



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AGRÍCOLA



TESIS

BIOSORCIÓN DEL CROMO HEXAVALENTE EN SOLUCIONES ACUOSAS UTILIZANDO BIOMASA DE CÁSCARA DE PLÁTANO (MUSA ACUMINATA COLLA)

PRESENTADA POR:

YENI PILAR PARI LUQUE

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAGISTER SCIENTAE EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PUNO, PERÚ

2020



DEDICATORIA

A Dios, por cuidarme y protegerme en todo el transcurso de mi vida, por darme fuerza de voluntad para concluir mis objetivos, por acompañarme y guiarme en mi camino.

A mis padres, por su cariño, su apoyo incondicional y orientación han sabido guiarme.

A Gael quien siempre me ha acompañado y alegrado en todo momento.



AGRADECIMIENTOS

Agradecer infinitamente a Dios, por darme fuerza, valor y voluntad para llegar hasta este momento anhelado por tanto tiempo que es la presentación de este trabajo.

A la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional del Altiplano por darme la oportunidad de ser estudiante y ser un medio de alcanzar este sueño de obtener el grado de Maestro.

A mi asesor de tesis MSc. Ing. Víctor Atilio Barreda Del Arroyo por brindarme su apoyo y asesoramiento para el desarrollo de esta tesis, sin él no hubiera sido posible la culminación de este trabajo.

Al presidente de Tesis Dr. Edilberto Velarde Coaquira, a mis jurados de Tesis: Dr. Norberto Sixto Miranda Zea y Dr. Teófilo Donaires Flores por su apoyo y consejos para un mejor desarrollo de esta Tesis.

A la señorita Juana, secretaria de la oficina de la maestría en Ingeniería Agrícola por su orientación constante.

A mis amigos y a los que me apoyaron en diferentes etapas para lograr el desarrollo de este Trabajo de Investigación.

A todos ellos GRACIAS.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Marco Teórico	2
1.1.1. Agua Residual	2
1.1.2. Metales pesados	3
1.1.3. Cromo	3
1.1.4. Efectos del cromo en la salud	4
1.1.5. Normas vigentes para el cromo	5
1.1.6. Tratamiento de metales pesados	6
1.1.7. Biosorción	7
1.1.8. Termodinámica de la adsorción	10
1.1.9. Isotermas de adsorción	12



1.1.10. Cinética de la adsorción	15
1.1.11. Cáscara de plátano como biosorbente	15
1.1.12. Espectroscopia de infrarrojo	20
1.2. Antecedentes	23

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Identificación del problema	28
2.2. Enunciados del problema	29
2.3. Justificación	30
2.4. Objetivos	31
2.4.1. Objetivo general	31
2.4.2. Objetivos específicos	31
2.5. Hipótesis	31
2.5.1. Hipótesis general	31
2.5.2. Hipótesis específicas	31

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de estudio	33
3.2. Población	35
3.3. Muestra	35
3.4. Método de investigación	35
3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	35



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización de la biomasa de cáscara de plátano (<i>Musa acuminata</i> colla)	51
4.2. Diseño experimental	57
4.3. Cinética de adsorción	65
4.4. Isotermas de adsorción	70
4.5. Estudio termodinámico	79
4.6. Biosorción de Cr (VI) en agua residual de Curtiembre FIQ-UNA	84
CONCLUSIONES	86
RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA	88
ANEXOS	96

Puno, 20 de octubre de 2020

ÁREA: Ingeniería Ambiental

TEMA: Tratamiento de aguas residuales

LÍNEA: Prevención y Control de la Contaminación del Agua



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Características más importantes de las aguas residuales.	2
2. Algunos métodos para eliminar iones metálicos de las aguas residuales	6
3. Algunos materiales utilizados como biosorbente del cromo (VI)	8
4. Frecuencias de grupo para grupos orgánicos funcionales	22
5. Variables analizadas	35
6. Matriz de diseño experimental para tres factores	43
7. Variables experimentales y niveles en el Diseño Central Compuesto (CCD)	44
8. Matriz del diseño experimental (CCD) (valores descodificados)	45
9. Modelos cinéticos de Pseudo primer orden y Pseudo segundo orden	47
10. Isotermas de Langmuir y Freundlich	48
11. Rendimiento de la biomasa de cáscara de plátano (CP)	51
12. Granulometría de la biomasa de cáscara de plátano (CP)	53
13. Características fisicoquímicas de la cáscara de plátano (CP)	53
14. Rendimiento de la biomasa de cáscara de plátano (CPA)	54
15. Resultados del porcentaje de adsorción del diseño experimental CCD	58
16. Coeficientes de regresión para la remoción de Cr (VI)	59
17. Análisis de varianza para la remoción de Cr (VI)	60
18. Optimización de variables	64
19. Resultado experimental para la cinética de adsorción de Cr (VI)	65
20. Resultados experimentales de las constantes de los modelos cinéticos	68
21. Comparación de las constantes cinéticas de pseudo segundo orden de Cr(VI)	69



22. Resultado experimental para la isoterma de adsorción	70
23. Resultado experimental de las constantes de la isoterma de Langmuir	73
24. Comparación de la capacidad máxima de adsorción de Cr (VI) con otros adsorbentes	74
25. Factor de separación (R_L) de la Isoterma de Langmuir	75
26. Resultado experimental de las constantes de la Isoterma de Freundlich	77
27. Resumen de las constantes de las Isotermas de Langmuir y Freundlich	78
28. Comparación de las constantes experimentales de la isoterma de Freundlich	79
29. Resultado experimental para el estudio termodinámico de adsorción	80
30. Valores de los parámetros termodinámicos para la adsorción del Cr(VI)	83
31. Porcentaje de remoción de Cr (VI) de agua residual curtiembre FIQ-UNA	84

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Ubicación del laboratorio de Control de Calidad (F.I.Q – U.N.A.)	34
2. Ubicación de la toma de muestra (Planta piloto curtiembre F.I.Q. – U.N.A.)	34
3. Diagrama de flujo para la preparación de cáscara de plátano (CP)	38
4. Diagrama de flujo del tratamiento químico de cáscara de plátano (CPA)	39
5. Balance de materia en la preparación de cáscara de plátano (CP)	52
6. Balance de materia en el tratamiento químico de cáscara de plátano (CPA)	55
7. Espectro Infrarrojo de la biomasa de cáscara de plátano (CP)	56
8. Espectro Infrarrojo de la cáscara de plátano con tratamiento químico (CPA)	57
9. Superficie de respuesta de la remoción de Cr (VI), Dosis de biomasa Vs pH	61
10. Superficie de respuesta de la remoción de Cr (VI), Tiempo de contacto Vs pH	62
11. Curva de contorno para la remoción del Cr (VI), Dosis de biomasa vs pH	63
12. Curva de contorno para la remoción del Cr (VI), Tiempo de contacto vs pH	63
13. Cinética de adsorción del Cr (VI)	66
14. Cinética de adsorción de pseudo segundo orden para Cr (VI)	68
15. Isoterma de adsorción de Cr (VI) a diferentes concentraciones	71
16. Isoterma de Langmuir para el Cr (VI)	73
17. Factor de separación R_L de la Isoterma de Langmuir	75
18. Isoterma de Freundlich para el Cr (VI)	77
19. Variación de la temperatura en la remoción de Cr (VI)	82
20. Termodinámica de adsorción de Cr (VI)	83



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
1. Valores Máximos Admisibles (VMA) para la descarga de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado D.S.N°010-2019-VIVIENDA	97
2. Límite Máximo Permisible (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de actividad minero-metalúrgico D.S. N°10-2010-MINAM	99
3. Valores referenciales de efluentes para alcantarillado y aguas superficiales D.S. N°003-2002-PRODUCE	101
4. Taxonomía de la biomasa de cáscara de plátano.	102
5. Resultado de análisis físico químico de la biomasa de cáscara de plátano	103
6. Resultado de análisis por Rayos Infrarrojos de la cáscara de plátano (CP)	104
7. Resultado de análisis por Rayos Infrarrojos de la cáscara de plátano (CPA)	106
8. Resultado de análisis de Cr (VI) de Laboratorios Analíticos del Sur	108
9. Determinación de Cromo Hexavalente	110
10. Curva de calibración estándar de Cromo (VI)	111
11. Imágenes de la parte experimental del presente trabajo de investigación	112
12. Constancia de uso de laboratorio para el desarrollo experimental	115

RESUMEN

La contaminación por cromo (VI) en el agua, suelo y aire se han convertido en un problema para el ambiente y sus concentraciones están asociados con las descargas de los efluentes industriales por no ser biodegradables, se acumulan y alcanzan niveles tóxicos perjudiciales para la salud. Para remover el Cr (VI) de soluciones acuosas se empleó la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) (CP) que es un desperdicio de bajo costo, siendo tratada químicamente con HNO₃ 0.10M (CPA). El objetivo de este trabajo fue evaluar la adsorción del cromo VI de soluciones acuosas, para el cual se determinaron los parámetros óptimos, pseudo orden de reacción, isoterma y termodinámica de adsorción. La biomasa de cáscara de plátano (CPA) fue analizada en el espectrofotómetro de infrarrojo FTIR para observar los grupos funcionales responsables de la adsorción, detectando la presencia de grupos hidroxilo y carboxilo. Los parámetros óptimos de la remoción del Cr (VI) fueron: pH 1.88, dosis de biomasa 1.20 g.L⁻¹ y tiempo de contacto de 73.64 min utilizando el diseño central compuesto (CCD) en un proceso Batch. La cinética de adsorción se ajustó al modelo de pseudo segundo orden con el valor de constante cinética $K_2 = 0.0940 \text{ g.mg}^{-1}.\text{min}^{-1}$, capacidad de adsorción en el equilibrio $q_e = 4.3370 \text{ mg.g}^{-1}$ y coeficiente de determinación de $R^2 = 0.9998$. La isoterma de adsorción se ajustó al modelo de Langmuir con un valor de la constante de capacidad de adsorción máxima $q_{\text{max}} = 36.1011 \text{ mg.g}^{-1}$, constante relacionada con la afinidad de los sitios de unión $b = 0.4262 \text{ L.mg}^{-1}$ y coeficiente de determinación $R^2 = 0.9963$ y los resultados de la termodinámica de adsorción (ΔG° , ΔH° y ΔS°) indican que el proceso de adsorción de Cr (VI) fue de naturaleza espontánea y endotérmica. Con esta base este estudio evalúa el efecto de la adsorción en agua residual industrial de curtiembre de concentración 1.24 mg.L⁻¹ de la F.I.Q. - U.N.A., obteniéndose una remoción de 61.00 %.

Palabras clave:

Biosorción, cáscara de plátano, cromo hexavalente, isoterma, superficie de respuesta.

ABSTRACT

Chromium (VI) contamination in water, soil and air has become a problem for the environment and its concentrations are associated with the discharges of industrial effluents because they are not biodegradable, they accumulate and reach toxic levels harmful to health. To remove Cr (VI) from aqueous solutions, banana peel biomass (*Musa acuminata* colla) (BP) was used, which is a low-cost waste, being chemically treated with 0.10M HNO₃ (BPA). The objective of this work was to evaluate the adsorption of chromium VI from aqueous solutions, for which the optimal parameters, pseudo order of reaction, isotherms and adsorption thermodynamics, were determined. The banana peel biomass (BPA) was analyzed in the infrared spectrophotometer FTIR to observe the functional groups responsible for the adsorption, detecting the presence of hydroxyl and carboxyl. The optimal parameters for the removal Cr(VI) were: pH 1.88, biomass dose 1.20 g.L⁻¹ and contact time of 73.64 min using the central composite design (CCD) in a batch process. The adsorption kinetics were adjusted to the pseudo second order model with a kinetic constant value of $K_2 = 0.094 \text{ g.mg}^{-1}.\text{min}^{-1}$, the adsorption capacity at equilibrium $q_e = 4.337 \text{ mg.g}^{-1}$ and a value of the determination coefficient of $R^2 = 0.9998$. The isotherm of adsorption was adjusted to the Langmuir model with values of the maximum adsorption capacity constant $q_{\text{max}} = 36.1011 \text{ mg.g}^{-1}$, the constant related to the affinity of the binding sites $b = 0.4262 \text{ L.mg}^{-1}$ and determination coefficient of $R^2 = 0.9963$. and the adsorption thermodynamic results (ΔG° , ΔH° and ΔS°) indicate that the Cr (VI) adsorption process was spontaneous and endothermic in nature. With this basis, this study evaluates the effect of adsorption in industrial wastewater from Tannery with a concentration of 1.24 mg.L⁻¹ of the F.I.Q. - U.N.A., obtaining a removal of 61.00%.

Keywords:

Biosorption, banana peel, hexavalent chromium, isotherm, response surface.

INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales industriales con alto contenido de metales pesados causa problemas ambientales afectando la salud de las personas (Stoica-Guzun et al., 2016). El cromo es uno de los más peligrosos, en especial en su forma hexavalente el cual es muy tóxico y puede ser carcinógeno, teratógeno y mutágeno (Kahraman & Pehlivan, 2017), (Stoica-Guzun et al., 2016). Las aguas residuales industriales de extracción de la cromita, la síntesis de pigmentos, el acabado de metales (Pradhan et al., 2017), galvanoplastia, curtido de cuero y preservación de la madera contienen iones de Cr (VI) (Shen et al., 2010).

Para eliminar los metales pesados de las aguas residuales, existen diferentes tecnologías convencionales, tales como la precipitación química, electrodiálisis, intercambio iónico, osmosis inversa (Villen-Guzman et al., 2019), extracción con solventes, filtración por membrana, tratamiento electroquímico y otros (Torab-Mostaedi et al., 2013). Estas tecnologías convencionales presentan desventajas como altos requerimientos de reactivos y energía, generación de lodos tóxicos y otros desechos que requieren eliminación (Sekhar et al., 2003)

Existen otras tecnologías como la biosorción; ésta tecnología utiliza diferentes tipos de biomasa y presenta ventajas sobre las tecnologías convencionales como bajo costo, no produce lodo de alto contenido de metal, y presenta buena eficiencia (Huamán et al., 2006). Como adsorbentes de bajo costo de metales pesados se pueden considerar a los desechos de plantas, residuos agrícolas, residuos lignocelulósicos, entre otros; de esta manera se adiciona un valor agregado a productos que solo se denominarían desperdicios (Miretzky & Fernandez, 2010).

La estructura del presente trabajo de investigación está constituida de cuatro capítulos; el capítulo I describe los conceptos del marco teórico para comprender el proceso de biosorción del cromo hexavalente y los antecedentes referidos para el presente trabajo de investigación; el capítulo II describe el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos e hipótesis planteadas; El capítulo III describe la metodología realizada para cada objetivo específico en la presente investigación; y el capítulo IV describe los resultados encontrados y discusiones con otros autores.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Marco Teórico

1.1.1. Agua Residual

Es aquella que ha sido usada para cualquier beneficio y se clasifican como aguas residuales domésticas, industriales y comerciales. En la tabla 1 se observa los contaminantes más comunes y su origen (Sierra, 2016).

Tabla 1

Características más importantes de las aguas residuales.

Característica	Procedencia
Color, olor	ARD, ARI, degradación natural de la materia orgánica
Sólidos	ARD, ARI, erosión, infiltración, conexiones erradas
Temperatura	ARD, ARI
Carbohidratos	ARD, ARI, ARC
Grasas y aceites	ARD, ARI, ARC
Pesticidas	Residuos agrícolas
Fenoles, Metales pesados	ARI
Proteínas, detergentes	ARD, ARI
Nitrógeno	ARD, ARI
H ₂ S, Metano	Descomposición de materia orgánica
Parásitos y virus	ARD

Fuente: Sierra (2016)

ARD: Aguas residuales domésticas
ARC: Aguas residuales comerciales
ARI: Aguas residuales industriales

1.1.2. Metales pesados

Los metales pesados son elementos químicos con peso atómico entre 63.546 (Cu) y 200.59 (Hg) (Renner, 2007) y peso específico mayor a 4 g.cm^{-3} . Los metales pesados se introducen en el ambiente por la descarga de los efluentes industriales y urbanos, llegando de esta manera a los alimentos, al aire; acumulándose en el organismo, el cual puede ser perjudicial debido a su toxicidad (Fernández, 2012), por ser no biodegradables. El plomo, mercurio, cadmio y el cromo (VI) se encuentran en la parte superior de la lista de toxicidad (Farooq et al., 2010).

1.1.3. Cromo

El cromo es caracterizado como un metal lustroso de color gris plateado (Rumpa et al., 2011), su símbolo es Cr, número atómico 24 y se ubica en el grupo VIB de la tabla periódica; su peso atómico es 52 g.mol^{-1} , densidad 7.19 g.cm^{-3} , punto de fusión 1.857°C y punto de ebullición 2.672°C . Se presenta en estados de oxidación de II a VI; es de interés industrial el cromo hexavalente (iones cromatos) y en menor grado el cromo trivalente (cromico forma estable). El cromo trivalente es anfótero y el hexavalente es ácido (Téllez et al., 2004).

