



ARTÍCULO ORIGINAL

ANÁLISIS DE CROMO HEXAVALENTE (Cr^{+6}) RESIDUAL POR COLORIMETRÍA Y TITULACIÓN EN EL PROCESO DE RECUPERACIÓN Y REÚSO DE CROMO POR PRECIPITACIÓN QUÍMICA DE LOS EFLUENTES DE UNA INDUSTRIA METALMECÁNICA

ANALYSIS OF RESIDUAL HEXAVALENT CHROMIUM (Cr^{+6}) BY COLORIMETRY AND TITRATION IN THE PROCESS OF RECOVERY AND REUSE OF CHROMIUM BY CHEMICAL PRECIPITATION OF THE EFFLUENTS OF A METAL-MECHANICAL INDUSTRY

Fernando Percy Silva Paucar¹, Raymundo Erazo Erazo².

¹Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Túpac Amaru 210 - Rímac 15333,

²Universidad Mayor de San Marcos Av. Carlos Germán Amezaga #375 - Cercado de Lima.

RESUMEN

Se analizó la concentración de cromo hexavalente (Cr^{+6}) residual en el proceso de recuperación y reúso de cromo por precipitación química de los efluentes de una industria metalmeccánica por dos métodos: colorimetría y titulación. La investigación se realizó a nivel de laboratorio aplicando los métodos y procedimientos estándares que corresponden a ambos métodos de análisis químico. Los resultados obtenidos fueron evaluados aplicando la prueba t-student, para muestras independientes, para lo cual se definieron las variables fijas y las variables aleatorias. Las variables fijas son los dos grupos de muestras independientes que fueron evaluadas por los dos métodos en mención y las variables aleatorias, son los datos numéricos de los resultados de la concentración de Cr^{+6} obtenidos. Al aplicar el análisis estadístico por t-student, se comprobó la distribución normal y la igualdad de varianza para ambos grupos, confirmando que fue el estadístico apropiado y se concluyó que las diferencias de los resultados obtenidos por ambos métodos de análisis no son significativas.

Palabras clave: Cromado, colorimetría, titulación, t-student, recuperación y reúso.

ABSTRACT

The residual hexavalent chromium (Cr^{+6}) concentration in the process of recovery and reuse of chromium by chemical precipitation of the effluents of a metalworking industry was analyzed by two methods: colorimetry and titration. The research was carried out at the laboratory level applying the standard methods and procedures that correspond to both methods of chemical analysis. The results obtained were evaluated by applying the t-student test, for independent samples, for which the fixed variables and the random variables were defined. The fixed variables are the two groups of independent samples that were evaluated by the two mentioned methods and the random variables are the numerical data of the results of the Cr^{+6} concentration obtained. When applying the statistical analysis by t-student, the normal distribution and the equality of variance were verified for both groups, confirming that it was the appropriate statistic and it was concluded that the differences in the results obtained by both analysis methods are not significant.

Keywords: Chrome, colorimetry, titration, t-student, recovery and reuse.

*Autor para correspondencia: mg.fernando.silva@gmail.com.pe
ORCID: 0000-0001-9246-6331.

Downloadable from : <http://revistas.unap.edu.pe/epg>

Av. Floral N° 1153, Ciudad Universitaria, Pabellón de la Escuela de Posgrado, tercer piso oficina de Coordinación de investigación. Teléfono (051) 363543



INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han realizado diversas investigaciones para la recuperación de cromo hexavalente a partir de diferentes tipos de efluentes (Rey de Castro 2013), estudió la recuperación de Cr^{+3} de efluentes de curtido para control ambiental y la optimización del proceso productivo (Álvarez & Chango 2012), determinando parámetros y agentes reactivos químicos precipitantes a utilizar con mayor porcentaje de recuperación entre 95,6 % a 98,8 % cuando el agente reactivo es de grado laboratorio, y 81,9 % a 84,4 % con agentes reactivos de grado industrial, recuperando cromo total (Anco 2004), cumpliendo con los límites máximos permisibles, LMP, que es cromo hexavalente 0.1 mg/L establecidos en la resolución suprema N°194-2010-PCM.

También hay otros estudios que evaluó la recuperación y reutilización de cromo en lodos galvánicos a nivel laboratorio, a partir de un proceso de recuperación por electrólisis por celda Hull, obteniendo un recubrimiento de cromo duro (Rey de Castro 2013). Además la remoción de cromo en aguas residuales industriales mediante el uso de biomasa de *Spirulina SP*, obteniendo una remoción de cromo total de más de 99 % (Arias *et al.* 2008), pero simultáneamente generó grandes volúmenes de lodos activos, aproximadamente el 30 % en volumen del agua tratada, los cuales fueron tratados por desorción y/o degradación usando una biomasa (Arias & Sánchez 2008). En otros estudios de investigación fueron planteados para la eliminación de cromo de los efluentes a partir de uso de bacterias, pero no

