexavalente minimizan la posibilidad de que ocurran escapes al medio del este tóxico elemento. Los escapes más probables y consigo incumplimientos de la norma pudieran, ocurrir más probablemente en el caso del cromo trivalente. Se pudo constatar, el mal estado técnico del sedimentador que atenta contra la eficiencia de este equipo y el posible arrastre de sólidos sedimentables, cuyo componente fundamental es el cromo en ese estado.

El análisis del comportamiento de los indicadores de consumo que se muestra en la Figura 1, evidencian que la eficiencia del proceso estaba seriamente afectada por los sobreconsumos de los reactivos en el proceso de reducción de Cr^{6+} . Los principales problemas identificados, asociados a la baja eficiencia técnico-económico y ambiental del sistema de tratamiento resultaron:

- No están documentados los métodos para las tomas de muestras en los equipos del proceso.
- No existe método de control de la concentración de Cr^{6+} al inicio de la reacción de reducción que garantice la correcta dosificación de los reactivos y con ello la eficiencia del proceso.

- No existe una herramienta que permita determinar las cantidades de reactivos a dosificar en función de la concentración del Cr^{6+} que entra al reactor.

- No se cumplen con los tiempos de la reacción de reducción de Cr^{6+} establecidos en la tecnología. Se utilizan menos de 15 minutos en la mayoría de los casos, cuando el establecido, según la cinética de la reacción, es de 27 min.

- El deterioro en los rebosaderos de los sedimentadores provoca cortocircuito en el flujo de agua residual y con esto desaprovechamiento de las capacidades del equipo.

En el proceso pudo observarse que existe una tendencia al descontrol y alta variabilidad en el empleo de los agentes químicos que intervienen. El sobreconsumo de los reactivos provocaba un incremento en las pérdidas económicas que, calculadas a precios corrientes, alcanzó la cifra de 7800 USD en tres años solo por concepto de sobreconsumo de metabisulfito de sodio y ácido sulfúrico. En este cálculo no se tuvo en cuenta que un sobreconsumo de ácido incrementaba también el consumo de hidróxido de sodio para neutralizar en la operación posterior a la reducción.

Para dar respuesta a la situación del sobreconsumo recogido en el problema (3), se diseñó e implementó una herramienta basada en las cantidades estequiométricas que se necesitan añadir para la conversión completa del Cr^{6+} en el reactor de reducción en función de su concentración inicial. Esta se realizó empleando una hoja de cálculo en Excel y el objetivo fue determinar los

volúmenes de las soluciones de B y C (V_{B0} , V_{C0}) que se necesitaban dosificar a partir de la concentración inicial de Cr^{6+} ($C_{Cr^{6+}}$). Igualmente, se requirió conocer en cada caso cuál era el volumen de agua residual a tratar en el reactor (V_{A0}).

$$V_{B0} = \frac{m_{B0}}{C_{B0}} = \frac{n_{B0} MM_B}{C_{B0}} = \frac{3 C_{Cr^{6+}} MM_B V_{A0}}{4 C_{B0} MM_A} \quad (10)$$

$$V_{C0} = \frac{m_{C0}}{C_{C0}} = \frac{n_{C0} MM_C}{C_{C0}} = \frac{3 C_{Cr^{6+}} MM_C V_{A0}}{2 C_{C0} MM_A} \quad (11)$$

La concentración de C_{B0} y C_{C0} , que se usan en la planta de tratamiento son 25 y 177,38 g/L respectivamente.

m_{B0} y m_{C0} : Masa de metabisulfito y ácido sulfúrico que se necesitan dosificar

C_{B0} y C_{C0} : Concentraciones de las soluciones de metabisulfito y ácido sulfúrico a dosificar

Para una concentración Cr^{6+} ($C_{Cr^{6+}}$) dada, el sistema formado por las ecuaciones 10 y 11 tiene tres incógnitas V_{A0} , V_{B0} y V_{C0} , por lo que no sería soluble sin la definición de otra ecuación, que puede ser en este caso, la que queda definida con la suma de los volúmenes igual al volumen de reactor VR:

$$V_R = V_{A0} + V_{B0} + V_{C0} = 4500 \quad (12)$$

Con la solución del sistema de ecuaciones formado se pueden determinar los volúmenes necesarios a dosificar de cada una de las soluciones de los reaccionantes, pero calculado desde el punto de vista estequiométrico y sin tener en cuenta un conjunto de reacciones .

secundarias que ocurren en este tipo de sistema (Arango, 2012; Gonzáles & León, 2013).