De forma natural al cromo se le encuentra en altas concentraciones en rocas ultramáficas, rara vez ocurre en la corteza terrestre como elemento (o metal); la principal fuente comercial de cromo es la cromita (FeCr_2O_4) y los principales usos del cromo son metalúrgicos (67%), refractarios (18%) y químico (15%) (Rumpa et al., 2011).

Dinámica del cromo

Con respecto al cromo (III), su solubilidad se da por la formación de óxidos e hidróxidos, formando complejos estables con especies orgánicas e inorgánicas cargadas negativamente. Por su parte, los compuestos del cromo (VI) tienen mayor rango de solubilidad a condiciones ambientales; en solución se le encuentra en forma de hidrocromatos (pH 6.0 a 6.2, ligeramente ácido), cromatos (pH básico y neutro) y dicromatos (pH muy bajo) (Arauzo et al., 2003).

La transformación de cromo (III) a cromo (VI) o viceversa, sólo puede ser en presencia de otra pareja redox que acepte o dé los tres electrones necesarios. En

ambientes acuáticos naturales, las principales parejas son: H_2O/O_2 (aq), $Mn(II)/Mn(IV)$, NO_2/NO_3 , $Fe(II)/Fe(III)$, S^{2-}/SO_4^{2-} y CH_4/CO_2 . En la reducción del cromo (VI) a cromo (III) está involucrada el envejecimiento de algunos minerales como la biotita, hematita, algunas arcillas, etc. que contienen Fe(II); la descarga de desechos industriales que generan iones de Fe(II); la descomposición de la materia orgánica como aminoácidos simples, ácidos húmicos o fúlvicos y la reducción de sulfatos que proporcionan sulfuros, pueden reducir al cromo favorecido por condiciones ácidas (Richard & Bourg, 1991).

En los efluentes de curtiembre el cromo está presente como cromo (III) y cromo (VI) (como ion cromato CrO_4^{2-} o ion dicromato $Cr_2O_7^{2-}$), pero en soluciones acuosas, el cromo (III) pasa a cromo (VI) y éste se adsorbe más fácilmente a través del suelo y agua (Losada et al., 2015).

Cromo en el ambiente

El cromo (III) y cromo (VI) se incorpora al ambiente por la quema de petróleo y carbón, la producción de acero, descarga de manufactura de colorantes y pigmentos para la curtiembre, depósito de residuos de industrias y otros (Molina et al., 2010).

En los ecosistemas acuáticos el Cr (VI) se encuentra soluble y es transportado por el agua, pero se reduce a Cr (III), precipita y generalmente se acumulan en peces que se alimentan del fondo, tales como el bagre, los bivaldos como la ostra, el mejillón azul y la almeja de caparazón blando. En el medio ambiente acuático el cromo trivalente se oxida a hexavalente a un pH entre 5.5 y 6, este proceso se favorece con la presencia de óxido de manganeso (Chávez, 2010).

1.1.4. Efectos del cromo en la salud

El cromo trivalente es un oligoelemento, esencial e indispensable para la vida que participa en procesos bioquímicos y fisiológicos. En cambio el cromo hexavalente es considerado altamente tóxico en los sistemas del organismo humano con efectos nocivos reversibles e irreversibles, agudos y crónicos; y es considerada como cancerígeno por la Agencia Internacional de Investigación en Cáncer (IARC) (Téllez et al., 2004).

Vías de adsorción

El cromo (VI) a nivel fisiológico actúa con carga -2 y se asemeja al sulfato y fosfato, por lo que es absorbido por las células a través del sistema de transporte aniónico; este sistema de transporte permite que se acumule en las células grandes concentraciones de cromo, mayores que los niveles extracelulares. Una vez que el cromo se encuentra dentro de la célula, se reduce a cromo (III) mediante varios reductores intracelulares como el ácido ascórbico, glutatión y cisteína (Costa & Klein, 2006).

Los compuestos hexavalentes son adsorbidos por la vía oral, cutánea y respiratoria; la ingesta produce daño gastrointestinal y se manifiesta con vómitos, dolores abdominales, diarreas, hemorragias intestinales, llegando a producir la muerte. La intoxicación crónica por el contacto cutáneo a compuestos hexavalentes produce úlceras de 5 a 10 mm que afecta las manos y dedos llamadas “nido de paloma”; también está relacionada con la bronquitis, asma, ulceraciones y perforaciones nasales (Chávez, 2010).

1.1.5. Normas vigentes para el cromo

En el Perú, se han establecido normas para el cromo:

Valores máximos admisibles (VMA) para descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario según D.S. N° 010-2019-VIVIENDA, el cual establece para el cromo hexavalente (Cr^{6+}) el valor de 0.50 mg.L^{-1} y para el cromo total un valor de 10.00 mg.L^{-1} (Anexo 1).

Límite máximo permisible para la descarga de efluentes líquidos de actividad minero metalúrgico D.S. N°010-2010-MINAM, para el Cr^{6+} el valor de 0.10 mg.L^{-1} (Límite en cualquier momento) y 0.08 mg.L^{-1} (Límite para el promedio anual) (Anexo 2).

Valores referenciales de efluentes para alcantarillado y aguas superficiales de las actividades en curso de los subsectores curtiembre y papel D.S. N°003-2002-PRODUCE, en el cual se observa el parámetros de Cr^{6+} un valor de 0.50 mg.L^{-1} y para el Cromo Total un valor de 50.00 mg.L^{-1} (Anexo 3).

1.1.6. Tratamiento de metales pesados

Debido a los efectos tóxicos generados por los iones metálicos, las aguas residuales industriales deben ser tratadas para eliminar o minimizar el contenido metálico (Farooq et al., 2010). Los tratamientos comúnmente utilizados para remover iones metálicos se describen en la tabla 2:

Tabla 2

Algunos métodos para eliminar iones metálicos de las aguas residuales.

Método	Descripción	Desventaja
Osmosis inversa	Los iones de metales pesados se separan por membranas semipermeables a presiones mayores que la presión osmótica, la que es causada por sólidos disueltos de aguas residuales.	Alto costo.
Electrodialisis	Los iones de los metales pesados son separadas con membranas semipermeables selectivas de iones; la aplicación de un potencial eléctrico entre los dos electrodos, provoca una migración de cationes y aniones hacia los electrodos respectivos.	Formación de hidróxidos metálicos que obstruyen la membrana.
Ultrafiltración	Son operaciones de membrana impulsadas por presión que utilizan membranas porosas para la eliminación de metales pesados.	Generación de lodos.
Intercambio Iónico	Los iones de metales de soluciones diluidas son intercambiadas con iones, que son retenidas por fuerzas electrostáticas sobre una resina de intercambio.	Alto costo y eliminación parcial de ciertos iones.
Precipitación química	La precipitación de metales se logra cuando se añade coagulantes tales como el alumbre, cal, sales de hierro y otros.	Generación de lodo que contiene compuestos tóxicos.
Fitorremediación	Es el uso de ciertas plantas para limpiar el suelo, los sedimentos y el agua contaminada con metales	Toma mucho tiempo para la remoción de metales y la regeneración de la planta para más biosorción es difícil.

Fuente: Ahalya et al. (2003).

En la tabla 2 se observa que los diferentes métodos presentan desventajas; y en la búsqueda de nuevas tecnologías para la eliminación de iones de metales tóxicos, se centra la atención en la biosorción, el cual, presenta ventajas sobre los métodos de tratamiento convencional tales como bajo costo, alta eficiencia, minimización de lodos químicos y/o biológicos, no requiere nutrientes adicionales, existe

regeneración de biosorbente y una posibilidad de recuperar los metales (Ahalya et al., 2003).

1.1.7. Biosorción

Se han buscado materiales biológicos vivos y muertos (metabólicamente inactivos) para eliminar iones metálicos, presentando ventajas los materiales muertos porque no tienen necesidad de crecer y están disponibles como desechos o subproductos (Farooq et al., 2010).

La biosorción es un proceso barato que utiliza biomasa muerta (materiales de origen biológico) para capturar metales pesados tóxicos (Kratochvil & Volesky, 1998), debido a altas fuerzas de atracción presentes en los dos (Farooq et al., 2010). Desechos de biomasa y otras fuentes ricas en carbono han sido probados contra contaminantes solubles en agua (Tanweer & Danish, 2018). Se preparan biosorbentes de la biomasa de algas, musgos, hongos, bacterias (Kratochvil & Volesky, 1998), desechos agrícolas (Tanweer & Danish, 2018), con tratamiento previo de lavado con ácidos o bases antes del secado final y granulación; aunque con simple corte y molienda puede producir partículas biosorbentes estables (Kratochvil & Volesky, 1998).

El proceso de biosorción es representada por una fase sólida (sorbente o biosorbente o material biológico) y una fase líquida (disolvente, agua), el cual tiene especies disueltas para sorber (sorbato, iones metálicos). Por la afinidad que se produce entre el sorbente y la especie de sorbato, éste es atraído y ligado allí por diferentes mecanismos; este proceso continúa hasta que se establece un equilibrio entre la cantidad de especies de sorbato unidos a sólidos y su porción restante en la solución, esta afinidad determina su distribución entre el sólido y fases líquidas (Ahalya et al., 2003).

Algunos biosorbentes pueden ser de usados para la mayoría de los metales pesados mientras que otros pueden ser específicos, sólo para ciertos metales. En la búsqueda del material adecuado, algunos usan biomasa fácilmente disponible, otros más aislados como cepas; y otros procesan biomasa cruda a un cierto grado para mejorar sus propiedades de aplicación como biosorbente (Volesky & Holan, 1995).

Existen varios mecanismos de biosorción, los cuales difieren cuantitativa y cualitativamente según sea la especie utilizada, su origen y su procesamiento. La adsorción del metal sigue mecanismos complejos como intercambio de iones, quelación, adsorción por fuerzas físicas, atrapamiento de iones en capilares inter e intrafibrilares y espacios de la red estructural de polisacáridos como resultado del gradiente de concentración y difusión a través de paredes celulares y membranas. Los grupos químicos que pueden atraer y secuestrar metales en la biomasa son los grupos acetamido de quitina, polisacáridos estructurales de hongos, grupos amino, amido, sulhidrido y carboxilo en proteínas, hidroxilos en polisacáridos y carboxilos y sulfatos en polisacáridos de algas marinas (Phaeophyta, Rhodophyta y Clorofita). Sin embargo, la presencia de algún grupo funcional no es garantía para la sorción (Volesky & Holan, 1995). En la tabla 3 se muestran algunos materiales que fueron usados como biosorbentes del cromo hexavalente.

Tabla 3

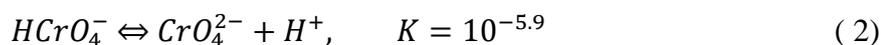
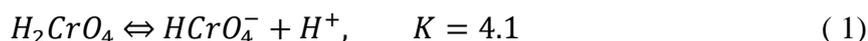
Algunos materiales utilizados como biosorbente del cromo (VI).

Materiales biosorbentes	Capacidad de adsorción (mg.g⁻¹)
Salvado de arroz	58.89
Aserrín	39.7
Frutos secos de fruta de Tamarindo	44.8
Residuos de té	1.55
Cáscara de nuez	18.51
Salvado de trigo	40.80
Lodo residual de biogas	5.87
Arcilla purificada	109
Quitosano	153.850
Arcilla activada con ácido	83
Ácidos húmicos	2.75
Bauxita calcinada	2.021
Óxido de titanio hidratado cristalino	20.00
Resina de intercambio aniónico	94.34
Llantas usadas	58.48
Médula de coco	317.65
<i>Aspergillus niver</i>	30.1
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	32.6
<i>Fucus vesiculosus</i>	0.82
<i>Staphylococcus xylosus</i>	143
<i>E. Coli</i> ASU 7	64.36
<i>Aeromonas caviae</i>	284.44
<i>Bacillus circulans</i>	34.5
<i>Pseudomonas sp.</i>	95

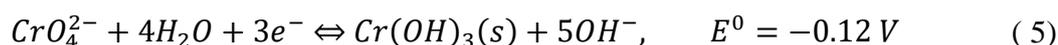
Fuente: Saha & Orvig (2010)

Química acuosa del Cr (VI)

En solución acuosa, por encima de pH 6, el Cr (VI) forma el ion CrO_4^{2-} tetraédrico amarillo. Entre pH 2 y 6, el ión cromato ácido $HCrO_4^-$ y el ion dicromato $Cr_2O_7^{2-}$ rojo anaranjado están en equilibrio. A $pH < 1$ la principal especie es H_2CrO_4 . Los siguientes equilibrios dependientes del pH existen en solución acuosa (Saha & Orvig, 2010), como se ve en las ecuaciones (1) al (3):



Las soluciones ácidas de dicromato son oxidantes fuertes y durante la oxidación, el Cr (VI) se reduce a Cr (III) con formación de intermedios como Cr (V), Cr (IV) y Cr (II). En cambio, las soluciones básicas del cromato son menos oxidantes como se evidencia de los valores de E^0 (Rumpa et al., 2011). Se muestra en las ecuaciones (4) y (5).



Mecanismos de adsorción del Cr (VI)

Mecanismo I

El pH de la solución acuosa es importante, ya que influye en la especiación de la disociación de los grupos funcionales activos (-OH, -COOH, -NH₂). Por lo tanto, la adsorción está asociado con el pH de la solución. A pH bajos, los grupos funcionales se protonan en la superficie del material lignocelulósico y restringiendo a las especies catiónicas debido a las fuerzas repulsivas. A medida que aumenta el pH disminuye el grado de protonación y los grupos funcionales se cargan negativamente ($pH > pK_a$). El Cr (VI) acuoso existe como cinco especies principales: H_2CrO_4 ; $HCrO_4^-$; CrO_4^{2-} ; $HCr_2O_7^-$; $Cr_2O_7^{2-}$ cuya distribución depende del pH y de la concentración total del Cr (Miretzky & Fernandez, 2010).

Los iones de Cr(VI) en una solución ácida están probablemente en diferentes especies $[\text{HCrO}_4]^-$, $[\text{Cr}_2\text{O}_7]^{2-}$, $[\text{Cr}_4\text{O}_{13}]^{2-}$ y $[\text{Cr}_3\text{O}_{10}]^{2-}$ y son propensos a adsorberse en sitios activos protonados del biosorbente principalmente a bajo pH, mostrando como máxima adsorción de Cr(VI) a pH 2 y para Cr(III) a pH 6 (Li et al., 2009).

Mecanismo II

La reducción de Cr (VI) a Cr (III) ocurre después de que el Cr (VI) se adsorbe por medio de plantas vivas, biomasa muertas, bacterias, cáscara de arroz, entre otros, en condiciones ácidas debido a su alto potencial redox (superior a 1.3V a condiciones estándar) y a través de mecanismos de reducción directa e indirecta (Miretzky & Fernandez, 2010):

- Mecanismo de reducción directa:

La reducción de Cr (VI) a Cr (III) ocurre en la fase acuosa por contacto con los grupos donadores de electrones del biomaterial que tienen valores de potencial de reducción más bajos que los de Cr (VI), de esta manera, los iones de Cr (III) permanecen en la solución acuosa o forman complejos con los grupos de unión al cromo que están presentes en el biomaterial.

- Mecanismo de reducción indirecta:

Son tres pasos: (a) unión de Cr (VI) aniónico a los grupos cargados positivamente en la superficie del biomaterial tales como grupos amino y carboxilo, (b) reducción de Cr (VI) a Cr(III) por adyacentes grupos donadores de electrones y (c) liberación de Cr(III) en fase acuosa debido a la repulsión entre Cr (III) cargado positivamente y otros grupos cargados positivamente en la superficie del biomaterial, o la formación de complejos de Cr (III) con grupos adyacentes.