plantea la forma de recuperar del cromo para el beneficio industrial (Sandhya *et al.* 2021) de igual manera, se han propuesto la eliminación de cromo en efluentes como muy esencial antes del vertido al entorno aplicando membranas en base a polisulfona (PSF), polietilenglicol (PEG); y el óxido de zinc, ZnO , como aditivo con o sin tratamiento con ácido, para eliminar el cromo del agua por Pallavi (Ortiz 2013). El tratamiento de aguas residuales que contiene como subproductos industriales al cromo hexavalente, se puede tratar por técnicas electroquímicas de bajo costo, que contribuyen a resolver los problemas ambientales basados en su toxicidad (Kerura *et al.* 2021). En ninguno de estos trabajos de investigación se mencionan los métodos de análisis químico para la

determinación de la concentración de cromo hexavalente y cromo trivalente en el proceso de recuperación y reúso (Pérez 2018). Sin embargo en el Perú, existen un gran número de industrias metalmecánicas, metalúrgicas u otros (Rey de Castro 2013), en cuyos procesos se realizan recubrimientos electrolíticos o químicos por vía electrodeposición de metales (Meneses *et al.* 2018), tales como el cromo, que consiste en finas capas de metal sobre la superficie de una pieza sumergida en una solución de iones metálicos o electrolito, al cual se denomina cromado (Abril 2018). Para garantizar que la pieza presente un adecuado acabado y para disminuir el desgaste de la pieza debe haber una buena adherencia del cromo (Avendaño 2012), para esto se debe controlar la concentración de Cr^{+6} , de cromo trivalente, Cr^{+3} , y iones H^{+} que están presentes en las tinas de cromado de estos procesos (Pérez 2018). Finalmente en condiciones para un proceso de cromo duro, esta medición se puede realizar por dos métodos de análisis químico (Castañeda *et al.* 2018): colorimetría y titulación (Castañeda *et al.* 2018). El cromo hexavalente, Cr^{+6} , actúa con la misma valencia cuando se presenta en forma de cromatos o dicromatos, presentando reacciones químicas características que se detallan a continuación (Vilca 2021):

Reacción en medio ácido: $2\text{CrO}_4^{2-}(\text{ac}) + 2\text{H}^{+} \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + \text{H}_2\text{O}$ (1), esta reacción química representa la variación de los colores característicos que adopta el cromo hexavalente (Quispe 2017), en función del pH, en estado básico se presenta como cromato de color amarillo y al disminuir el pH por medio de un modificador ácido toma una coloración anaranjada (Anco 2004). Además la reacción en

medio básico: $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}(\text{ac}) + 2\text{OH}^{-} \rightarrow 2\text{CrO}_4^{2-}(\text{ac}) + \text{H}_2\text{O}_{(2)}$, en esta reacción química (Apaza 2018), el dicromato por acción de un modificador básico incrementa el pH del medio, para transformar el radical de dicromato a cromato adquiriendo la coloración amarilla (Ortiz 2013). Así mismo en el proceso de recubrimiento electrolítico (Jiménez 2018), la fase de reducción es el inicio del tratamiento de los efluentes de cromo por adición del catalizador y el agente químico reductor para el Cr^{+6} (Jiménez 2018). El proceso de la reacción química de reducción se realiza con agitación y un control de pH: $\text{Cr}^{+6} + \text{Agente reductor} \rightarrow \text{Cr}^{+3}$ (3), además el Cr^{+6} es reducido a su estado de valencia Cr^{+3} , generado por el bisulfito de sodio

(Jiménez 2018). El cambio de estado de valencia se presenta por la reacción química del reductor del NaHSO_3 en un medio ácido por H_2SO_4 : $2\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + 6\text{NaHSO}_3 + 5\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + 5\text{Na}_2\text{SO}_4 + 8\text{H}_2\text{O}$ (4), en esta reacción el Cr^{+6} presente en el $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ se reduce a Cr^{+3} (Vega 2015) y se combina con el radical sulfato para formar el sulfato crómico

$\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ que es soluble en soluciones acidas y

débilmente alcalinas; como contraparte ocurre la oxidación a sulfato de los radicales sulfito y bisulfito (Jiménez 2018). La reacción indicada requiere de la presencia del ácido sulfúrico para garantizar la reducción y mostrar un pH final entre 3,0 a 3,5 (Mollinedo 2021). En el caso del análisis por titulación, se realizará las mismas reacciones químicas a nivel laboratorio, dando como resultado el volumen consumido de la titulación y por relación estequiométrica se determina la concentración de cromo hexavalente, pero este procedimiento no está aprobado por normas internacionales.

En el caso del análisis por colorimetría, método aprobado por normas internacionales, se basa en la ley Beer-Lambert-Bouguer, el cual se enfoca en las longitudes de onda que producen la percepción del color, la excitación de los fotorreceptores en el ojo humano y la cuantificación de esa percepción, indicando cuanto absorbe de luz la materia (Mollinedo 2021), es decir, absorbe energía luminosa y almacena en forma de energía interna (Abril *et al.* 2018).