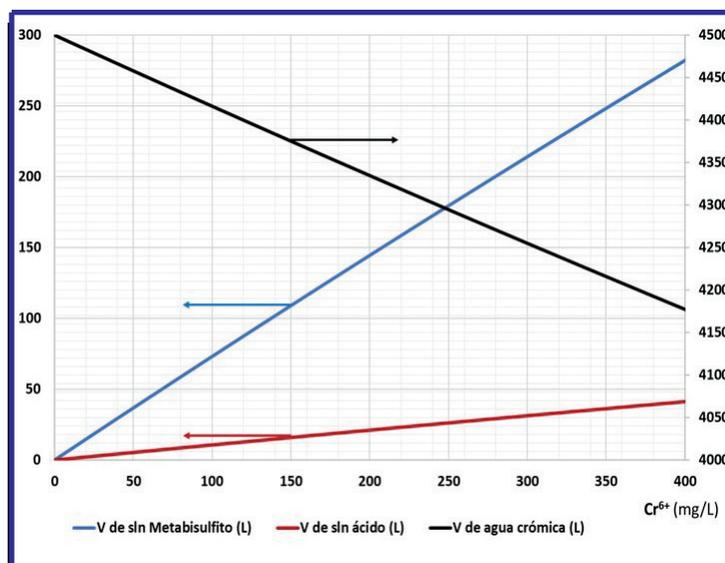
Para garantizar la conversión completa de, Cr^{6+} a los valores calculados se le debe agregar un por ciento de solución en exceso. Aunque esto es algo que debe ser estudiado en futuras investigaciones, se confeccionó el esquema que se presenta en la Figura 5, apegado a algunas pruebas realizadas a nivel de laboratorio empleando un 50 % en exceso.

A partir de la $C_{Cr^{6+}}$ se entra a la Figura 5, y en el eje vertical derecho se tendría el volumen de agua residual crómica a tratar, en el eje de la izquierda, los volúmenes de solución de metabisulfito y de ácido sulfúrico.

La Figura 5, fue propuesta como herramienta, para el control del consumo de reactivos en el proceso de reducción, se limitó hasta 400 mg/L de Cr^{6+} . La razón de esta decisión está relacionada con la baja probabilidad de que se reciban en el reactor concentraciones superiores, tal como se muestra en los histogramas de frecuencia de la Figura 2; sin embargo, se prevé la posibilidad de que esta concentración se sobrepase; las cantidades de V_{A0} , V_{B0} y V_{C0} puedan ser determinadas, como ya se ha referido, por el sistema formado por las ecuaciones 10, 11 y 12 que han sido empleadas para la confección de la propia figura (Fig 5).

FIGURA 5

Esquema para la determinación de los volúmenes de las soluciones reaccionantes en el reactor de reducción de cromo hexavalente