1.1.8. Termodinámica de la adsorción

La temperatura es un parámetro importante en la adsorción de iones metálicos, puesto que relaciona con la energía cinética del metal, explicando de esta manera el proceso de difusión. El aumento o disminución de la temperatura influye en la cantidad de metal absorbido por la biomasa, debido a que la biomasa es de naturaleza porosa; y no se descarta la posibilidad de que ocurra difusión junto con

adsorción como un mecanismo en la eliminación de metales. La variación de temperatura provoca un cambio en los parámetros termodinámicos como ΔG^0 , ΔH^0 y ΔS^0 y estos parámetros contribuyen en la comprensión del mecanismo de sorción y se hallan con los datos de temperatura (Farooq et al., 2010)

Para entender el proceso natural de la adsorción del Cr (VI), se calculan los parámetros de la termodinámica, tales como los cambios en la entalpía estándar (ΔH^0), entropía estándar (ΔS^0) y el estándar energía libre de Gibbs (ΔG^0). Los parámetros termodinámicos fueron calculados con las siguientes ecuaciones (Akram et al., 2017):

$$K_C = \frac{C_a}{C_e} \quad (6)$$

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_C \quad (7)$$

$$\ln K_C = \frac{\Delta S^0}{R} - \frac{\Delta H^0}{RT} \quad (8)$$

Reorganizando, se tiene (Farooq et al., 2010):

$$-RT \ln K_C = \Delta H^0 - T \Delta S^0 \quad (9)$$

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T \Delta S^0 \quad (10)$$

Donde:

ΔG^0 : Es la energía libre de Gibbs estándar ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)

ΔH^0 : Es la entropía estándar ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)

ΔS^0 : Es la entropía estándar ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

K_C : Es la constante de equilibrio

C_a : Es la concentración en la fase sólida del adsorbente en el equilibrio ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

C_e : Es la concentración en el equilibrio en la solución ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

R : Es la constante universal de los gases ($8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T : Es la temperatura en Kelvin (K)

En el proceso de sorción, los parámetros (ΔG°), (ΔH°) y (ΔS°) proporcionan información importante: (ΔG°) aborda la posibilidad y viabilidad de una determinada reacción, su valor negativo indica que el proceso es factible y espontáneo, el aumento de este valor en una escala negativa con la temperatura, indica la probabilidad aumentada del proceso de sorción, pero si el valor disminuye en una escala negativa indica que existe una disminución de la adsorción a temperaturas más altas (Miretzky & Fernandez, 2010), (González et al., 2012); (ΔH°) indica la ruta de la energía en el sistema, un valor positivo indica un proceso endotérmico (Miretzky & Fernandez, 2010), (Villen-Guzman et al., 2019), (Farooq et al., 2010) y un valor negativo indica un proceso exotérmico, lo cual ayuda a decidir si una determinada biomasa puede ser utilizada para remover iones metálicos a elevadas temperatura o no (Farooq et al., 2010); (ΔS°), por su parte, se refiere al grado de desorden en la interfaz metal – biomasa, así, si los valores son negativos, indican una menor aleatoriedad o un mayor orden en la interfaz metal – biomasa (Farooq et al., 2010), caso contrario, si el valor es positivo indica un aumento en el desorden del sistema (Farooq et al., 2010), (Villen-Guzman et al., 2019).

1.1.9. Isotermas de adsorción

Las isotermas de adsorción de materiales porosos son de gran importancia debido a que llevan importante información de equilibrio; el modelado de las isotermas de adsorción se ha explorado desde hace más de cien años. IUPAC ha reportado la clasificación de isotermas de adsorción en seis tipos; la adsorción clásica, modelos como Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich (DR), Toth, Sips, etc. han sido ampliamente usados debido a su simplicidad en formas y parámetros; pero la mayoría son modelos empíricos y ninguno de ellos genera los seis tipos de isotermas del reporte de IUPAC, por lo que se debe ajustar los parámetros para decidir el que describe mejor los datos experimentales (Kong & Adidharma, 2019).

La isoterma de adsorción define la relación entre los iones metálicos en la fase fluida y la concentración de metal adsorbido a pH, temperatura o dosis de adsorbente (Kuppusamy et al., 2016). El sistema de adsorción se basa principalmente en dos tipos de investigación: 1) pruebas de equilibrio de adsorción por lotes y 2) estudios dinámicos de adsorción de flujo continuo. Los isotermas de

adsorción de equilibrio para sistemas de soluto único, son Langmuir y Freundlich (Volesky & Holan, 1995):

Isoterma de Langmuir:

El modelo de adsorción de Langmuir se basa en el supuesto de que la adsorción máxima corresponde a una monocapa saturada de moléculas de soluto en la superficie del adsorbente (Amel et al., 2012), (Torab-Mostaedi et al., 2013), (Akram et al., 2017), el cual tiene un número finito de sitios idénticos de adsorción y homogéneos (Torab-Mostaedi et al., 2013), (Akram et al., 2017); asimismo no ocurre interacción entre las moléculas adsorbidas y la energía de adsorción es uniforme en la superficie (Saha & Orvig, 2010)

El modelo de Langmuir se puede expresar de la siguiente manera (Volesky & Holan, 1995):

$$q_e = \frac{bC_e q_{max}}{1 + bC_e} \quad (11)$$

Donde:

q_e : Cantidad de ion metálico adsorbido por unidad de masa de sorbente (mg.g^{-1}).

q_{max} : Es la cantidad máxima adsorbida por unidad de masa de sorbente para formar una monocapa completa en la superficie unida a un alto C_e , (mg.g^{-1}).

C_e : Es la concentración de equilibrio (final) del soluto en la solución (mg.L^{-1}).

b : Constante de Langmuir, es una constante relacionada con la afinidad de los sitios de unión (L.mg^{-1})

Puede ser linealizada en las siguientes formas (Amel et al., 2012), (Li et al., 2009):

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max}b} + \frac{C_e}{q_{max}} \quad (12)$$

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{max}b} \cdot \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_{max}} \quad (13)$$

$$q_e = q_{max} - \frac{q_e}{C_e} \left(\frac{1}{b} \right) \quad (14)$$

$$\frac{q_e}{C_e} = bq_{max} - bq_e \quad (15)$$

Se calcula el factor de separación (R_L) y se expresa como una constante adimensional de la isoterma de Langmuir, según la ecuación (Memon et al., 2009), (Kahraman & Pehlivan, 2017).

$$R_L = \frac{1}{(1 + bC_0)} \quad (16)$$

Donde:

C_0 : Es la concentración inicial de los iones del metal (mg.L^{-1}).

b : Es la constante de Langmuir

El factor de separación, R_L , describe el tipo de isoterma de Langmuir como irreversible ($R_L = 0$), favorable ($0 < R_L < 1$), lineal ($R_L = 1$) o desfavorable ($R_L > 1$) (Memon et al., 2009), (Kahraman & Pehlivan, 2017), (Torab-Mostaedi et al., 2013).

Isoterma de Freundlich:

El modelo de Isoterma de Freundlich describe la adsorción en la superficie heterogénea (Ullah et al., 2013), (Amel et al., 2012), debido a la diversidad de los sitios de adsorción (Amel et al., 2012), y no se limita a la formación de monocapa (Ullah et al., 2013), acompañada de interacciones entre moléculas adsorbidas (Torab-Mostaedi et al., 2013).

El modelo de Freundlich puede ser expresada de la siguiente forma (Volesky & Holan, 1995):

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (17)$$

Donde:

q_e : Cantidad de ion metálico adsorbido por unidad de masa de sorbente (mg.g^{-1}).

C_e : Es la concentración de equilibrio (final) del soluto en la solución (mg.L^{-1}).

K_f : Es la constante de Freundlich.

n : Es el factor de heterogeneidad del biosorbente.

La ecuación anterior puede linealizarse (Mahindrakar & Rathod, 2018):

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (18)$$

El factor de heterogeneidad “ n ”, expresa las energías de enlace entre el adsorbato y el biosorbente (Mahindrakar & Rathod, 2018); si n esta entre 2 a 10 representa buenas características de adsorción, de 1 a 2 moderadamente difíciles y menos de 1 deficiente (Temesgen et al., 2018). Los valores fraccionales de $1/n$ del modelo sugieren la heterogeneidad de la superficie del biosorbente y a la vez indica una biosorción favorable de iones metálicos (Ullah et al., 2013); el parámetro $1/n$ del modelo de Freundlich en la división de cinco zonas, para explicar un proceso de adsorción por etapas es como sigue: si $1/n < 0.01$ es llamado pseudo – irreversible, si $0.01 < 1/n < 0.1$ es llamado fuertemente favorable, si $0.1 < 1/n < 0.5$ es llamado favorable, si $0.5 < 1/n < 1$ es llamado pseudo lineal y si $1/n > 1$ es llamado desfavorable (Tseng & Wu, 2008)

De acuerdo a Volesky y Holan, los modelos describen muchas isothermas de biosorción, pero no pueden tener una interpretación física significativa en la biosorción. Las isothermas de biosorción pueden exhibir un patrón irregular debido a la naturaleza compleja del material sorbente, sus múltiples sitios activos y la química compleja de la solución de algunos compuestos metálicos (Volesky & Holan, 1995).

1.1.10. Cinética de la adsorción

Se requiere del estudio cinético para descubrir el mecanismo de biosorción y la velocidad determinante de una reacción química (Ali et al., 2016). Para investigar el mecanismo de biosorción y a la velocidad a la que tienen lugar estos procesos, es importante considerar los procesos de transferencia de masa y reacción química (González et al., 2012), la cinética de adsorción tiene gran dependencia de las características físicas y químicas del material biosorbente (Saha & Orvig, 2010)

La cinética de adsorción de un sistema se controlan por diferentes pasos: transferencia del soluto a la superficie de la partícula del sorbente, transferencia desde la superficie del sorbente a los sitios activos intra partículas, reteniéndolo mediante sorción, complejación o fenómenos de precipitación de la intrapartícula (Akram et al., 2017).

Varios tipos de modelos de cinética fueron utilizados para describir la cinética de adsorción, entre ellos el modelo de pseudo primer orden, modelo de pseudo segundo orden, modelo de la cinética de Langmuir y el modelo de Elovich; de los cuales los más usados en los estudios para describir la cinética de adsorción fueron el modelo de pseudo primer orden y el modelo de pseudo segundo orden, analizando el coeficiente de determinación (R^2) u otros parámetros estadísticos y concluyendo en cuál de los dos modelos describen mejor los datos cinéticos experimentales (Guo & Wang, 2019).

En la cinética de adsorción ocurre que, en los primeros minutos de contacto entre el biosorbente y el adsorbato de la solución, el incremento de la capacidad de adsorción del ion metálico se incrementa rápidamente lo cual se observa graficando y después de un tiempo la curva se estabiliza la que alcanza un equilibrio. Este comportamiento, se explica debido a que la presencia de sitios de adsorción activos retienen fácilmente al ion metálico, después que se agotan los sitios activos, los aniones adsorbidos migran a poros internos del biomaterial, lo que explica una adsorción más lenta para tiempos posteriores (Kuppusamy et al., 2016), también los iones metálicos interactúan químicamente con los grupos funcionales del adsorbente (Ali et al., 2016).

Modelo de pseudo primer orden

Un modelo cinético para el análisis de adsorción es la expresión de velocidad de pseudo primer orden de Lagergren de la forma (Lagergren, 1898):

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (19)$$

Donde q_t (mg.g^{-1}).y q_e (mg.g^{-1}). son la capacidad de adsorción en cualquier tiempo t y en el equilibrio, respectivamente; k_1 (l.min^{-1}) es la constante de velocidad de pseudo primer orden.

Integrando esta ecuación, con la condición inicial $q_0 = 0$ a $t = 0$ el modelo de pseudo primer orden; puede ser reordenada como sigue (Saha & Orvig, 2010):

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \left(\frac{k_1}{2.303}\right) t \quad (20)$$

O de la siguiente forma (Guo & Wang, 2019):

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (21)$$

Modelo de pseudo segundo orden

El modelo cinético de pseudo segundo orden asume que la adsorción es de naturaleza química; el mecanismo puede implicar el intercambio de fuerzas de valencia mediante el intercambio de electrones entre el adsorbente y el adsorbato (Akram et al., 2017). La velocidad para la reacción se expresa como (Ho & McKay, 1999):

$$\frac{d(P)_t}{dt} = k_2[(P)_0 - (P)_t]^2 \quad (22)$$

ó

$$\frac{d(HP)_t}{dt} = k_2[(HP)_0 - (HP)_t]^2 \quad (23)$$

Donde

$(P)_t$ y $(HP)_t$ son el número de sitios activos ocupados en el sorbente en el tiempo t .

$(P)_0$ y $(HP)_0$ son el número de sitios de equilibrio disponible en el sorbente.

Esto es asumiendo que la capacidad de sorción es proporcional al número de sitios activos ocupados en el sorbente, luego la velocidad de la cinética se puede reescribir como:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2[q_e - q_t]^2 \quad (24)$$

Donde:

k_2 es la constante de velocidad de adsorción de pseudo segundo orden ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$), q_e y q_t son la capacidad de adsorción en el equilibrio y en cualquier tiempo t ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$).

Integrando a las condiciones de contorno $t = 0$ a $t = t$ y $q_t = 0$ a $q_t = q_t$ se convierte en:

$$\frac{1}{(q_e - q_t)} = \frac{1}{q_e} + k_2 t \quad (25)$$

Integrando puede ser reorganizada, obteniéndose la siguiente ecuación (Ho & McKay, 2000):

$$q_t = \frac{t}{1/k_2 q_e^2 + t/q_e} \quad (26)$$

El cual tiene una forma lineal de

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (27)$$

Si la velocidad de adsorción es:

$$h = k_2 q_e^2 \quad (28)$$

Donde h es la velocidad de adsorción inicial ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)

Luego las ecuaciones (26) y (27) se convierten en:

$$q_t = \frac{t}{1/h + t/q_e} \quad (29)$$

y

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{h} + \frac{1}{q_e} t \quad (30)$$

Sistemas multicomponentes

Las aguas residuales industriales poseen diferentes tipos de iones metálicos (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) y aniones (SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- y Cl^-), los cuales pueden interferir en la adsorción de un ion específico, en este caso el Cr (VI) (Akram et al., 2017).

La presencia de varios iones en solución, ocasiona interacciones químicas entre los iones y con la biomasa, que provoca una competencia por el sitio; los grupos funcionales presentes en la pared celular y la membrana son inespecíficos y diferentes cationes compiten por los sitios de unión. Existen reportes que la remoción de metales aumenta con los radios iónicos de cationes metálicos, lo cual afecta el proceso de intercambio iónico y adsorción, pero también pueden ser por las diferencias en los potenciales de electrodo de los diversos iones. Cuanto mayor es el potencial del electrodo, mayor es la afinidad por la biomasa (Sekhar et al., 2003).

1.1.11. Cáscara de plátano como biosorbente

El plátano es consumida en todo el mundo presentando diferentes especies, la cáscara es el principal residuo del plátano y corresponde del 30 - 40% del peso de la fruta (Bhatnagar et al., 2015). La gran cantidad de compuestos de carbono presentes en él han sido una atracción para estudios como materia prima para biosorbentes contra una amplia gama de contaminantes (Tanweer & Danish, 2018). Contiene principalmente compuestos orgánicos ricos en carbono como celulosa, hemicelulosa, pectina, clorofila y otras especies de bajo peso molecular; la cáscara de plátano presenta gran capacidad de adsorción de metales y compuestos orgánicos, esto se debe a la presencia de grupos hidroxilo y carboxilo de la pectina principalmente (Bhatnagar et al., 2015).

La cáscara de plátano se ha utilizado en la remoción de iones metálicos como el Cr (III), con una adsorción máxima de 95% a pH 4 (Jamil et al., 2008). En la adsorción del Plomo (II) y Cadmio (II), la capacidad máxima de adsorción con la isoterma de Langmuir, indica que 1 g de cáscara de plátano puede adsorber 5.71 mg de Cadmio (II) y 2.18 mg de Plomo (II) con pH 4-8 (Anwar et al., 2010). En la biosorción del Sr (II), la capacidad máxima de adsorción de cáscara de plátano fue de 41.5 mg.g^{-1} a 120 rpm, pH 7, 323 K, $439 \text{ }\mu\text{m}$ tamaño de partícula y 10 min tiempo de contacto (Mahindrakar & Rathod, 2018). En la remoción de un colorante básico como el azul de metileno con cáscara de plátano activada (ABP) se obtuvo una capacidad máxima de adsorción de 19.671 mg.g^{-1} siguiendo la ecuación de la cinética de pseudo segundo orden y la isoterma de Freundlich (Amel et al., 2012). Asimismo, para la remoción del reactivo de colorante rojo de aguas residuales de industria

textil con cáscara de plátano activada se obtuvo una remoción máxima de 70.25% a pH 4, concentración de colorante inicial de 25 mg.L⁻¹, dosis de adsorbente 1 g/100 mL y 30°C (Temesgen et al., 2018).