Como la energía se conserva, la diferencia de energía entre el estado fundamental de la molécula (A) y su estado excitado (A*) debe ser igual a la energía del fotón (Pérez 2018). Cada molécula tiene una serie de estado excitados discretos (o bandas) que dependen de su estructura electrónica y que la distinguen del resto de moléculas (Abril *et al.* 2018). Como consecuencia, el espectro de absorción, es decir, la luz absorbida en función de la longitud de onda constituye una verdadera señal de identidad de cada sustancia o molécula (Chavez 2018). En óptica, la ley de Beer (López *et al.* 2004) afirma que la totalidad de luz que emana de una muestra puede disminuir debido a tres fenómenos de la física: I. El número de materiales de absorción en su trayectoria: la concentración (López *et al.* 2004), II. La distancia que la luz debe atravesar a través de la muestra: distancia del trayecto óptico (López *et*

al. 2004) y III. La probabilidad que existe que el fotón de esa amplitud particular de onda pueda absorberse por el material. Esto es la absorbencia o también coeficiente de extinción (López *et al.* 2004).

Cabe destacar que se tienen disponible ambos métodos de análisis para la determinación de la

Cr^{+6} concentración de Cr^{+6} en soluciones químicas

(Vilca 2021), lo cual genera discusión por los diferentes resultados obtenidos al analizar una misma tina de cromado por diferentes métodos (Fuentes 2018), por lo que, el objetivo de esta investigación es comparar los resultados obtenidos de la concentración de cromo residual aplicando análisis químico por colorimetría (Severiche & Gonzáles 2013), y de titulación en el proceso de recuperación de Cr^{+6} por precipitación química de los efluentes de una industria metalmecánica y evaluar si la diferencia que presentan ambos resultados obtenidos por estos dos métodos de análisis de laboratorio (Castañeda *et al.* 2018), finalmente, validando el método de titulación, nos permite emplearlo en nuestros análisis de investigación que tiene como objetivo asociar la implementación de un proceso de precipitación química de los efluentes generados de una industria metalmecánica con la recuperación de cromo.

MÉTODOS

Ámbito o Lugar de Estudio

El ámbito de trabajo abarca el sector metalmecánica peruano, el mismo que ha tenido un desarrollo variable durante las últimas décadas, el cual se reflejó en un crecimiento sostenido en la última década y una desaceleración desde hace 4 años. Por lo cual les corresponde la ampliación e innovación de líneas de productos y sobre todo la especialización y adecuación a las necesidades, debido a los mayores niveles de exigencia de los clientes. Además la base está en la habilidad, inventiva y capacidad de trabajo de los técnicos, profesionales y empresarios peruanos, que desde tiempos ancestrales trabajan con los metales. Sin embargo, esta rica experiencia y el trabajo de varias generaciones permitieron desarrollar las capacidades y fortalezas necesarias para vencer circunstancias adversas y afrontar variados retos, tal como los que nos impone nuestra compleja geografía. Para el desarrollo de esta investigación se analiza una

industria metalmecánica ubicado en cercado de lima - Perú, el cual cuenta con área de cromado de 11 tanques, donde la población de la investigación está conformada por las muestras de agua residual y de proceso de la línea de proceso de cromado es decir las tinas de cromado, extractores de gases, proceso de lavado tinas de cromo y línea de efluentes de una industria metalmecánica. El muestreo se realiza en funcionamiento de todas las líneas de cromado, es decir, con componentes cromando, línea de aire recirculando, línea de extracción de gases, línea de efluentes y todos los parámetros establecidos para un cromado duro. En esta situación se realiza dos tipos de muestreo: Muestreo de las tinas de cromo para hacer la comparación de los resultados del método de colorimetría versus el método por titulación. Muestreo de los efluentes industriales en los diferentes puntos del proceso de cromado.

Descripción de Métodos

El tipo de diseño para la presente investigación es cuantitativo, el nivel de investigación relacional. Además en cuanto a su finalidad es una investigación aplicativa.

Fuentes de información e instrumentos utilizados

Mediante la recolección de datos para el análisis por el método de colorimétrico y de titulación, y en formatos específicos se recopilan la información de campo, que consiste en la toma de mediciones de concentración de ácido de crómico de acuerdo con la metodología establecida normativamente por APHA -SM - METHOD 3500 – Cr B y EPA – SW – 846 – METHOD 7186 A, es decir, por medio de un análisis cuantitativo en laboratorio.