**CONCLUSIONES**

- El metal con mayor presencia en las aguas residuales industriales fue el cromo hexavalente.
- La Empresa cumplió con la norma obligatoria del país del vertimiento de aguas a los cuerpos de aguas terrestres y el alcantarillado.
- No se encontraron factores que afectaban la eficacia, aunque sí se apreciaron elementos que apuntaban a posibles fallas del sistema que pudieran provocar incumplimientos de lo normado.
- El sobreconsumo de los reactivos metabisulfito de sodio y ácido sulfúrico fueron los factores de eficiencia que afectaron el proceso de reducción de Cromo hexavalente.
- El empleo de una herramienta gráfica para el seguimiento del consumo de reactivos químicos pudiera contribuir a mejorar la eficiencia del proceso y minimizar la afectación técnica, económica y ambiental generada dado el sobreconsumo de reactivos químicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arango, A. (2012). *Elección de los agentes reductores mas eficientes para el tratamiento de aguas residuales industriales en una PTAR de cromado utilizando la metodología ANP y AHP*. [Tesis de Maestría. Universidad de La Sabana]. <https://intellectum.unisabana.edu.co/handle/10818/3934>
- Arunakumara, K., Xuecheng, Z., & Song, X. (2007). Estudio comparativo de la bioacumulación del plomo y cadmio en cianobacterias *Synechocystis* sp. PCC 6803 bajo condiciones de laboratorio. *Ciencias Marinas*, 33(3), 271 – 280 http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0185-38802007000300004&script=sci_arttext.
- Becerra-Torres, S., Soria-Fregozo, C., Jaramillo-Juárez, F., & Moreno-Hernández-Duque, J. (2014). Trastornos a la salud inducidos por cromo y el uso de antioxidantes en su prevención o tratamiento. *Journal of Pharmacy & Pharmacognosy Research*, 2(2), 19 – 30. <https://www.redalyc.org/pdf/4960/496050267001.pdf>
- Gonzáles, F., & León, J. (2013). *Reducción de Cr (VI) a Cr (III) por fotocátalisis en presencia de ZnO y radiación solar*. [Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de Trujillo]. https://dspace.unitru.edu.pe/handle/U_NITRU/3450
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo [INSST] (2019). *Ocupación, actividad económica y mortalidad por cáncer en España*. <https://www.insst.es/documents/94886/599872/Mortalidad+cancer.pdf/2cdf1b22-82bb-4b2f-87ac-ea846d50080d>
- International Organization for Standardization [ISO] (2015). *Sistemas de gestión de la calidad - Fundamentos y vocabulario*. <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:9000:ed-4:v1:es>
- Londoño-Franco, L., Londoño-Muñoz, P., & Muñoz-García, F. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145 - 153. DOI:[http://10.18684/BSAA\(14\)](http://10.18684/BSAA(14))
- Ministerio de Salud de Chile [MINSAL] (2020). *Protocolo de vigilancia ocupacional por exposición a metales*. Santiago de Chile. <https://www.minsal.cl/wp-content/uploads/2021/07/PROTOCOLO-DE-VIGILANCIA-OCUPACIONAL-POR-EXPOSICION-A-METALES.pdf>
- Navarro-Aviñó, J., Aguilar, I., & López-Moya, J. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas*, 16(2), 10 - 25 <http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/125>
- Oficina Nacional de Normalización [ONN] (2012). NC 27:2012. *Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado - Especificaciones*.

<http://ftp.isdi.co.cu/biblioteca/biblioteca%20universitaria%20del%20isdi/coleccion%20digital%20de%20normas%20cubanas/2012/normas%20a2012%20a2014p%20sky.pdf>

Oficina Nacional de Normalización [ONN] (2019). NC 1313:2019 *Calidad del agua-Determinación de cromo hexavalente*. <https://es.scribd.com/document/491454321/NC-1313-2019-Cromo-hexavalente-en-agua>

Red de Seguridad Alimentaria - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas [RSA - CONICET]. (2017). *Evaluación de riesgos toxicológicos en población humana, por consumo de sábalo*. https://www.researchgate.net/publication/319904167_Evaluacion_de_riesgos_toxicologicos_en_poblacion_humana_por_consumo_de_sabalo

Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., & González, E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones de salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66 - 77. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6096110>

Senior, W. (2015). *Contenido de metales pesados en organismos acuícolas expendidos en los mercados de la ciudad de machala, provincia de El Oro*. OSF Preprints. DOI: 10.31219/osf.io/55g8x