En el presente trabajo de investigación se utiliza la cáscara de plátano *musa acuminata colla* y su taxonomía se muestra a continuación:

Plátano (*Musa acuminata colla*)

Pertenece a la especie: *Musa acuminata colla*, sus nombres comunes son “plátano de seda”, “Bananero”. (Anexo 4):

REINO Vegetal

SUB REINO Phanerogamae

DIVISION Angiospermae

CLASE Monocotyledoneae

ÓRDEN Zingiberales

FAMILIA Musaceae

GÉNERO Musa

ESPECIE acuminata

NOMBRE CIENTÍFICO *Musa acuminata* var. *colla*

1.1.12. Espectroscopia de infrarrojo

Los métodos espectroscópicos utilizan radiación al pasar a través de la muestra que contiene el analito. La radiación se define por su longitud de onda o frecuencia que está relacionada con la energía de radiación según la ley de Planck (Zhang, 2007), (Haar, 1967).

La región infrarrojo medio (MIR) (2500 – 25000 nm ó 4000-400 cm⁻¹) retiene información para identificar moléculas orgánicas, estructura y conformación de moléculas tales como proteínas, polisacáridos y lípidos (Dufour, 2009).

Movimientos vibratorios:

Los movimientos vibracionales de las moléculas inducen a la absorción en la región infrarroja; estas bandas de absorción se han utilizado en análisis cuantitativos y cualitativos de muchas moléculas para la identificación y la atribución a grupos químicos específicos, los cuales proporcionan información específica. Los movimientos vibratorios de dos átomos de una molécula diatómica se consideran como movimientos de compresión y extensión a manera de un resorte (los átomos se pueden atraer o alejar). Los enlaces entre átomos ligeros vibran a frecuencias más altas que los enlaces entre átomos pesados (Dufour, 2009).

Estructura molecular del espectro infrarrojo

La región de 4000 a 3100 cm^{-1} consiste en la absorbancia de las vibraciones de estiramiento O-H y N-H de grupos hidroxilo y amida de proteínas. Las bandas de proteínas también aparecen en las regiones 1700-1550 cm^{-1} (amida I y amida II) y 1310-1250 cm^{-1} (amida III). Las vibraciones de estiramiento C-H de los grupos funcionales $-\text{CH}_3$ y $-\text{CH}_2$ aparecen entre 3100 y 2800 cm^{-1} . El rango espectral 1250 – 800 cm^{-1} consiste en señales de fosfodiésteres y carbohidratos (Dufour, 2009).

Hay dos regiones de los espectros IR: región de frecuencia de grupo que abarca radiación aproximadamente 366 cm^{-1} a aproximadamente 1200 cm^{-1} (3- 8 mm) (Zhang, 2007) y la región 1200 a 600 cm^{-1} (8-14 mm) que se denomina región de huella digital ya que contiene señales que son distintas entre cada muestra y están altamente conservadas dentro de cada muestra (Dufour, 2009). Los picos amplios e intensos de 3200 a 3500 cm^{-1} reflejan estiramiento de grupos hidroxilo y corresponde a la celulosa, pectina, hemicelulosa y lignina; los picos entre 900 – 1300 cm^{-1} son por la vibración de estiramiento de C-O de fenoles, éteres, ésteres o alcoholes; el estiramiento C=C se puede atribuir a la presencia de anillos aromáticos o de benceno de la lignina; el pico 1439.60 cm^{-1} se deben a la vibración C-H se puede atribuir a grupos alifáticos y aromáticos (Amel et al., 2012).

En la siguiente tabla se muestran las frecuencias de los grupos funcionales más comunes (Skoog et al., 2008).

Tabla 4.

Frecuencias de grupo para grupos orgánicos funcionales

Enlace	Tipo de compuesto	Frecuencias, cm^{-1}	Intensidad
C-H	Alcanos	2850-2970	Fuerte
		1340-1470	Fuerte
C-H	Alquenos	3010-3095	Media
		675-995	Fuerte
C-H	Alquinos	3300	Fuerte
C-H	Anillos aromáticos	3010-3100	Media
		690-900	Fuerte
O-H	Alcoholes monoméricos, fenoles	3590-3650	Variable
	Alcoholes con puente de hidrógeno, fenoles	3200-3600	Variable, a veces amplia
	Ácidos carboxílicos monoméricos	3500-3650	Media
	Ácidos carboxílicos con puente de hidrógeno	2500-2700	Amplia
N-H	Aminas, amidas	3300-3500	Media
C=C	Alquenos	1610-1680	Variable
C=C	Anillos aromáticos	1500-1600	Variable
C≡C	Alquinos	2100-2260	Variable
C-N	Aminas, amidas	1180-1360	Fuerte
C≡N	Nitrilos	2210-2280	Fuerte
C-O	Alcoholes, éteres, ácidos carboxílicos, ésteres	1050-1300	Fuerte
C=O	Aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos, ésteres	1690-1760	Fuerte
		1500-1570	Fuerte
NO ₂	Compuestos nitro	1300-1370	Fuerte

Fuente: Skoog et al. (2008)

1.2. Antecedentes

Memon et al. (2009), investigaron la remoción de Cr (VI) de aguas residuales industriales con cáscara de plátano, encontraron una adsorción rápida de 95% en 10 minutos a pH=2; la cinética de adsorción se ajustó al modelo de pseudo primer orden y la biosorción de Cr(VI) sigue las isothermas de Langmuir con una capacidad máxima de adsorción (q_e) de 131.56 mg.g⁻¹; para el factor separación (R_L) de la isoterma de Langmuir se tiene valores entre 0.21 y 0.99 en un rango de temperatura de 20 – 40 °C, el cual es altamente favorable. Los parámetros termodinámicos fueron $\Delta H^\circ = -30.5 \text{ kJ.mol}^{-1}$, $\Delta S^\circ = 0.11 \text{ kJ.mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ y $\Delta G^\circ(303 \text{ K}) = -3.81 \text{ kJ.mol}^{-1}$, los valores negativos de ΔH° y ΔG° demuestra la naturaleza exotérmica y espontánea del fenómeno de sorción; la influencia de ciertos iones mostraron que solo los iones de Fe (de los probados) suprimieron la sorción de Cr (VI) de las aguas residuales industriales.

Huang et al. (2013), en su investigación para la adsorción de Cr (VI) usaron cáscara de mangostán con modificación química de hidróxido de calcio Ca (OH)₂. La isoterma de adsorción de Cr (VI) se ajustó al modelo de Langmuir; además señala que la vibración de estiramiento O-H puede ser debido a enlaces de hidrógeno inter e intramoleculares de alcoholes, fenoles y ácidos carboxílicos. La capacidad de adsorción a diferentes temperaturas de 20, 35 y 45°C es 24.5, 19.4 y 14.9 mg.g⁻¹ respectivamente, lo que demuestra que es un proceso exotérmico.

Ullah et al. (2013), en su estudio, utilizaron biomasa nativa e inmovilizada de bagazo de caña de azúcar para la adsorción de Cr (III) y Cr (VI) de aguas residuales simuladas y de curtiduría. La adsorción máxima fue de 80,6% y 41,5% para Cr (VI) y Cr (III); se ajustó mejor el modelo de Langmuir con una capacidad máxima de adsorción (q_e) = 495.56 mg.g⁻¹ y la cinética de biosorción describe mejor el modelo de pseudo segundo orden con resultados de la constante de velocidad de adsorción de pseudo segundo orden $k_2 = 2.92 \times 10^{-4} \text{ g.mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, capacidad de adsorción en el equilibrio $q_e = 52.63 \text{ mg.g}^{-1}$ y la velocidad de sorción inicial $h = 0.8088 \text{ mg.g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Además, indican que a medida que se incrementa el pH de la solución, las cargas en la superficie del biosorbente se vuelven negativas lo que conduce a fuerzas de repulsión entre los iones y el biosorbente y esto inhibe la adsorción presentando como consecuencia un bajo porcentaje de adsorción.

Kuppusamy et al. (2016), describen el uso de ramas secas de *Melaleuca diosmifolia* para eliminar el Cr (VI). Los estudios reportan que el biosorbente (5g.L⁻¹) removió el 97 –

99.9% de 250 mg.L^{-1} de Cr (VI) a pH (2 – 10) y temperatura ($24 - 48^\circ\text{C}$); la capacidad de adsorción en monocapa fue de $62,5 \text{ mg.g}^{-1}$. Asimismo, la cinética de adsorción describió el modelo de pseudosegundo orden con resultados de la constante de velocidad de adsorción de pseudo segundo orden $k_2 = 0.15 \text{ g.mg}^{-1}.\text{min}^{-1}$, capacidad de adsorción en el equilibrio $q_e = 50 \text{ mg.g}^{-1}$ y la velocidad de sorción inicial $h = 378.8 \text{ mg.g}^{-1}.\text{min}^{-1}$; la adsorción de equilibrio describió el modelo de la isoterma de Langmuir con una capacidad máxima de adsorción (q_e) = 62.5 mg.g^{-1} .

González et al. (2012), determinaron la biosorción de cromo (VI) en soluciones acuosas por las algas pardas *Sargassum muticum*; encontrando que la mayor capacidad de adsorción de Cr (VI) es a pH 2; con una remoción máxima de 84% a 50°C , 20 mg.L^{-1} de concentración de metal y dosis de adsorbente de 2 g.L^{-1} ; a estas condiciones óptimas se obtuvieron modelos de cinética e isoterma, describiendo mejor un proceso de sorción química de pseudo-segundo orden con resultados de la constante de velocidad de adsorción de pseudo segundo orden $k_2 = 0.0004 \text{ g.mg}^{-1}.\text{min}^{-1}$, capacidad de adsorción en el equilibrio $q_e = 6.8 \text{ mg.g}^{-1}$ y la velocidad de sorción inicial $h = 0.0185 \text{ mg.g}^{-1}.\text{min}^{-1}$ y la ecuación más apropiada para describir los perfiles de isoterma fue el modelo de Langmuir con una capacidad máxima de adsorción (q_e) = 196.1 mg.g^{-1} . Asimismo, el efecto de la temperatura de 20 a 50°C demuestra que a temperatura alta (50°C) mejora la biosorción de Cr (VI) puesto que hubo un aumento en la capacidad de sorción, lo que indica una naturaleza endotérmica del proceso y se atribuye este aumento con el incremento de sitios activos disponibles o debido a que disminuye el espesor de capa que rodea al biosorbente, y cuando la temperatura es aún más alta, la disminución en la biosorción de metales aumenta debido a daños ocurridos en la superficie del biomaterial. También indica que el estiramiento relacionado con O-H indica la presencia de grupos hidroxilo y amino.

Akram et al. (2017), investigaron la biosorción de Cr (VI), para ello utilizaron biocompuesto de mango (*Mangifera indica*), optimizaron el efecto de las variables de pH, concentración de iones Cr (VI), dosis de adsorbente, tiempo de contacto y temperatura; los niveles óptimos fueron 3, 200 mg.L^{-1} , 0.05g , 30 min y 33°C respectivamente para la adsorción máxima de Cr (VI); se aplicaron isotermas y modelos cinéticos, ajustándose mejor el modelo cinético de pseudo segundo orden con resultados de la constante de velocidad de adsorción de pseudo segundo orden $k_2 = 0.0058 \text{ g.mg}^{-1}.\text{min}^{-1}$, capacidad de adsorción en el equilibrio $q_e = 141 \text{ mg.g}^{-1}$ y la velocidad de sorción inicial $h = 115.3098 \text{ mg.g}^{-1}.\text{min}^{-1}$; y también se ajustó a la isoterma de Langmuir con una

capacidad máxima de adsorción (q_e) = 322.58 mg.g⁻¹. A su vez, la capacidad de adsorción (q_e) disminuyó al aumentar la temperatura, demostrando que la baja temperatura favorece la eliminación de Cr (VI) y sugiere que la adsorción es de naturaleza exotérmica; y ocurre una máxima remoción a los 33°C con 0.05 g de dosis de adsorbente, pH 3, concentración inicial 1000 mg.L⁻¹, tiempo de contacto 30 min y agitación de 120 rpm. Los resultados de los parámetros termodinámicos para ΔG° en el rango de -12.2265 kJ.mol⁻¹ (306 K) (33°C) a -6.96776 kJ.mol⁻¹ (334 K) (61°C), indica que es de naturaleza espontánea, $\Delta H^\circ = -68.3435742$ kJ.mol⁻¹ confirma que es de naturaleza exotérmica y $\Delta S^\circ = -0.18423$ kJ.mol⁻¹.K⁻¹ indica que la aleatoriedad disminuyó en la interfaz sólido – líquido por la adsorción de Cr (VI) en la superficie.

Najafpour et al. (2019), realizaron la remoción de Hg²⁺, As³⁺, Pb²⁺, Cd²⁺ y Cr⁶⁺, utilizando hongos vivos de té de la bebida Kombucha (té fermentado con propiedades medicinales y compuestos nutricionales). Estudiaron cuatro parámetros: dosis inicial de hongos de té, contenido de té, contenido de azúcar y dureza del agua; los cuales fueron optimizados por el diseño central compuesto (CCD) bajo metodología de superficie de respuesta (RSM); la remoción experimental para el Hg²⁺, As³⁺, Pb²⁺, Cd²⁺ y Cr⁶⁺ fueron 93.3%, 76.7%, 76.1%, 84.3% y 75.4% respectivamente. Asimismo, evidenciaron la presencia de celulosa y lignina con la presencia de los grupos carboxilo e hidroxilo que son biosorbentes eficaces de iones metálicos.

Kahraman & Pehlivan (2017), en la remoción de Cr (VI) utilizaron biocarbón de semillas de oleaster (*Elaeagnus*) (OSBC) y biocarbón de hueso de cereza (*Prunus avium*) (CSBC), sus resultados indican que a pH 1.5, el porcentaje de remoción fue de 84.2% para OSBC en 150 minutos y para CSBC fue de 81.3% en 180 minutos; los datos experimentales siguieron la cinética de pseudo segundo orden. En los resultados de la isoterma de adsorción, indican que al aumentar la concentración inicial de Cr (VI) de 2×10^{-4} M a 6×10^{-3} M, ocurre un incremento en la capacidad de adsorción debido aumento de la fuerza impulsora del gradiente de concentración con el aumento de la concentración inicial de Cr (VI) y una disminución en la remoción en el equilibrio de 95 a 84%. Reporta además, los resultados del factor de separación (R_L) entre 0 y 1 en cada concentración inicial y los datos más bajos de R_L estuvieron bastante cerca de cero.

Stoica-Guzun et al. (2016), en los estudios realizados para la remoción de Cr (VI) de soluciones acuosas, sintetizaron compuestos bacterianos de celulosa – magnetita; los

resultados demuestran que la mayor remoción fue a pH 4 y que el proceso de adsorción describe el modelo de Freundlich con resultados de factor de heterogeneidad $n = 2.795$ y la constante de Freundlich $k_f = 1.218$.

Castro (2015), en su Tesis, evaluó la capacidad de bioadsorción de Pb (II) y Cr (VI) utilizando cáscara de banano maduro; los resultados obtenidos de máximo porcentaje de bioadsorción fueron: El rango de pH de 5.4 a 6.9 fue eficaz para la eliminación de hasta un 80% en el plomo II y 51.2% en el cromo (VI). También indica que se obtuvo un rendimiento de 15% de harina de cáscara de plátano de una muestra inicial de 5 Kg de cáscara de plátano maduro.

Espinosa & Mera (2015), evaluaron la remoción de cromo (VI) con cáscara de plátano verde. Los resultados en porcentajes de remoción para una concentración de 1.634 mg.L^{-1} de cromo (VI), fueron de 99.94% con pH de 1.5, cantidad de bioadsorbente de 1 g y tiempo de contacto de 60 minutos.

Losada et al. (2015) en su investigación para la eliminación de cromo utilizaron cáscara de Moringa oleífera como bioadsorbente; estudiaron los efectos de tiempo de contacto, dosis de adsorbente, pH y temperatura; el porcentaje de remoción óptimo fue de 90% a un pH de 3.

Torres et al. (2012), en su investigación sobre la capacidad de remoción de cromo (VI) en solución por cáscara de plátano (*Musa cavendishii*), determinaron que para 1 g de biomasa en 100 ml de 50 mg.L^{-1} de metal la remoción fue total a los 60 minutos, pH de 1.0 y 28°C , con respecto a la temperatura la remoción es del 100% a los 60°C y 20 minutos. La reducción de cromo (VI) (1 g.L^{-1}) a cromo (III) fue después de 40 minutos de incubación sin cambios en la concentración de cromo total.

Cubides & Ramírez (2014), en su estudio sobre la adsorción de Cr (VI) utilizando residuos de café, trabajaron con soluciones acuosas de dicromato de potasio con concentración de $5 \text{ } \mu\text{g.ml}^{-1}$, encontraron que las isothermas de adsorción se ajusta al modelo de Freundlich con resultados de factor de heterogeneidad $n = 0.896$ y la constante de Freundlich $k_f = 0.901$ y la cinética es de pseudo segundo orden; además obtuvieron adsorciones superiores al 95% de Cr (VI).