Técnicas de recolección y procesamiento de datos

Para el análisis por colorimetría y por titulación se toma muestra en forma directa de los 10 tanques de cromado, por cada tanque de cromado se toma en tres oportunidades muestras para el análisis basado en el método factorial aleatorio. Para el análisis del procedimiento de recuperación de cromo de los efluentes se toma en forma directa muestras de los tanques de almacenamiento de efluentes. Las muestras se categorizan según el lugar donde se produce los efluentes. En cada fecha de muestreo se tomaron 3 muestras (M001, M002 y M003), las cuales se agrupan bajo la misma serie (S0, S1 y S2) para identificar el día y mes de muestreo.

Tabla 1. Características de las propiedades físicas de los efluentes en diferentes puntos de la línea de cromado y en diferentes fechas.

Serie	Fecha muestreo	Muestra	Volumen (l)	Aspecto	pH Recepción
S0	01-agosto	M001	1.5	Rojo oscuro,	2
		M002	1.5	restos de cromo	2 a 3
		M003	1.5	sólidos, sulfatos e impurezas.	1 a 2
S1	01-setiembre	M001	1.5	Rojo oscuro,	3
		M002	1.5	restos de cromo	2 a 3
		M003	1.5	sólidos, sulfatos e impurezas.	2 a 2
S2	01-octubre	M001	1.5	Rojo oscuro,	1
		M002	1.5	restos de cromo	1 a 2
		M003	1.5	sólidos, sulfatos e impurezas.	1 a 2

Aplicando el método de diseño factorial aleatorio

Basado en la información de antecedentes se toma como variables de análisis la concentración de la base, concentración del efluente y el pH de la solución. El método de

diseño factorial se basa de acuerdo con un estudio de la probabilidad y estadística para ingeniería de autor William W., donde se plantea un diseño factorial para un valor de $K=3$, cada uno con dos niveles (nivel alto y nivel bajo) tiene 8 combinaciones de tratamiento, nos permite que se estime tres factores principales (A, B y C) junto con tres interacciones de dos factores (AB, AC y BC) y una interacción de tres factores (ABC). Los principales efectos se estiman con facilidad. Hay que recordar que (1), a, b, ab, c, ac, bc y abc representan el total de todas las N replicas

en cada una de las ocho combinaciones de tratamiento en el diseño.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se observa que se han obtenido los valores de concentración de Cr^{+6} para cada tina, teniendo en cuenta el valor de absortividad (la longitud de la celda) $e = 165211,208 \text{ g-l cm}^{-1}$. Con este valor se determinan las concentraciones para las muestras de cada tanque de cromado (Tabla 2).

Tabla 2. A partir de la absorbancia se obtienen las concentraciones de Cr^{+6}

MUESTRA N°1			
N° Tanque	Absorbancia	Dilución de concentración para análisis	Concentración inicial Cr^{+6} (g/l)
1	0,364	0,00022	275
2	0,318	0,00019	237,5
3	0,325	0,00020	250
4	0,35	0,00021	262,5
5	0,397	0,00024	300
6	0,353	0,00021	262,5
7	0,234	0,00014	175
8	0,342	0,00021	262,5
9	0,346	0,00021	262,5
10	0,306	0,00019	237,5

Para comparar los datos obtenidos de las concentraciones de cromo con dos análisis de laboratorio diferentes, primero se debe evaluar la elección de las pruebas estadísticas, en este caso las variables se deben presentar como fijas y aleatorias, en este caso la variable fija. Las variables se convierten en dos muestras independientes, titulación. y análisis colorimétrico. Cuando las variables aleatorias son numéricas, son resultados de concentración. Por tanto, la prueba paramétrica es la t-student (muestras independientes). Para realizar el

análisis estadístico t-Student, primero se debe confirmar la normalidad y la igualdad de varianza. En el caso de normalidad, se debe confirmar que las variables aleatorias de ambos grupos se distribuyen normalmente. Y con varianzas iguales, se debe demostrar que las varianzas entre los grupos son iguales. A continuación, se muestran los resultados de las concentraciones de Cr^{+6} , Cr^{+3} y H^+ , manteniéndose constantes tanto el pH y la temperatura de operación (Tabla 3).

Tabla 3. Concentración de Cr^{+6} , Cr^{+3} y H^{+}

MUESTRA N°2						
Análisis Químico				Condiciones físicas		
N° Tanque	Cr^{+6} (g/l)	Cr^{+3} (g/l)	H^{+} (g/l)	Densidad (Be°)	pH electrolítico	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
1	252,0	0,9	2,7	22	0,5	55
2	305,0	1,3	4,5	26	0,5	55
3	341,1	2,2	4,5	28	0,5	55
4	235,5	1,1	3,6	21	0,5	55
5	180,9	0,5	2,1	15,5	0,5	55
6	253,2	1,4	2,1	21	0,5	55
7	256,9	0,7	3,3	22,5	0,5	55
8	300,5	1,0	2,7	26	0,5	55
9	230,1	1,7	2,4	19,5	0,5	55
10	306,1	2,8	2,7	26	0,5	55

A partir de esto, se puede concluir que, según los datos de la muestra, la diferencia promedio en la concentración de cromo hexavalente puede ser igual o muy cercana a cero, por lo que se puede decir que no existe una diferencia significativa entre los dos métodos de concentración de cromo hexavalente. Análisis, lo que confirma nuestra primera suposición de que no hay una diferencia significativa entre los dos métodos de análisis. El método de titulación da una idea general de la composición del tanque de cromo, el rango de trabajo promedio de la concentración de cromo hexavalente en el

tanque de cromo es de 173,1 g/l a 382,3 g/l, e incluso la concentración de cromo trivalente e hidrógeno iones cuando el recipiente está en funcionamiento. Esta información nos permite ver que el cromo trivalente no se forma en exceso de lo que se forma en la reacción de cromo. El gráfico de barril de cromo resultante según el método de titulación se muestra a continuación.

A continuación, se muestran las variaciones de la concentración, en g/l, cromo hexavalente, Cr^{+6} (Figura 1).

A continuación, se muestran las variaciones de la concentración, en g/l, cromo trivalente, Cr^{+3} (Figura 2)

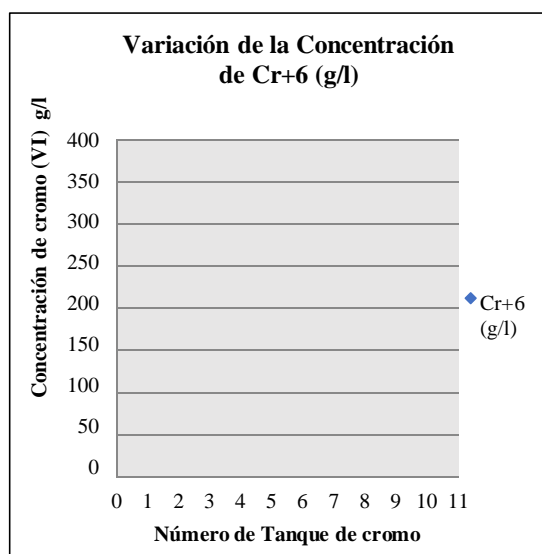


Figura 1. Variación de la concentración de Cr^{+6}

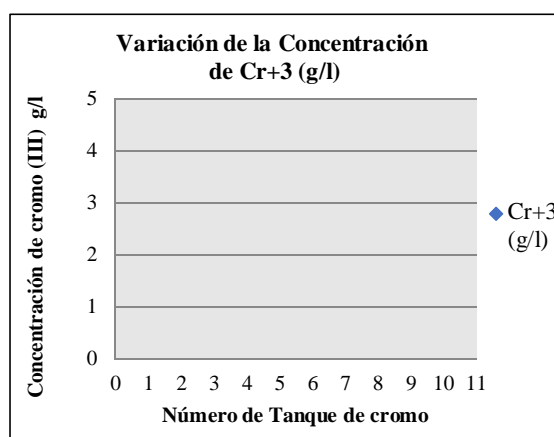


Figura 2. Variación de la concentración de Cr^{+3}

A continuación, se muestran las variaciones de la concentración, en g/l, ácido crómico H^+ (Figura 3)

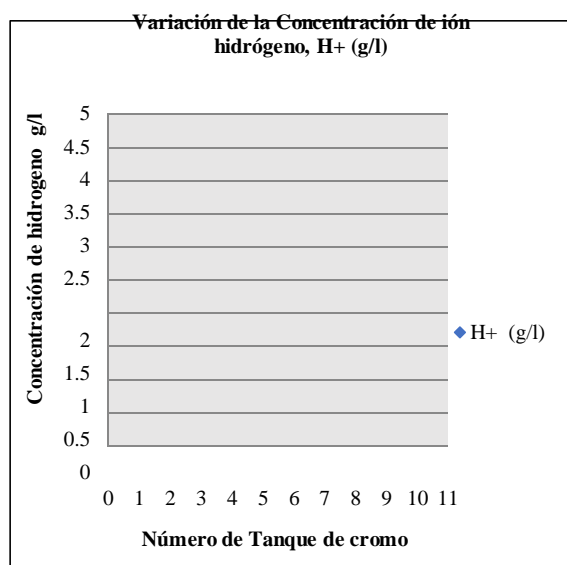


Figura. 3. Variación de la concentración de ion hidrógeno (H^+)

Tabla 4. Resultados de aplicar media y varianza.

Datos estadísticos	Resultados
Diferencia hipotética de las Medias	
análisis Colorimetría y análisis Titulación	4,3
Grados de libertad	58
Estadístico t	-0,43
P(T<=t) una cola	0,34

A partir de los datos obtenidos de concentración de cromo hexavalente, cromo trivalente y concentración de hidrogeno por los diferentes métodos de análisis de concentración mencionados, cuyo número de ensayos es determinado por el método estadístico factorial aleatoria 2^K , se procedió a realizar la comprobación de la hipótesis inicial que plantea que no hay diferencia significativa entre los resultados obtenidos de concentración de cromo por el análisis de colorimetría con el análisis de titulación, para tal comparación se procede a aplicar t-student.