Tejada et al. (2015), reportan sobre la absorción de cromo hexavalente con cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*), reportan resultados de 66.6 % de Cr (VI) en porcentaje de

remoción en 120 minutos, pH=3, tamaño de partícula 0.425 mm y capacidad de adsorción 16.66 mg.g⁻¹.

Memon et al. (2008), realizó caracterización de la cáscara de plátano y presenta resultados de análisis proximal tales como: materia seca 90.36%, humedad 9.64%, grasa 5.02%, fibra cruda 11.04%, proteína cruda 10.14% y ceniza 18.98 %.

Ayala et al. (2003), en su tesis de investigación sobre el estudio proximal comparativo de la cáscara y pulpa del plátano (*Musa paradisiaca*), reporta resultados de la harina de cáscara de plátano: Humedad 7.2415, grasa 6.0025, proteína 7.8888, fibra cruda 8.5850, cenizas 11.3 y carbohidratos 58.9822.

Díaz et al. (2013) en la investigación de la biosorción de cromo (VI) con quitosano cuaternario reticulado, llegaron a los siguientes resultados: Capacidad máxima de adsorción 208,3 mg/g, remoción de 99,78% a pH 4,5.

Flores (2014), en su estudio utilizó hueso de *Prunus Pérsica* (durazno) para la biosorción de Cr (VI), en los experimentos de influencia de la temperatura a pH 2 con concentración inicial de Cr (VI) de 10 mg.L⁻¹ a 25, 60 y 80°C, los resultados de capacidad de adsorción (q_t) de Cr (VI) fueron 0.40, 0.84 y 0.83 mg.L⁻¹ respectivamente, lo cual indica que la biosorción se ve favorecida con la temperatura hasta los 60°C y luego disminuye la capacidad de adsorción; la capacidad de adsorción de Cr (VI) del licor de curtido es 6.40 mg.g⁻¹.

Miranda (2017), en su Tesis Doctoral realizó investigación sobre la biosorción de Cr (VI) utilizando hojas de eucalipto (*Globulus labill*) modificado molecularmente con activación ácida, los resultados a los que llegó en soluciones acuosas pH=3, sorbente 3g.L⁻¹ a 25°C y 30 minutos de contacto con agitación a 200 rpm; bajo estas condiciones se obtuvo en agua residual de curtiembre 90.88 % de adsorción de Cr (VI); obtuvo la constante cinética de pseudo segundo orden y las constantes del modelo de Isoterma de Freundlich como mejor ajuste con resultados de factor de heterogeneidad $n = 1.1425$ y la constante de Freundlich $k_f = 0.5701$. En los resultados del proceso de adsorción batch a diferentes concentraciones para las isothermas, se observa que cuando aumenta la concentración de 5.5 a 52 mg.L⁻¹ ocurre un aumento en la capacidad de adsorción de Cr (VI) de 1.831 a 16.430 mg.g⁻¹ y una disminución en la remoción de equilibrio de Cr (VI) de 99.9 a 94.78%.

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Identificación del problema

La contaminación por metales pesados en el agua, suelo y aire se han convertido en un problema para el medio ambiente, las altas concentraciones de metales pesados como cadmio, mercurio, cromo, cobalto, cobre, molibdeno, níquel, plomo entre otros, están asociados con las descargas de los efluentes industriales y de minería y al no ser biodegradables, se acumulan y alcanzan niveles tóxicos perjudiciales para la salud.

En el proceso de curtido de pieles de los animales (bovinos, ovinos, entre otros), utilizan sales de Cromo como agente por la rapidez y la calidad de cuero obtenido en comparación con otras sales y agentes de curtición que son poco eficientes y lentas que pueden durar hasta dos años. Pero la dificultad reside en que al momento de la curtición, existen sales de Cromo que no se fijan y que se quedan en los lodos de depuración, de esta manera las industrias tienen alto impacto por los efluentes que elimina (Chávez, 2010).

La ATSDR (2012) (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades), señala que el cromo puede ingresar al cuerpo mediante la respiración por aire contaminado con cromo, por la ingestión y al contacto por la piel. La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC), a su vez, señala que los compuestos de cromo (VI) son carcinogénicos en los seres humanos. Por lo que para proteger la salud se han desarrollado reglamentos y recomendaciones para sustancias tóxicas de agencias federales como la EPA. En el Perú existen normas como el D.S. N°021-2009-Vivienda para descargas de aguas residuales no domésticas en el

sistema de alcantarillado sanitario y el Valor Máximo Admisible para el Cromo (VI) es 0.5 mg.L^{-1} ; la norma D.S. 010-2010-MINAM para la descarga de efluentes líquidos de actividad Minero – Metalúrgico el límite máximo permisible (LMP) para el Cromo (VI) es 0.10 mg.L^{-1} (Miranda, 2017).

Existen varios tratamientos fisicoquímicos como la precipitación, intercambio iónico, ósmosis inversa, adsorción los cuales tienen elevado costo de implementación y mantenimiento, además generan lodos con alto costo de tratamiento. Por otro lado, se tienen estudios para la remoción de metales pesados de efluentes líquidos mediante la biosorción, y presenta ventajas de tratamiento sobre los tratamientos fisicoquímicos; por ejemplo presentan bajo costo por ser materiales renovables, presentan alta capacidad de acumular iones metálicos de manera rápida y eficaz (Reyes et al., 2006).

Siendo los biosorbentes una buena alternativa para la eliminación de metales pesados, y existiendo en grandes cantidades, es que en este trabajo de investigación se utiliza la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) para estudiar su influencia como biosorbente en la aplicación de soluciones acuosas de cromo Cr (VI), el cual es realizado en la Facultad de Ingeniería Química de la UNA-Puno.

2.2. Enunciados del problema

2.2.1. Problema general

¿En qué medida influye la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) como biosorbente del cromo hexavalente en soluciones acuosas?

2.2.2. Problemas específicos

¿Cómo identificar los grupos funcionales de la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*)

¿Cuáles serán los parámetros óptimos de pH, dosis de biomasa, tiempo de contacto y cuál será el pseudo orden cinético de reacción en solución acuosa utilizando biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*)?

¿Cuál será la isoterma de mejor ajuste y cómo será la termodinámica de adsorción en solución acuosa utilizando biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*)?

¿Cuál será el porcentaje de remoción de cromo hexavalente de agua residual industrial de curtiembre utilizando biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*)?

2.3. Justificación

Los compuestos de cromo son utilizados por las industrias en la fabricación de cromo duro industrial, artículos metalizados cromados, acero inoxidable, pigmento verde, sulfato de cromo, curtición de pieles, conservantes de madera, industria ladrillera, pinturas, fotografía y textilería; pero sus efluentes generan contaminación ambiental destruyendo los ecosistemas. Siendo necesario la minimización de los residuos de cromo concentrados en los efluentes de origen industrial debido a que el cromo es considerado altamente tóxico en su forma de cromo (VI) para la salud humana.

Existen, en la actualidad varios tipos de tratamiento para los efluentes de origen industrial como la precipitación, intercambio iónico, ósmosis inversa, métodos electroquímicos, técnicas de precipitación, entre otros; pero son de alto costo y generan lodos que también necesitan tratamiento. Se conocen actualmente otros tipos de tratamiento de tecnologías limpias que son de bajo costo y eficientes, estos tratamientos como: carbón activado, ligando naturales, desechos orgánicos, utilizan la biomasa presentando ventajas sobre los otros tratamientos fisicoquímicos.

Siendo el cromo un elemento altamente soluble y móvil en el agua, surge la necesidad de reducir la concentración de cromo en los efluentes de las industrias y sobre todo en la industria de curtiembre; además que este elemento, es un agente oxidante fuerte y es carcinogénica y mutagénica. Es así que se justifica socialmente, contribuyendo en la disminución del cromo hexavalente utilizando material biosorbente como es la cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*).

La aplicación de bioadsorción en el tratamiento del efluente industrial en su operación final la cual contiene baja concentración de cromo para alcanzar la remoción, puede ser utilizada, ya que, disminuye los costos de operación y a la vez, da un valor agregado a la cascara de plátano (*Musa acuminata colla*), cuya biomasa puede ser de uso continuo.

2.4. Objetivos

2.4.1. Objetivo general

Evaluar la biosorción del cromo hexavalente de soluciones acuosas utilizando biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*).

2.4.2. Objetivos específicos

Caracterizar la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) para identificar los grupos funcionales.

Determinar los parámetros óptimos de pH, dosis de biomasa, tiempo de contacto y el pseudo orden cinético de reacción en solución acuosa utilizando biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*).

Determinar la isoterma de mejor ajuste y la termodinámica de adsorción en solución acuosa utilizando biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*).

Determinar el porcentaje de remoción de cromo hexavalente de agua residual de curtiembre utilizando biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*).

2.5. Hipótesis

2.5.1. Hipótesis general

La biomasa de cáscara de plátano “*Musa acuminata colla*” es un biosorbente eficaz con alta capacidad de adsorción del cromo hexavalente en soluciones acuosas a condiciones óptimas de pH, dosis de biomasa y tiempo de contacto.

2.5.2. Hipótesis específicas

La caracterización de la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) permite identificar los grupos funcionales como el carboxilo e hidroxilo.

El diseño experimental de superficie de respuesta permite establecer los parámetros óptimos de pH, dosis de biomasa y tiempo de contacto; los que determinan el orden cinético de reacción.



La isoterma de mejor ajuste y la termodinámica de adsorción expresan la capacidad de adsorción y la naturaleza del proceso de adsorción en solución acuosa utilizando biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*).

La biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) aplicada en agua residual de curtiembre actúa como un biosorbente eficaz en la remoción de Cr (VI).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de estudio

Los estudios de investigación se realizaron en el Laboratorio de Control de Calidad de la Facultad de Ingeniería Química de la UNA – PUNO (ver Fig. 1), el cual está ubicado en el Departamento de Puno, Provincia de Puno, Distrito de Puno y georreferenciado por las coordenadas UTM (WGS 84) 19L 390807.76 E 8250380.26 S a 3848 m.s.n.m. La ciudad de Puno presenta clima frío y seco, moderadamente lluvioso; la temperatura promedio es de 9.00 °C, con días cálidos de 24.00 °C y noches frías de 2.00 a 3.00 °C

La toma de muestra de agua de residual fue realizada en la Planta Industrial de Curtiembre de la Facultad de Ingeniería Química de la UNA – PUNO (ver Fig. 2), ubicado en la ciudad de Puno el cual está ubicado en el Departamento de Puno, Provincia de Puno, Distrito de Puno, Centro Poblado de Salcedo y georreferenciado por las coordenadas UTM (WGS 84) 19L 392983.27 E 8244693.22 S a 3848 m.s.n.m.



Figura 1. Ubicación del laboratorio de Control de Calidad (F.I.Q – U.N.A.)

Fuente: Google EARTH (2018).



Figura 2. Ubicación de la toma de muestra (Planta piloto curtiembre F.I.Q. – U.N.A.)

Fuente: Google EARTH (2018).

3.2. Población

Corresponde a las soluciones de Cr(VI) preparadas en el Laboratorio de Control de Calidad de la Facultad de Ingeniería Química de la UNA – PUNO.

3.3. Muestra

Corresponde a las alícuotas de la solución de Cr(VI) en la adsorción Batch que se realizó en el Laboratorio de Control de Calidad de la Facultad de Ingeniería Química de la UNA – PUNO.

3.4. Método de investigación

La investigación es de tipo experimental a escala de laboratorio, utilizando metodología de superficie de respuesta, concordante con el nivel de investigación aplicativo el cual permite determinar los objetivos planteados del presente estudio.

3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

A continuación, se detallan el método utilizado para la realización del siguiente trabajo.

3.5.1. Descripción de variables analizadas en los objetivos específicos.

Tabla 5

Variables analizadas

Variables	Dimensiones	Indicador
Variable Independiente		
➤ Características físico-química de la biomasa de cáscara de plátano “ <i>Musa acuminata</i> Colla”	D1. Análisis elemental D2. Espectroscopia de infrarrojo	➤ concentraciones porcentuales ➤ número de onda (cm ⁻¹)
➤ Parámetros óptimos en soluciones acuosas para la adsorción de cromo hexavalente	D1. pH. D2. Dosis de biomasa D3. Tiempo de contacto D4. Orden cinético de reacción D5. Constantes de isoterma D6. Constantes de termodinámica	➤ Unidad de pH ➤ g.L ⁻¹ ➤ Minutos ➤ Velocidad de reacción ➤ mg.g ⁻¹ ; L.mg ⁻¹ ; n ➤ kJ.mol ⁻¹ ; kJ.mol ⁻¹ .K ⁻¹

➤ Parámetros en agua residual industrial	D1. Concentración inicial y final de cromo hexavalente de agua residual industrial. D2. Eliminación de cromo hexavalente de agua residual industrial.	➤ ppm (mg.L ⁻¹) ➤ Porcentaje de remoción
Variable Dependiente		
Porcentaje de remoción de cromo hexavalente en soluciones acuosas	Concentración inicial y final de cromo hexavalente	➤ %R
Variable interviniente	Temperatura Tamaño de partícula Velocidad de agitación	➤ °C ➤ μm ➤ rpm

3.5.2. Materiales, equipos, instrumentos, insumos, entre otros.

a) Equipos:

Estufa eléctrica (40 a 250°C)

Balanza analítica Metter Toledo, modelo AB204, precisión 0.00001 g

pH metro Metrohm, modelo 914, precisión 0.1

Juego de tamices U.S. Standard Sieve Series

Agitador magnético

Molino de disco manual

Espectrofotómetro UV-visible Milton Roy Spectronic 21D

b) Materiales:

Mortero de porcelana

Fiola: 1000 mL, 100 mL, 50 mL, 25 mL

Pisceta

Luna de reloj

Espátula

Probeta de 100 mL, 50 mL

Varillas de vidrio

Termómetro

Cronómetro

Pipeta: 10 mL, 5 mL

Pinzas

Desecador

Embudos de vidrio

Matraz Erlenmeyer: 500 mL, 250 mL, 100 mL

Vaso de precipitado: 100 mL, 250 mL, 600 mL

Papel filtro Whatman N° 40

c) Reactivos:

Dicromato de Potasio, $K_2Cr_2O_7$, Merck

Solución de Ácido Nítrico 1M, HNO_3 1M

Solución de Hidróxido de sodio, NaOH 1M, 0.1M

Solución de Ácido Clorhídrico, HCl 1M, 0,1M

Ácido Sulfúrico concentrado, H_2SO_4 Q.P Merck

1,5 Difenicarbazida Q.P.

Acetona Q.P.

Agua destilada, bidestilada

3.5.3. Parte experimental

3.5.3.1. Preparación y acondicionamiento de la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*)

a) Materia prima

La materia prima que se utilizó fue la cáscara de plátano, la cual fue recogida de mercados donde se abastece de frutas. El plátano (*Musa acuminata colla*) proviene del Departamento de Piura, Provincia de Piura, Distrito de Sullana.

b) Preparación de la biomasa de cáscara de plátano (CP)

Se recolectó 4.00 kg de cáscara de plátano, la cual fue limpiada de restos de pulpa, se lavó con agua destilada para eliminar partículas adheridas a la superficie y fue secada directamente al sol para eliminar humedad por 4 días. Posteriormente se llevó a una estufa a $40.00^{\circ}C$ por 20.00 minutos, se trituró y tamizó con tamices de rango de tamaño entre $45.00 \mu m$ y $500.00 \mu m$. Se observa el procedimiento observa en la figura 3.