Donde $P > 0,05$ por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula. Es decir, es verosímil en un 95 % de las veces que no se tengan evidencias significativas en los resultados obtenidos de un método de análisis con otro, ya que P ha resultado muy favorable. Además, aplicando t-student. De los resultados obtenidos de las concentraciones de Cr^{+6} por los dos métodos de análisis químico a nivel de laboratorio (Tabla 3).

A continuación, podemos observar que el intervalo de confianza de 95 %, $Sp_2 = 1541,54$, $t(n_1+n_2-2, 1-\alpha/2) = t(58, 0,975) = 2,00$, $n=n_1+n_2=58$ y $-10,048 \leq \mu_1 - \mu_2 \leq 18,648$. El análisis comparativo de los dos métodos químicos de determinación de concentración de cromo, uno por el método de análisis de colorimetría y el otro por el método de análisis de titulación, ambos datos de concentración obtenidos fueron analizados aplicando la prueba de t – student (Tabla 4).

Tabla 5. Análisis estadísticos de igualdad de varianza para determinar “T”

Datos Estadísticos	Resultados
Grados de libertad	58
P(T<=t) dos colas	0,67
Valor crítico de t (dos colas)	2,00

A partir de estos resultados, se puede observar que los datos de la muestra de la diferencia de las medias $\mu_1 - \mu_2$ de las concentraciones de Cr^{+6} son igual o muy próximo a cero (Meneses *et al.* 2018), en consecuencia, se afirma que no

hay una diferencia significativa entre los dos métodos de análisis (Pérez 2018). Por lo tanto, la incorporación del método de análisis químico (colorimetría o titulación) en el proceso de recuperación y reúso de cromo residual en la

instalación industrial metal mecánica, debe comprender una evaluación económica de ambos métodos para seleccionar y determinar la rentabilidad integral del proceso productivo (Rey de Castro 2013). El cromo recuperado para el reúso es cromo (III) lo cual se utilizará para un cromado decorativo o cromo blando (Kerura *et al.* 2021), y los efluentes recuperados se reutilizarán en la línea de refrigeración de las tinas de cromado (Abril 2018).

CONCLUSIONES

Se ha validado la hipótesis de investigación, en el sentido que no hay variación significativa entre los dos métodos de análisis químico para la determinación de concentración de cromo hexavalente, Cr^{+6} , residual, es decir, los resultados obtenidos por estos dos métodos de análisis a partir de una misma muestra son valores numéricamente diferentes, pero son representativos a la concentración Cr^{+6} que tiene la solución. Además, el método de análisis de titulación brinda un panorama amplio de la composición de la tina de cromo y del rango promedio de trabajo para la concentración de Cr^{+6} los cuales varían desde 173,1 g/l a 382,3 g/l, así mismo de las concentraciones de cromo trivalente, Cr^{+3} , y iones de hidrógeno, esto cuando las tinas están operativas, cuya información es valiosa, pues permite determinar que no se presenta formación de cromo trivalente, Cr^{+3} , mayor de lo formulado en la reacción de cromado. La incorporación de cualquiera de estos dos métodos de análisis químico (colorimetría o titulación) en el proceso de recuperación y reúso de Cr^{+6} residual en la instalación industrial metal mecánica, dependerá de la evaluación económica aplicado a ambos métodos para determinar su influencia en la rentabilidad integral del proceso productivo.

En la investigación de la recuperación de cromo se tomó en consideración como punto importante la selección de agentes reductores como el bisulfito de sodio, que se obtuvo a partir de la teórica, antes de iniciar el análisis de precipitación química, se tuvo en consideración que la reducción del cromo hexavalente a cromo trivalente y la reacción de precipitación química del cromo que ocurre dependiendo de los factores que afectan la reacción, en este caso: pH, temperatura y concentración de soda cáustica. Para que se de la reacción de precipitación química del cromo, depende de

los factores que influyen en esta reacción, en este caso son: pH, temperatura y la concentración de soda cáustica, los cuales se evalúa aleatoriamente por el método de diseño de factorial 2^K , obteniendo como resultado en el análisis de magnitud de los efectos que el pH, la temperatura y el efecto de las tres variables mencionadas influyen con mayor magnitud que la concentración de soda cáustica. Esto contradice en parte la hipótesis inicial que señala que la temperatura y concentración de soda cáustica influirán en el rendimiento de recuperación de cromo por precipitación química. Esto, no implica que el volumen de solución de soda cáustica no afecta el sistema, ya que afecta en forma indirecta al regular el pH, es decir como parte del factor grupal. Una vez determinada los factores que influyen en el resultado de la precipitación química, específicamente en la etapa de remoción de cromo de los efluentes industriales, se realiza una análisis de varianza de cada factor pH, temperatura y la combinación de los tres factores, esto da como resultado un 99,1% de remoción de ácido crómico de los efluentes, ya que el agente precipitante como el hidróxido de sodio no presenta reacciones secundarias, como por ejemplo el empleo de la base de hidróxido de calcio, tendrá subproducto de sulfato de calcio, ya que éste precipitará conjuntamente con el hidróxido de cromo. la implementación de esta tecnología limpia en una industria metal mecánica contribuye en el cuidado del medio ambiente, como en la recuperación de cromo (Cr^{3+}) para su uso en proceso de cromado decorativo, generando la recuperación de la inversión de la implementación de esta tecnología limpia.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro reconocimiento a las autoridades de la Facultad de Química e Ingeniería Química de la UNMSM, Perú, y la Facultad de Ingeniería Ambiental de la UNI. Perú, por habernos permitido el uso de las instalaciones de sus laboratorios para el desarrollo de esta investigación.

CONFLICTO DE INTERÉS

El autor de iniciales (FPSP), no tiene conflicto de interés de ninguna índole.

REFERENCIAS

- Abril N, Bárcena A, Fernández E, Galván A, Jorrín J, Peinado J. 2008. Espectrometría: espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas. Universidad de Córdoba. https://www.uco.es/dptos/bioquimica-biol-mol/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETRIA.pdf
- Adriana Marilla Mollinedo Chavez & Alicia Quispe Huanca. 2021. Adsorción de cromo hexavalente de lechos acuáticos utilizando biomasa de pepa de palta (Persea americana Mill) Arequipa. <https://repositorio.uma.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12970/656/tesis.pdf?sequence=1>
- Anco Estrella Percy Máximo. 2004. Procedimiento para la separación del cromo hexavalente de efluentes mineros. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/3028>
- Avendaño Flores, Yesica S., 2012. Biorreducción de Cr(VI) a Cr(III) por bacterias resistentes a cromo aisladas del Río Lerma. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/80076>
- Carlos Alberto Severiche Sierra & Humberto Gonzáles García. 2013. Verificación analítica para las determinaciones de cromo hexavalente en aguas por espectrofotometría. <http://Dialnet-VerificacionAnaliticaParaLasDeterminacionesDeCromo-4694625.pdf>
- Cascaret Carmenaty, Dannis A; Pérez Silva, Rosa M; Aguilera, Isabel; Calzado Lamala Orlindes. 2012. Validación interna del método espectrofotométrico por adecuación, para la determinación de cromo (VI) en aguas residuales. Revista Cubana de Química, Volumen. XXII, número 3, 2012, pp. 9-13. <https://www.redalyc.org/pdf/4435/443543720002.pdf>
- Cesar Antonio Castañeda Correa, Lucy Giovanna Quiroz Soriano y Mercedes Lisbeth Sánchez Arteaga. 2018. Efecto del tamaño y cantidad del carbón activado por Zeamays en la adsorción de cromo total del efluente de curtido, curtiembre cuenca S.A.C. Universidad Cesar Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/browse?type=subject&value=Efluente%20de%20curtido>
- Jessica Karina Chave Andrade. 2018. Recuperación de cromo a partir de lodos residuales provenientes del proceso de curtido en la industria de la curtiembre. Universidad Central del Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/2500/17033>
- Jessica Karina Chavez Andrade. 2018. Recuperación de cromo a partir de lodos residuales provenientes del proceso de curtido en la industria de la curtiembre. Universidad Central del Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/17033/1/T-UCE-0017-IQU-019.pdf>
- Jiménez C. L. 2018. Recubrimientos metálicos de: cobre, cromo y níquel en piezas ferrosas mediante el proceso electrolítico. Universidad Central del Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/2500/14149>
- Joel Fuentes García. 2018. Proceso de electro precipitación para la remoción y recuperación de sales de cromo de efluentes de la industria de la curtiduría. Instituto Politécnico Nacional, Centro Mexicano para la Producción más Limpia, México. <https://tesis.ipn.mx/jspui/handle/123456789/25903>
- Johnny Angel Apaza Amanqui y Isabel Toribio Villanueva. 2018. Alternativa de remoción de cromo hexavalente de soluciones acuosas usando epicarpio de café – Arequipa 2018. Universidad privada autónoma del Sur.