Para calcular el rendimiento de biomasa (CP) se realizó con la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Peso del producto final}}{\text{Peso del producto inicial}} \times 100 \quad (31)$$

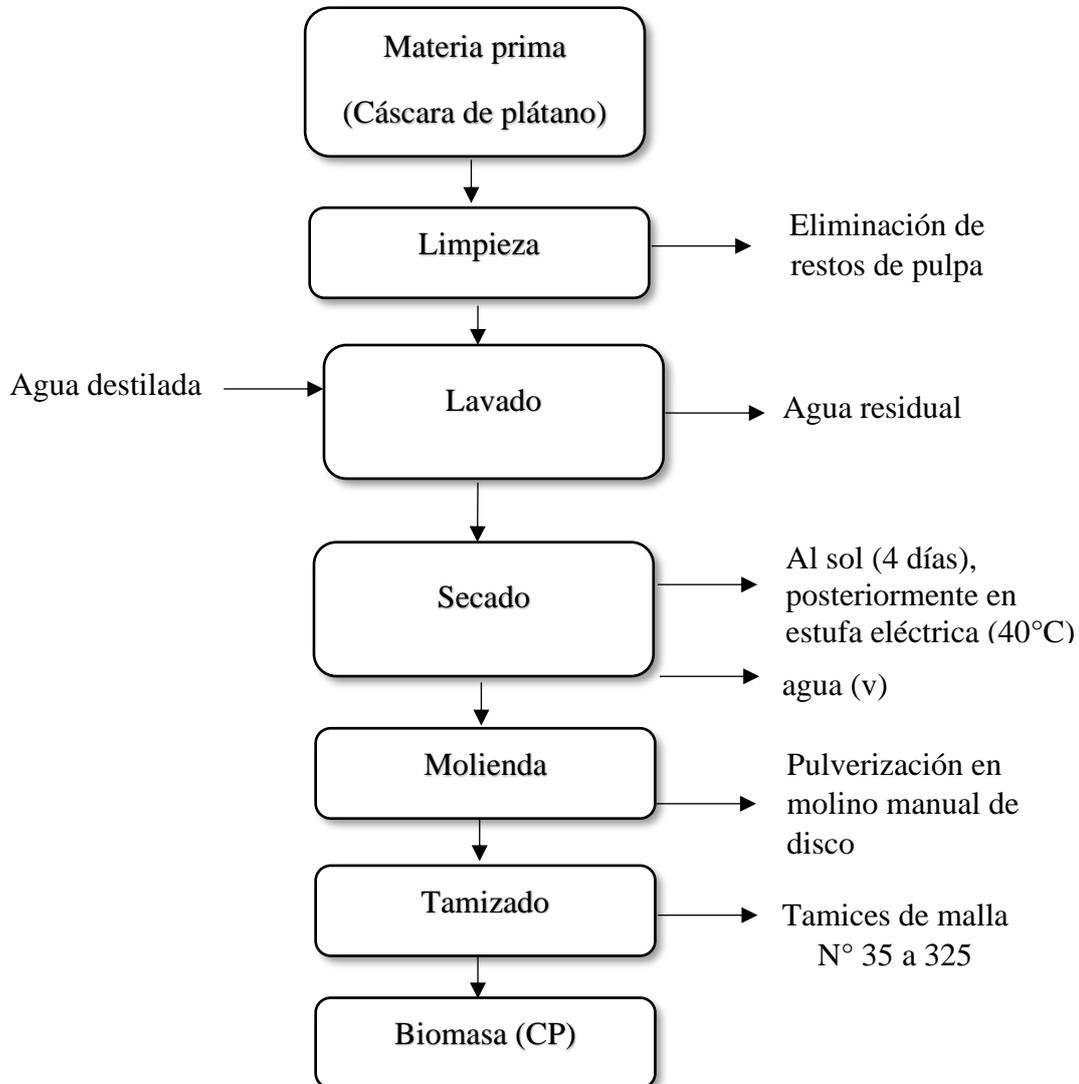


Figura 3. Diagrama de flujo para la preparación de cáscara de plátano (CP)

c) Tratamiento químico de la biomasa (CPA)

Una cantidad de biomasa (CP), el cual se describe su procedimiento en la sección 3.5.3.1. (b) y figura 3; se mezcló con HNO_3 0.10M con una relación de 1/10 (peso/volumen), se dejó en agitación a 200 rpm por 24 horas para establecer contacto completo; seguidamente se lavó con abundante agua destilada hasta pH 5.0. La cáscara de plátano modificada se secó en una estufa

a 150.00°C hasta peso estable (Amel et al., 2012), como se observa en el diagrama de flujo de la figura 4.

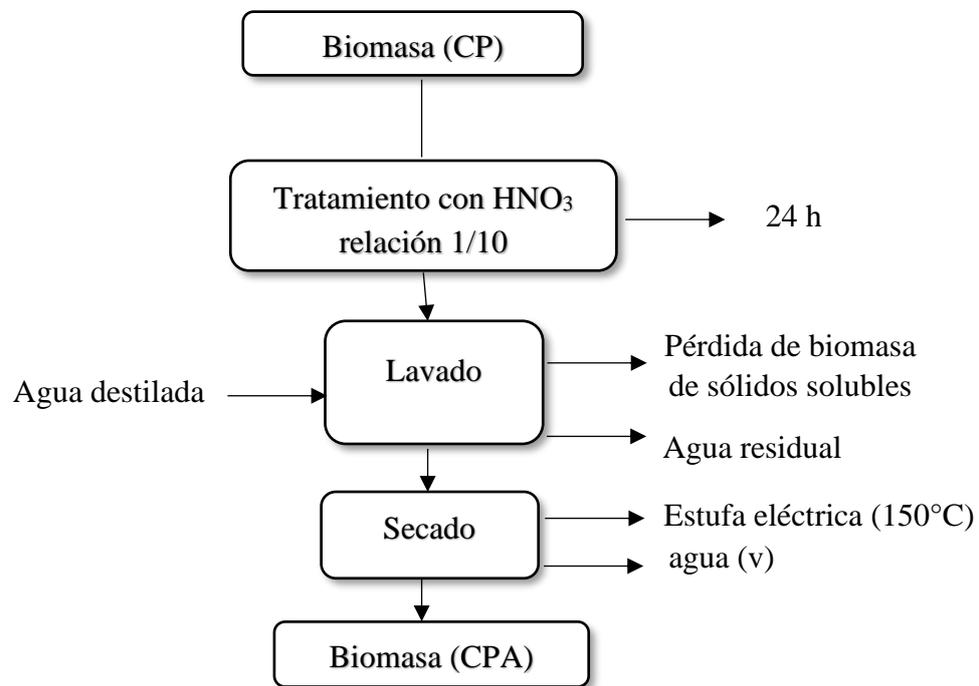


Figura 4. Diagrama de flujo del tratamiento químico de cáscara de plátano (CPA)

3.5.3.2. Caracterización de la biomasa de cáscara de plátano (CP)

a) Humedad

Se procedió de acuerdo a Association of Official Analytical Chemists (AOAC), Método de análisis AOAC 925.10 (Laboratorio de Control de Calidad FIQ-UNA-PUNO).

b) Ceniza

Se procedió de acuerdo a Association of Official Analytical Chemists (AOAC), Método de análisis AOAC 923.03 (Laboratorio de Control de Calidad FIQ-UNA-PUNO).

c) Extracto etéreo (grasa)

Se procedió de acuerdo a Association of Official Analytical Chemists (AOAC), Método de análisis AOAC 920.85 (Laboratorio de Control de Calidad FIQ-UNA-PUNO).

d) Proteína

Se procedió de acuerdo a Association of Official Analytical Chemists (AOAC), Método de análisis AOAC 920.87 (Laboratorio de Control de Calidad FIQ-UNA-PUNO).

e) Fibra

Se procedió de acuerdo a Association of Official Analytical Chemists (AOAC), Método de análisis AOAC 978.10 (Laboratorio de Control de Calidad FIQ-UNA-PUNO).

f) Espectroscopia de rayos infrarrojos

Se determinó los grupos funcionales presentes en la superficie de las exfoliaciones de la biomasa de cáscara de plátano (CP) y (CPA), utilizando el equipo Espectrofotómetro Infrarrojo PERKIN ELMER FRONTIER con el método Espectrofotometría Infrarroja por Transformada de Fourier FTIR –ATR (Reflectancia total atenuada). (Laboratorio LABICER - Universidad Nacional de Ingeniería UNI-LIMA).

3.5.3.3. Preparación de soluciones para el desarrollo experimental

Para el desarrollo de la parte experimental tales como la optimización de variables, las isotermas de adsorción, la cinética de adsorción y termodinámica de adsorción; se requiere del uso de soluciones, la cuales se detalla el procedimiento como sigue:

Preparación de hidróxido de sodio

Para preparar solución de NaOH 1.0M, se diluyó con agua bidestilada la cantidad necesaria en 100.00 mL, se estandarizó con ftalato ácido de potasio. Para la solución NaOH 0.10 M se preparó por dilución.

Preparación de ácido clorhídrico

Para preparar solución de HCl 1.00 M, se realizó desde el ácido clorhídrico concentrado y se diluyó con agua bidestilada hasta concentración deseada en un volumen de 100.00 ml. Se estandarizó con carbonato de sodio. La solución de HCl 0.10 M se obtuvo por dilución.

Preparación de ácido nítrico

Para preparar solución de HNO₃ 1.00 M, se diluyó ácido nítrico concentrado en agua bidestilada en 1000.00 mL, y se preparó por dilución la concentración deseada.

Preparación de la solución patrón de Cromo (VI)

Se disolvió 2.8292 g de Dicromato de Potasio, $K_2Cr_2O_7$, en 1000 mL de agua bidestilada, para obtener una concentración de $1000.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de Cr(VI) del cual se hicieron diluciones para las concentraciones requeridas en el desarrollo experimental de optimización de variables, isoterma, cinética y termodinámica de adsorción del presente trabajo de investigación.

3.5.3.4. Biosorción de Cr (VI)

Los experimentos de biosorción en proceso discontinuo o Batch, para los estudios de optimización de variables, isoterma de adsorción, cinética de adsorción y termodinámica de adsorción; se realizaron como sigue: Se colocaron solución acuosa de Cr (VI) en matraces Erlenmeyer; para ajustar el pH requerido de la solución, se usaron soluciones de NaOH 0.10 M y 1.00 M o HCl 0.10M y 1.00 M; se añade el biosorbente de cáscara de plátano (*musa acuminata colla*) activado (CPA) con tamaño de partícula de $125.00 \mu\text{m}$ agitando a 200 rpm a temperatura ambiente ($14.00\text{-}18.00^\circ\text{C}$) por el tiempo determinado para cada experimento. Se deja sedimentar, se filtra con papel Whatman N°40 y de la parte líquida se determina la absorbancia por espectrometría UV-V a longitud de onda de 540 nm, por el método de difenilcarbazida (Anexo 9); finalmente se calcula la concentración final de Cr (VI) usando la curva de calibración estándar (Anexo 10).

Para calcular los porcentajes de remoción de Cr(VI) (%) (Najafpour et al., 2019) y la cantidad de adsorción en el equilibrio q_e ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) (Amel et al., 2012), se usaron las siguientes ecuaciones:

$$\% \text{ Remoción} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (32)$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (33)$$

Donde C_0 y C_e ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) son la concentración de Cr (VI) en el inicio y equilibrio de la fase líquida respectivamente, V (L) es el volumen de la solución y m (g) es la masa de adsorbente seco utilizado (CPA).

3.5.3.5. Diseño experimental usando Diseño Central Compuesto (CCD)

En el presente trabajo de investigación, se aplicó el diseño central compuesto (CCD) y la metodología de superficie de respuesta (SRM) para diseñar los experimentos y optimizar el proceso de biosorción de cromo (VI) utilizando biomasa de cáscara de plátano. Este método permite reducir el número de ensayos experimentales para evaluar las interacciones de los parámetros (Machrouhi et al., 2019).

Este método (CCD) consiste de 2^n tratamientos factoriales, $2n$ tratamiento axial y n_c puntos centrales (mSalman, 2014). El número total de experimentos se obtiene usando la siguiente ecuación (Machrouhi et al., 2019):

$$N = 2^n + 2n + n_c \quad (34)$$

Donde:

- N : número total de experimentos
- 2^n : número de tratamientos básicos de la parte factorial
- $2n$: Tratamientos de la parte axial o estrella
- n_c : número de puntos centrales (seis réplicas)
- n : número de variables independientes o factores

En esta investigación se trabajó con tres factores (n); ocho puntos factoriales, seis puntos axiales y seis réplicas en el centro lo cual da un total de 20 experimentos.

De la ec. (34)

$$N = 2^n + 2n + n_c$$
$$N = 2^3 + 2(3) + 6 = 8 + 6 + 6 = 20$$

Los ocho puntos factoriales representan a las variables independientes codificadas en sus niveles alto y bajo (+1 y -1) (Machrouhi et al., 2019); los seis puntos axiales se ubican en $(\pm\alpha, 0, 0)$, $(0, \pm\alpha, 0)$, $(0, 0, \pm\alpha)$ (Ahalya et al., 2003), (Ahmad & Alrozi, 2010); las seis réplicas de los puntos centrales en $(0, 0, 0)$ para examinar el error experimental y la reproductibilidad de los datos (Machrouhi et al., 2019), como se ve en la tabla 6. Donde α es la distancia del punto axial desde el centro lo que hace que el diseño sea rotatable y su valor es de 1.682 (Ahmad & Alrozi, 2010), (Machrouhi et al., 2019). Este valor de

rotabilidad α , depende del número de parámetros en el experimento; se obtiene de la siguiente ecuación (Machrouhi et al., 2019):

$$\alpha = (2^n)^{1/4} \quad (35)$$

Donde:

α : factor de rotabilidad (distancia del punto axial desde el centro)

2^n : número de tratamientos de la parte factorial

Resolviendo en la ec. (35):

$$\alpha = (2^n)^{1/4} = (2^3)^{1/4} = 1.682$$

Tabla 6

Matriz de diseño experimental para tres factores

Tratamientos	N	x_1	x_2	x_3
Puntos factoriales	1	-1	-1	-1
	2	+1	-1	-1
	3	-1	+1	-1
	4	+1	+1	-1
	5	-1	-1	+1
	6	+1	-1	+1
	7	-1	+1	+1
	8	+1	+1	+1
Puntos estrella o axial	9	$-\alpha$	0	0
	10	$+\alpha$	0	0
	11	0	$-\alpha$	0
	12	0	$+\alpha$	0
	13	0	0	$-\alpha$
	14	0	0	$+\alpha$
Punto central	15	0	0	0
	16	0	0	0
	17	0	0	0
	18	0	0	0
	19	0	0	0
	20	0	0	0

Fuente: Ahmad & Alrozi (2010), Machrouhi et al. (2019).

En este estudio se utilizó tres variables independientes o factores: pH (X_1), dosis de biomasa (X_2) y tiempo de contacto (X_3). Los rangos de las tres variables fueron seleccionados basados en la literatura y estudios preliminares; cada variable fue dividida en cinco niveles: ($-\alpha$), -1, 0, +1 y ($+\alpha$); los cuales se muestran en la tabla 7.

Para relacionar los valores codificados y los valores actuales o reales, se usó la siguiente ecuación (Mukherjee et al., 2020):

$$x_i = \frac{X_i - \bar{X}_i}{(X_{ai} - X_{bi})/2} \quad i = 1,2,3,\dots k \quad (36)$$

Donde x_i es el valor codificado de las variables independientes, X_i es el valor real de las variables independientes, \bar{X} es el valor real promedio de los valores alto y bajo o el punto central en unidades reales; X_{ai} y X_{bi} son los valores reales alto y bajo de las variables independientes.

$$x_1 = \frac{X_1 - 3.50}{[4.50 - 2.50]/2} = \frac{X_1 - 3.50}{1.00} \quad (37)$$

$$x_2 = \frac{X_2 - 0.70}{[1.00 - 0.40]/2} = \frac{X_2 - 0.70}{2.00} \quad (38)$$

$$x_3 = \frac{X_3 - 40.00}{[60.00 - 20.00]/2} = \frac{X_3 - 40.00}{20.00} \quad (39)$$

Tabla 7

Variables experimentales y niveles en el Diseño Central Compuesto (CCD)

Factores	Niveles				
	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
X ₁ : pH	1.80	2.50	3.50	4.50	5.20
X ₂ : Dosis de biomasa (g/L)	0.20	0.40	0.70	1.00	1.20
X ₃ : Tiempo de contacto (min)	6.36	20.00	40.00	60.00	73.64

Se muestra los valores descodificados de la matriz del diseño experimental CCD en la tabla 8, para los 20 experimentos.

Tabla 8

Matriz del diseño experimental (CCD) (valores descodificados)

Tratamientos	N	X ₁	X ₂	X ₃	Y (%)
Puntos factoriales	1	2.50	0.40	20.00	
	2	4.50	0.40	20.00	
	3	2.50	1.00	20.00	
	4	4.50	1.00	20.00	
	5	2.50	0.40	60.00	
	6	4.50	0.40	60.00	
	7	2.50	1.00	60.00	
	8	4.50	1.00	60.00	
Puntos estrella o axial	9	1.82	0.70	40.00	
	10	5.18	0.70	40.00	
	11	3.50	0.20	40.00	
	12	3.50	1.20	40.00	
	13	3.50	0.70	6.36	
	14	3.50	0.70	73.64	
Punto central	15	3.50	0.70	40.00	
	16	3.50	0.70	40.00	
	17	3.50	0.70	40.00	
	18	3.50	0.70	40.00	
	19	3.50	0.70	40.00	
	20	3.50	0.70	40.00	

La siguiente ecuación, representa un modelo de respuesta (Kataria & Garg, 2018):

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j + e \quad (40)$$

Donde:

Y : Es la variable de respuesta

β_0 : Es una constante

β_i : Es la pendiente o el efecto lineal del factor de entrada

β_{ii} : Es el efecto cuadrático

β_{ij} : Es el efecto de interacción

X_i y X_j : Son los valores codificados de las variables independientes

k : Es el número de variables independientes

e : Es un término de error aleatorio

La ecuación (40), para tres variables independientes queda desarrollada de la siguiente manera:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + e \quad (41)$$

Procedimiento para la optimización de variables del diseño experimental

En la optimización de variables de pH, dosis de biomasa y tiempo de contacto, se utilizó para los 20 experimentos del diseño experimental una concentración inicial de 5.00 mg.L⁻¹ de Cr (VI), los que se observan en la tabla 8 y se usó la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activado (CPA); su procedimiento se describe en la sección 3.5.3.1. (c) y la figura 4. Se colocaron en frascos 600.00 mL de solución de Cr (VI) con agitación de 200 rpm, se ajustaron el pH de la solución con soluciones de HCl o NaOH 0.10 M y 1.00 M, se añadió la dosis de biomasa (CPA) y se mantuvo en agitación por el tiempo de contacto de acuerdo al diseño experimental que se muestra en la tabla 8. Se deja que sedimente un poco y se filtra; de la parte líquida se mide la concentración del Cr (VI), el cual se llevó a Laboratorios Analíticos del Sur para su análisis.