- <http://repositorio.upads.edu.pe/bitstream/handle/UPADS/43/%E2%80%99CALTERNATIVA%20DE%20REMOCION%20DE%20CROMO%20HEXAVALENTE%20DE%20SOLUCIONES%20ACUOSAS%20USANDO%20EPICARPIO%20DE%20CAF%C3%89%20-%20AR.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Jorge Vargas Florez & Luciano Silva Alarco. 2019. Análisis, Diagnostico y Propuestas de Mejora en el Sistema de Producción de una empresa Metalmecánica. Pontificia Universidad Católica del Perú. https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/14835/MACAVILCA_ESCALANTE_OSCAR_VOLKOV.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Katerine Jhosili Rodriguez Florez. 2017. Eficiencia de tres variedades de cascara de plátano (Musa paradisiaca) para la remoción de cromo hexavalente de aguas contaminadas a nivel laboratorio. Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/22666>
- Kerura S.S, Sneha Bandekar, Manjunath S, Hanagadakar, Santosh S. Nandid, G.M. Ratnamala, Prasad G. Hegde, 2021. Removal of hexavalent Chromium-Industry treated water and Wastewater: A review. Materials Today: Proceedings. Volume 42. <https://www.sciencegate.app/document/10.1016/j.matpr.2020.12.492>
- Kevin Henry Vilca Vilca. 2021. Recuperación electrolítica de cromo a partir de la viruta residual de cuero. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/20.500.12773/13780?show=full>
- López Icedo Lander, Porro Azpiazu J.M, Torrontegui Muñoz E., García Echevarría Miguel. 2004. Cuánticas y Relatividad TOE's. <https://docplayer.es/6206398-Cuantica-y-relatividad-toe-s-teorias-del-todo-lander-lopez-icedo-jose-maria-porro-azpiazu-erik-torrontegui-munoz-miguel-garcia-echevarria.html>
- Maira Maldonado Vega, Agustin Alexander Rangel Cordova y Eloy Isarain Chavez. 2015. Caracterización y recuperación de sales de cromo hexavalente de un pasivo ambiental. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v31n4/v31n4a10.pdf>
- Meneses B, Patiño M, Freddy B. 2018. Remoción de cromo en aguas residuales industriales mediante el uso de Biomasa de SPIRULINA SP, sedimentación primaria y precipitación química. Universidad de Manizales Colombia. <https://scholar.google.com/citations?user=MEg728YAAAAJ&hl=es>
- Montgomery Douglas C. Hines William, Goldsman David M., Borrer Connie M., 2015. Probabilidad y estadística para ingeniería, tercera edición en español, compañía editorial continental. <http://sbiblio.uandina.edu.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=15098>
- Nidia Elena Ortiz Penagos. 2013. Recuperación y reutilización de cromo de las aguas residuales del proceso de curtido de curtiembres de San Benito (Bogotá), mediante un proceso sostenible y viable tecnológicamente. <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/1076>
- Omar Quispe Huanca. 2017. Recuperación electrolítica de cromo (III) de efluentes de curtido de pieles de animales. Universidad Nacional del Altiplano. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/5156>
- Pallavi Mahajan Tatpate, Supriya Dhume and Yogesh Chendake. 2021. Recovery of chromium using membrane containing charged material. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Volume 1146. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1146/1/012022/meta>
- Pérez Rincón Jeimy Alejandra. 2018. Propuesta para la recuperación y reutilización de cromo en lodos Galvánicos de INGECROM LTDA. A nivel laboratorio. Fundación Universidad de America, Bogota D.C. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream>

[m/20.500.11839/6731/1/6111669-2018-1-IQ.pdf](https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6731/1/6111669-2018-1-IQ.pdf)

Pérez Rincón Jeimy Alejandra. 2018. Propuesta para la recuperación y reutilización de cromo en lodos Galvánicos de INGE Crom LTDA. A nivel laboratorio. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6731/1/6111669-2018-1-IQ.pdf>

Pérez Rincón. 2018. Propuesta para la recuperación y reutilización de cromo en lodos galvánicos de INGE Crom LTDA. a nivel laboratorio. Universidad de América de Bogotá D.C. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6731/1/6111669-2018-1-IQ.pdf>

Rey de Castro R. 2013. Recuperación de cromo (III) de efluentes de curtido para control ambiental y optimización del proceso productivo. Universidad Pontificia Católica del Perú. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/5123>

Ricardo David Zanabria Chuchon & Lljandra Aquije Morey. 2020. Revisión sistemática y meta – análisis de la aplicación de microorganismos para la remoción de cromo hexavalente en aguas residuales de curtiembres. Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/59796?show=full>

Sandhya Mishra, Shaohua Chen, Ganesh Dattatraya Saratale, Rijuta Ganesh Saratale, Luiz Fernando Romanholo Ferreira, Muhammad Bilal, Ram Naresh Bharagava. 2021. Reduction of hexavalent chromium by Microbacterium paraoxydans isolated from tannery wastewater and characterization of its reduced products. Journal of Water Process Engineering, Volume 39. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714420306255>

Yuly Tatiana Castiblanco Moreno & Andryth Baneza Perilla Perez. 2019. Remoción de cromo hexavalente en aguas residuales proveniente de procesos de cromado de plásticos en empresa de Bogotá. Universidad Cooperativa de Colombia

Bogotá.

[https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/15550/1/2019-Remocion Cromo Hexavalente.pdf](https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/15550/1/2019-Remocion%20Cromo%20Hexavalente.pdf)