Para determinar las condiciones óptimas del proceso y el análisis de varianza (ANOVA) se utilizó el software STATGRAPHICS CENTURION XVI, la calidad de ajuste del modelo cuadrático se expresa mediante el coeficiente (valor R²), la significancia de cada término se indica por el valor-p (Najafpour et al., 2019).

Experimentos de adsorción de Cr (VI)

Los experimentos se llevaron a cabo usando la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activado (CPA) su procedimiento se describe en la sección 3.5.3.1. (c) y la figura 4, con dosis de biomasa de 1.20 g.L⁻¹. Los experimentos se realizaron como sigue:

3.5.3.6. Cinética de adsorción

Para determinar el orden de la cinética de adsorción de cromo (VI), se procede de la siguiente manera: En un matraz Erlenmeyer se mide 500.00 mL de solución de Cr (VI) de concentración de 5.00 mg.L⁻¹, se agita a 200 rpm, se ajusta a pH 2.00 con soluciones de HCl o NaOH 0.10 M; se añade 0.60 g de biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activado (CPA) a temperatura

ambiente de 16.60 °C y en tiempos variados (5.00- 60.00 min), con una alícuota de 5.00 mL se determina la concentración de Cr (VI) en cada variación de tiempo, tal como se ve en la tabla 26 y figura 15.

Para determinar el mejor ajuste de los modelos cinéticos de adsorción, se procede de la siguiente forma: Para el modelo de pseudo primer orden, se utiliza el paquete estadístico XLSTAT versión 2020.3.1 por regresión lineal (método de Gauss - Newton) y para el modelo de pseudo segundo orden se grafica $\frac{t}{q_t}$ versus el tiempo (t) en minutos, el cual se realiza utilizando las funciones estadísticas de Microsoft Excel versión 2013. Se selecciona como modelo de mejor ajuste, aquel resultado de coeficiente (R^2), más próximo a la unidad.

En la tabla 9 se muestran las ecuaciones de los dos modelos cinéticos de pseudo primer orden y pseudo segundo orden que se usaron para encontrar el mejor ajuste.

Tabla 9

Modelos cinéticos de Pseudo primer orden y Pseudo segundo orden

Modelo cinético	Ecuación
Pseudo primer orden	$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t})$
Pseudo segundo orden	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$

Fuente: Lagergren (1898), Ho & McKay (2000)

Donde:

q_t : Capacidad de adsorción en el tiempo t (mg.g⁻¹).

q_e : Capacidad de adsorción en el equilibrio (mg.g⁻¹).

t : Tiempo (min).

k_1 : Constante de velocidad de pseudo primer orden (l.min⁻¹).

k_2 : Constante de velocidad de pseudo segundo orden (g.mg⁻¹.min⁻¹).

3.5.3.7. Isotermas de adsorción

En matraces Erlenmeyer se colocan 50.00 mL de solución de Cr (VI) de diferentes concentraciones (10.00 – 50.00 mg.L⁻¹), se ajusta el pH a 2.00 con soluciones de HCl o NaOH 0.10 M a 200 rpm, se agrega 0.06 g de biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activado (CPA) y se mantiene la agitación por 30.00 minutos a temperatura ambiente de 16.00 °C. Pasado el tiempo de 30.00 minutos se filtra y de la parte líquida se mide la concentración de Cr (VI).

Determinación del mejor ajuste de los modelos de las isotermas de adsorción

Para determinar el modelo de mejor ajuste de las isotermas de adsorción, se procede de la siguiente forma: Se utiliza las ecuaciones linealizadas y se grafica C_e/q_e (g.L⁻¹) versus C_e (mg.L⁻¹) del modelo de Langmuir y $\log q_e$ versus $\log C_e$ para el modelo de Freundlich. Se selecciona como modelo de mejor ajuste, aquel resultado de coeficiente (R^2), más próximo a la unidad; los cuales han sido determinados usando funciones estadísticas de Microsoft Excel, versión 2013.

En la tabla 10, se muestra las ecuaciones linealizadas de los modelos de las isotermas de adsorción de Langmuir y Freundlich.

Tabla 10

Isotermas de Langmuir y Freundlich

Isoterma	Ecuación	Ecuación linealizada
Langmuir	$q_e = \frac{bC_e q_{max}}{1 + bC_e}$	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max}b} + \frac{C_e}{q_{max}}$
Freundlich	$q_e = K_f C_e^{1/n}$	$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e$

Fuente: Amel et al. (2012); Mahindrakar & Rathod (2018).

Donde:

q_e : Cantidad de ion metálico adsorbido por unidad de masa de sorbente (mg.g⁻¹).

q_{max} : Cantidad máxima adsorbida por unidad de masa de sorbente para formar una monocapa completa en la superficie unida a un alto C_e , (mg.g^{-1}).

C_e : Es la concentración de equilibrio (final) del soluto en la solución (mg.L^{-1}).

b : Es una constante relacionada con la afinidad de los sitios de unión (L.mg^{-1}).

K_f : Es la constante de Freundlich.

n : Es el factor de heterogeneidad del biosorbente.

3.5.3.8. Termodinámica de la adsorción

En un matraz Erlenmeyer con 100.00 mL de solución de Cr (VI) de concentración 5.00 mg.L^{-1} , con agitación de 200 rpm, se ajusta el pH a 2.00 con soluciones de HCl o NaOH 0.10 M, se adiciona 0.12 g de dosis de biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activado (CPA), y se realiza una variación en la temperatura ($20.00 - 60.00$) °C, tal como se muestra en la tabla 29.

Se determina el Cr (VI) y se calculan los parámetros de la termodinámica, tales como los cambios en la entalpía estándar (ΔH°), entropía estándar (ΔS°) y energía libre de Gibbs estándar (ΔG°) con las ecuaciones (42) – (44) (Akram et al., 2017):

$$K_C = \frac{C_a}{C_e} \quad (42)$$

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_C \quad (43)$$

$$\ln K_C = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (44)$$

Donde:

K_C : Es la constante de equilibrio

C_a : Es la concentración en la fase sólida en el equilibrio (mg.L^{-1})

C_e : Es la concentración en el equilibrio en la solución (mg.L^{-1})

R : Constante universal de los gases ($8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\text{K}^{-1}$)

T : Es la temperatura en Kelvin (K)

Se obtiene (ΔH°) y (ΔS°) de la pendiente y el intercepto de la gráfica $\ln K_c$ y $1/T$, el cual se realiza utilizando las funciones estadísticas de Microsoft Excel versión 2013.

3.5.3.9. Biosorción de Cr (VI) en agua residual industrial

En la biosorción de Cr (VI) del agua residual de la Curtiembre de la FIQ – UNA, se determina la concentración de Cr (VI) inicial (sin tratamiento) y final (con tratamiento), como se detalla a continuación:

- Se filtra el agua residual y se analiza la concentración de Cr (VI) (sin tratamiento) presente en ella, (concentración inicial).
- En un matraz Erlenmeyer se coloca 100.00 mL de agua residual previamente filtrado con agitación de 200 rpm, se ajusta a pH 2.00 con soluciones de HCl o NaOH 0.10 M, se adiciona $1.20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ de dosis de biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activado (CPA), con un tiempo de contacto de 60.00 minutos a temperatura ambiente de $15.00 \text{ }^\circ\text{C}$, se filtra y se calcula la concentración de Cr (VI) (concentración final).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se dan a conocer los resultados obtenidos de la metodología descrita en el capítulo III. Las pruebas experimentales de caracterización han sido realizadas en el Laboratorio de Control de Calidad de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Altiplano – Puno y en los laboratorios LABICER de la Universidad Nacional de Ingeniería – Lima. Los análisis de concentración final del metal Cr (VI) para el diseño experimental han sido realizados en el Laboratorio Analítico del Sur E.I.R.L. – Arequipa. Todos los experimentos que se realizaron se desarrollaron a condiciones ambientales: presión de 487 mmHg, temperatura entre 10.00 a 20.00°C y altitud de 3832 m.s.n.m.

4.1. Caracterización de la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*)

a) Rendimiento en el secado

En la preparación de la biomasa, el cual se muestra el procedimiento en la sección 3.5.3.1 (b) y figura 3, se recolectaron 4.000 Kg de cáscara de plátano, el cual se redujo hasta 600.00 g en el secado, lo que equivale al 15.00 % del peso total. Para realizar el cálculo se utilizó la ecuación (22); los resultados del rendimiento se aprecian en la tabla 11 y en la figura 5 se muestra el balance de materia para la preparación de la biomasa de cáscara de plátano (CP).

Tabla 11

Rendimiento en el secado de la biomasa de cáscara de plátano (CP)

Biomasa	Peso inicial	Peso final	Rendimiento
Cáscara de plátano (CP)	4000.00 g	600.00 g	15.00%

Este resultado de rendimiento del 15.00% con una muestra inicial de 4.000 kg, es comparable con el rendimiento de 15% de harina de cáscara de plátano de una muestra inicial de 5 Kg de cáscara de plátano maduro obtenida por (Castro, 2015).

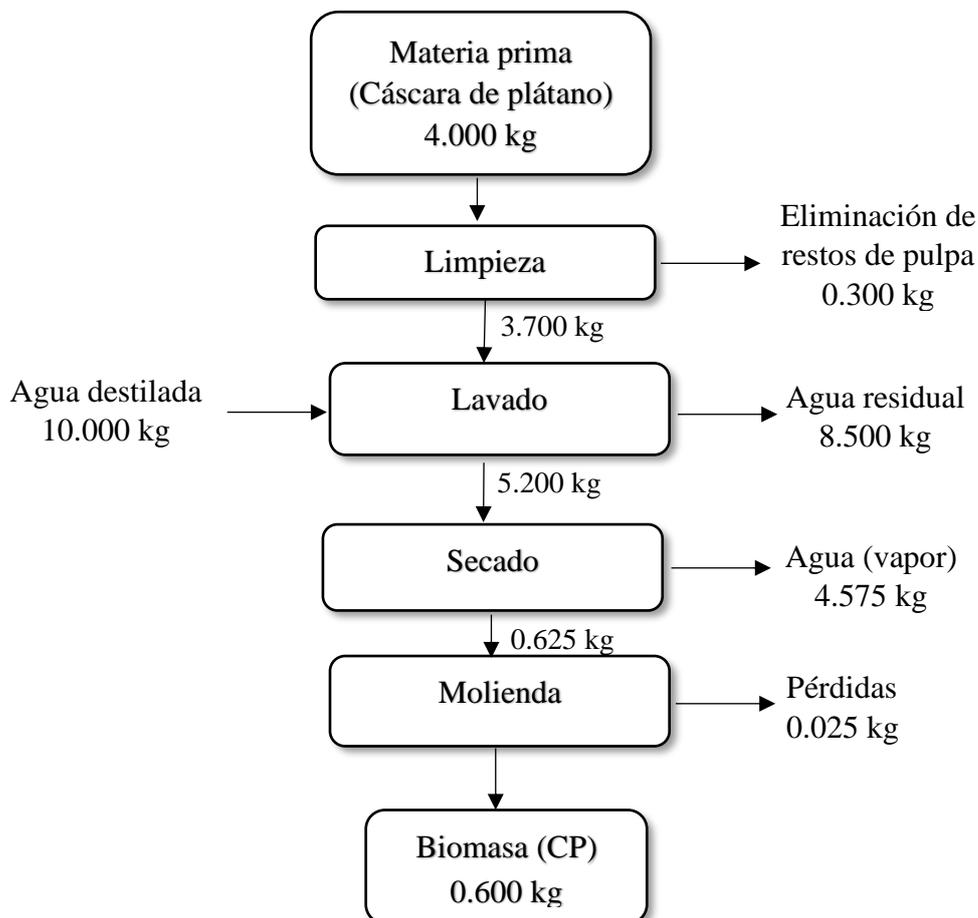


Figura 5. Balance de materia en la preparación de cáscara de plátano (CP)

b) Granulometría

La biomasa (CP) pulverizada se separó por tamaño de partícula con un peso inicial de 600.00 g como se observa en la tabla 12 las masas retenidas en los diferentes números de malla, siendo el de mayor rendimiento el de número de malla 35 con 29.30%.

Tabla 12

Granulometría de la biomasa de cáscara de plátano (CP)

N° de malla	Tamaño de partícula (µm)	Masa retenida (g)	Rendimiento (%)
35	500.00	175.76	29.30
60	250.00	139.60	23.30
120	125.00	157.59	26.30
230	63.00	107.88	18.00
325	45.00	13.78	2.300
	Base	5.39	0.800
	Total	600.00	100.00

Espinosa and Mera (2015) seleccionaron tamaño de partícula retenido en el tamiz de 75 µm obteniendo porcentajes de remoción de 99.94% de cromo (VI) en 60 min con cáscara de plátano verde. Para la presente investigación se seleccionó tamaño de partícula 125.00 µm.

c) Características fisicoquímicas

Se muestra en la tabla 13 los resultados de las características fisicoquímicas de la cáscara de plátano *Musa acuminata colla* (CP).

Tabla 13

Características fisicoquímicas de la cáscara de plátano (CP)

Cáscara de plátano	Porcentaje (%)
Humedad	9.00
Ceniza	13.48
Grasa	2.96
Carbohidratos	54.73
Proteína	7.88
Fibra	11.95

Fuente: Laboratorio de control de calidad (FIQ- UNA- PUNO)

(Ver Anexo 5)

Estos resultados son similares a los resultados de la composición de la cáscara de plátano reportada por (Memon et al., 2008): Humedad 9.64%; grasa 5.02%; fibra cruda 11.04%; proteína cruda 10.14% y ceniza 18.98%. Asimismo, son similares a los resultados reportados por (Ayala et al., 2003): Humedad 7.24%; grasa 6.00%;

proteína 7.88%; fibra cruda 8.58% y cenizas 11.30% para la cáscara de plátano maduro.

d) Rendimiento de la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activado (CPA)

En el tratamiento químico de la biomasa de plátano (CP) para la obtención de la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activado (CPA) cuyo procedimiento se detalla en la sección 3.5.3.1. (c) y figura 4, se utilizó el retenido en la malla 125.00 μm . De 0.100 kg de biomasa de cáscara de plátano (CP), se obtuvo un rendimiento de 64.00 % como se observa en la tabla 14.

Tabla 14

Rendimiento de la biomasa de cáscara de plátano (CPA)

Biomasa	Peso inicial	Peso final	Rendimiento
Cáscara de plátano (CPA)	100.00g	64.00 g	64.00%

En la figura 6 se muestra el balance de materia en el tratamiento químico de la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) (CP) con ácido nítrico HNO_3 0.10 M para la obtención de la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activado (CPA).

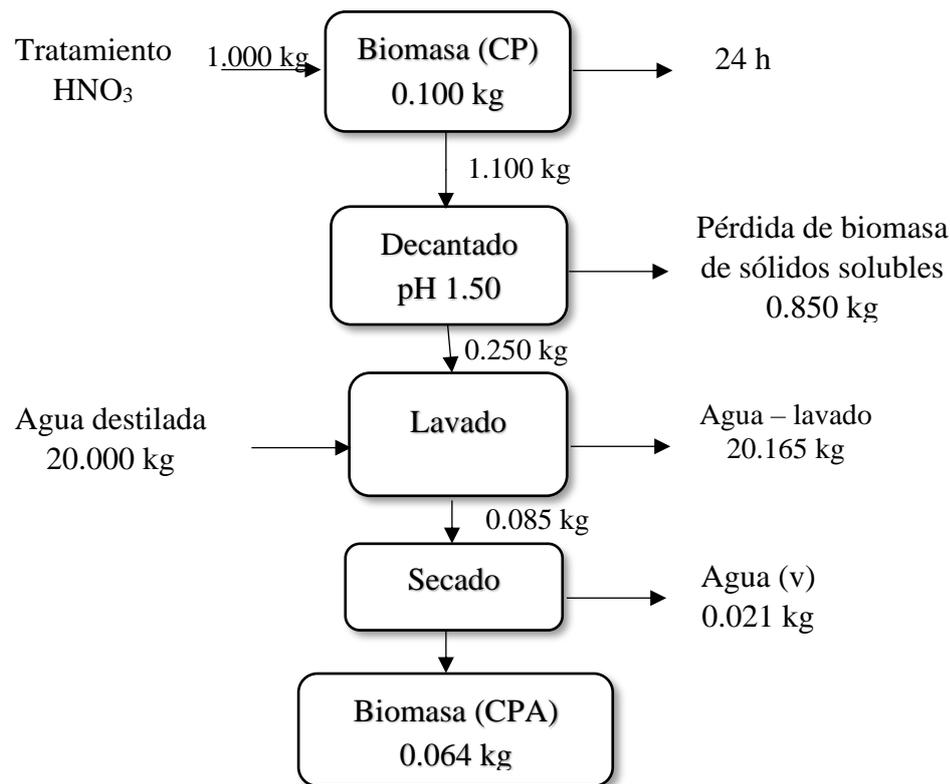


Figura 6. Balance de materia en el tratamiento químico de cáscara de plátano (CPA)

e) **Espectroscopía de rayos infrarrojos en la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) (CP)**

Los espectros FTIR se usaron para determinar los cambios de frecuencia de vibración en los grupos funcionales del biosorbente CP (fig. 7). El pico de 3278.02 cm^{-1} muestra que pueden estar relacionado con O-H (Labicer), (Dufour, 2009), este estiramiento indica la presencia de grupos hidroxilo y amino (González et al., 2012), la vibración de estiramiento O-H puede ser debido a enlaces de hidrógeno inter e intramoleculares de alcoholes, fenoles y ácidos carboxílicos (Huang et al., 2013); el pico 2918.17 cm^{-1} representa el estiramiento C-H (Labicer, 2019), (Dufour, 2009); el pico 1736.50 cm^{-1} por la vibración C=O (Labicer, 2019). El pico 1586.94 cm^{-1} corresponde a la vibración C=C y N-H (Labicer, 2019), el estiramiento C=C se puede atribuir a la presencia de anillos aromáticos o de benceno de la lignina (Amel et al., 2012); el pico 1237.20 cm^{-1} se debe a la vibración CH₃ (Labicer, 2019);

el pico 1374.55 cm^{-1} corresponde a la vibración C-H (Labicer, 2019) y finalmente el pico 1027.58 cm^{-1} se debe a las vibraciones de =C-H y C-O. (Labicer, 2019).

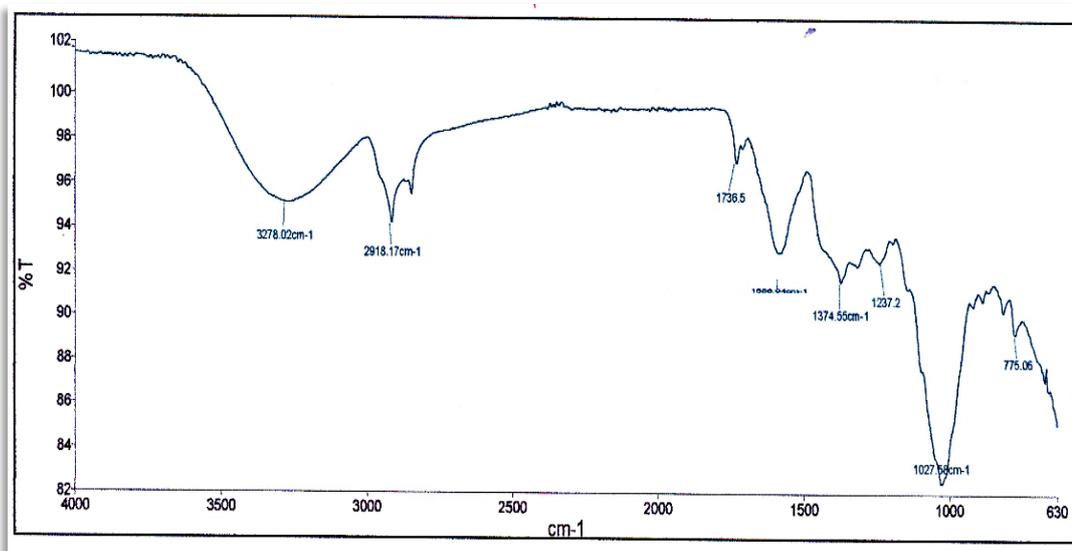


Figura 7. Espectro Infrarrojo de la biomasa de cáscara de plátano (CP)

Fuente: Laboratorio LABICER - Facultad de Ciencias UNI – LIMA (Anexo 6).

f) Espectroscopía de rayos infrarrojos en la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activado (CPA)

Los espectros FTIR se usaron para determinar los cambios de frecuencia de vibración en los grupos funcionales del biosorbente CPA (fig. 8). El pico de 3277.55 cm^{-1} muestra que puede estar relacionado con O-H (Labicer, 2019), (Dufour, 2009), este estiramiento indica la presencia de grupos hidroxilo y amino (González et al., 2012), la vibración de estiramiento O-H puede ser debido a enlaces de hidrógeno inter e intramoleculares de alcoholes, fenoles y ácidos carboxílicos (Huang et al., 2013). El pico de 2916.65 cm^{-1} representa el estiramiento C-H (Labicer, 2019), (Dufour, 2009); el pico 1729.70 cm^{-1} por la vibración C=O (Labicer, 2019), El pico 1625.10 cm^{-1} corresponde a la vibración C=C y N-H (Labicer, 2019). El estiramiento C=C se puede atribuir a la presencia de anillos aromáticos o de benceno de la lignina (Amel et al., 2012); el pico 1439.60 cm^{-1} se deben a la vibración C-H (Labicer, 2019) se puede atribuir a grupos alifáticos y aromáticos (Amel et al., 2012) y finalmente, el pico 1029.51 cm^{-1} corresponde a la vibración =C-H y C-O. (Labicer, 2019), los picos entre $900.00 - 1300.00\text{ cm}^{-1}$ son

por la vibración de estiramiento de C-O de fenoles, éteres, ésteres o alcoholes (Amel et al., 2012).

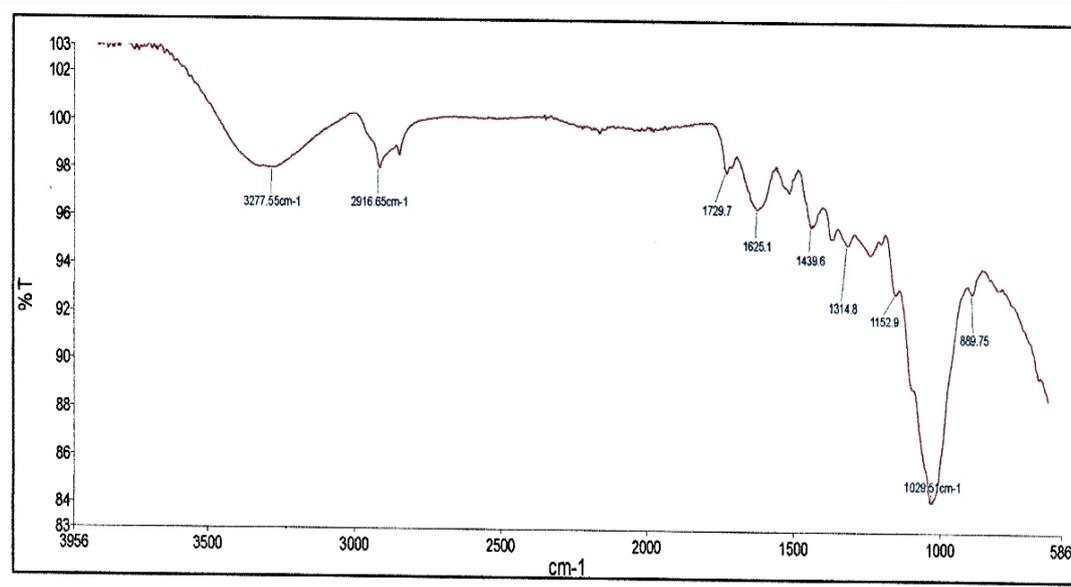


Figura 8. Espectro Infrarrojo de la cáscara de plátano con tratamiento químico (CPA)

Fuente: Laboratorio LABICER - Facultad de Ciencias UNI – LIMA (Anexo 7).

Por lo tanto, de las Fig. 7 y 8, de la biomasa de cáscara de plátano *Musa acuminata colla* CP y CPA se evidencia la presencia de celulosa y lignina con la presencia de los grupos carboxilo e hidroxilo.

4.2. Diseño experimental

Los resultados del diseño experimental se muestran como sigue:

4.2.1. Experimentos de Diseño Central Compuesto (CCD) y resultados ANOVA

Se realizaron experimentos de CCD, para optimizar las variables de pH, dosis de biomasa (g.L^{-1}) y tiempo de contacto como también para evaluar los efectos significativos de los parámetros en la eliminación de iones de cromo (VI) mediante la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activada (CPA). Para una concentración inicial de Cr (VI) de 5.00 mg.L^{-1} , los resultados de la remoción de Cr (VI) se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15

Resultados del porcentaje de adsorción del diseño experimental CCD

N	X ₁ : pH	X ₂ : Dosis de biomasa (g.L ⁻¹)	X ₃ : Tiempo de contacto (min)	Remoción de Cr (VI) (%)
1	2.50	0.40	20.00	46.60
2	4.50	0.40	20.00	6.20
3	2.50	1.00	20.00	84.12
4	4.50	1.00	20.00	4.80
5	2.50	0.40	60.00	74.06
6	4.50	0.40	60.00	6.20
7	2.50	1.00	60.00	98.40
8	4.50	1.00	60.00	8.80
9	1.82	0.70	40.00	94.94
10	5.18	0.70	40.00	5.80
11	3.50	0.20	40.00	6.20
12	3.50	1.20	40.00	14.00
13	3.50	0.70	6.36	8.60
14	3.50	0.70	73.64	19.00
15	3.50	0.70	40.00	12.60
16	3.50	0.70	40.00	13.00
17	3.50	0.70	40.00	10.00
18	3.50	0.70	40.00	12.40
19	3.50	0.70	40.00	11.70
20	3.50	0.70	40.00	12.30

Estos resultados muestran los altos valores del porcentaje de remoción de Cr (VI), se da a pH ácido (entre 1.82 y 2.5) con un incremento de la dosis de biomasa como se observa en el experimento 7 y 9; con mínima influencia del tiempo de contacto lo que se observa en el experimento 13 y 14. Es decir, la remoción de Cr (VI) está influenciada por las variables de pH y dosis de biomasa.

Un pH bajo hace que la superficie del biomaterial se cargue positivamente a medida que los grupos amino y carboxilo se protonan lo que aumenta la atracción entre el HCrO_4^- y el biosorbente y por lo tanto mejora la velocidad de eliminación de Cr (VI) aniónico en la fase acuosa (Miretzky & Fernandez, 2010); pero a medida que se incrementa el pH de la solución, las cargas en la superficie del biosorbente se vuelven negativas lo que conduce a fuerzas de repulsión entre los iones y el biosorbente y esto inhibe la adsorción presentando como consecuencia un bajo porcentaje de adsorción (Ullah et al., 2013).

Luego de introducir los datos de la tabla 15 en el software STATGRAPHICS CENTURION XVI, se tiene los resultados de los coeficientes de regresión ajustados para la remoción de Cr (VI), los que se ve en la tabla 16.

Tabla 16

Coefficientes de regresión para la remoción de Cr (VI)

Coefficiente	Estimado
constante	235.7180
X_1 : pH	-122.4140
X_2 : Dosis de biomasa	72.5360
X_3 : Tiempo de contacto	0.4070
X_1X_1	16.8930
X_1X_2	-25.2750
X_1X_3	-0.2360
X_2X_2	30.2000
X_2X_3	-0.1910
X_3X_3	0.00970

Fuente: STATGRAPHICS CENTURION XVI (2010)

La ecuación del modelo cuadrático para la remoción del Cr (VI) y sus valores codificados se muestra en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \%R_{Cr(VI)} = & 235.7180 - 122.4140 * \text{pH} + 72.5360 * \text{Dosis} + 0.4070 \\ & * \text{Tiempo} + 16.8930 * \text{pH}^2 - 25.2750 * \text{pH} * \text{Dosis} \\ & - 0.2360 * \text{pH} * \text{Tiempo} + 30.2000 * \text{Dosis}^2 - 0.1910 \\ & * \text{Dosis} * \text{Tiempo} + 0.0097 * \text{Tiempo}^2 \end{aligned} \quad (45)$$

La remoción de Cr (VI) es influenciada por la variable X_1 (pH) y su coeficiente negativo (ec. 45) indica que el incremento en esta variable genera una disminución en el valor de la respuesta (Guterres et al., 2011); este comportamiento se verifica de acuerdo a los experimentos 9 y 10 (tabla 15), el incremento de pH de 1.82 a 5.18 a una dosis de biomasa de 0.70 g.L⁻¹ y 40.00 minutos ocurre una disminución en la remoción de Cr (VI) de 94.94 a 5.80 %; de la misma forma se observa en los experimentos 7 y 8 (tabla 15), el incremento de pH de 2.50 a 4.50 a una dosis de biomasa de 1.00 g.L⁻¹ y 60.00 minutos, ocurre una disminución en la remoción de Cr (VI) de 98.40 a 8.80 %.

La variable X_2 (dosis de biomasa) también influye en la remoción de Cr (VI) y su coeficiente positivo indica que el incremento en esta variable genera un incremento

en el valor de la respuesta; este comportamiento se puede verificar con los experimentos 11 y 12 (tabla 15) cuando se incrementa la dosis de biomasa de 0.20 a 1.20. g.L⁻¹ a pH 3.50 y tiempo de contacto de 40.00 minutos, la remoción de Cr (VI) aumenta de 6.20 a 14.00 %.

Por otro lado, la variable X₃ (tiempo de contacto) tuvo mínima influencia en la remoción de Cr (VI) y lo confirma su bajo valor de coeficiente obtenido de 0.407 (ec. 45); el valor positivo indica que el incremento de esta variable genera un aumento en el valor de la respuesta, este comportamiento se verifica con los experimentos 13 y 14 (tabla 15) cuando se incrementa el tiempo de contacto de 6.36 a 73.64 minutos a pH 3.50 y dosis de biomasa de 0.70; la remoción de Cr (VI) tiene un incremento de 8.60 a 19.00%.

La tabla ANOVA para la superficie de respuesta del modelo cuadrático se muestra en la tabla 17, el cual explica los efectos de interacción y significancia estadística de cada término.

Tabla 17

Análisis de varianza para la remoción de Cr (VI)

Fuente	Suma de cuadrados	G. L.	Cuadrado medio	Razón - F	Valor - P
X ₁ : pH	13358.500	1	13358.500	11717.960	0.0000
X ₂ : Dosis de biomasa	426.771	1	426.771	374.360	0.0000
X ₃ : Tiempo de contacto	292.745	1	292.745	256.790	0.0000
X ₁ X ₁	4101.890	1	4101.890	3598.150	0.0000
X ₁ X ₂	459.954	1	459.954	403.470	0.0000
X ₁ X ₃	178.038	1	178.038	156.170	0.0001
X ₂ X ₂	103.490	1	103.490	90.780	0.0002
X ₂ X ₃	10.534	1	10.534	9.240	0.0288
X ₃ X ₃	221.656	1	221.656	194.430	0.0000
Falta de ajuste	1149.21	5	229.843	201.62	0.0000
Error puro	5.7	5	1.14		
Total	20069.3	19			

Fuente: STATGRAPHICS CENTURION XVI (2010)

R-cuadrada = 94.2454 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.)= 89.0662 por ciento

Error estándar del estudio = 1.0677

Error absoluto medio = 5.4704

De acuerdo a los resultados de la Tabla ANOVA (tabla 17), el pH (X₁) la dosis de biomasa (X₂), tiempo de contacto (X₃), los efectos cuadráticos X₁², X₂², X₃² y las

interrelaciones de X_1X_2 , X_1X_3 , X_2X_3 con valores $P < 0.05$ todos fueron significativos con valores de R^2 0.9424 y R^2 ajustada 0.8907.

4.2.2. Representación gráfica de la superficie de respuesta y curva de contorno para la remoción de Cr (VI)

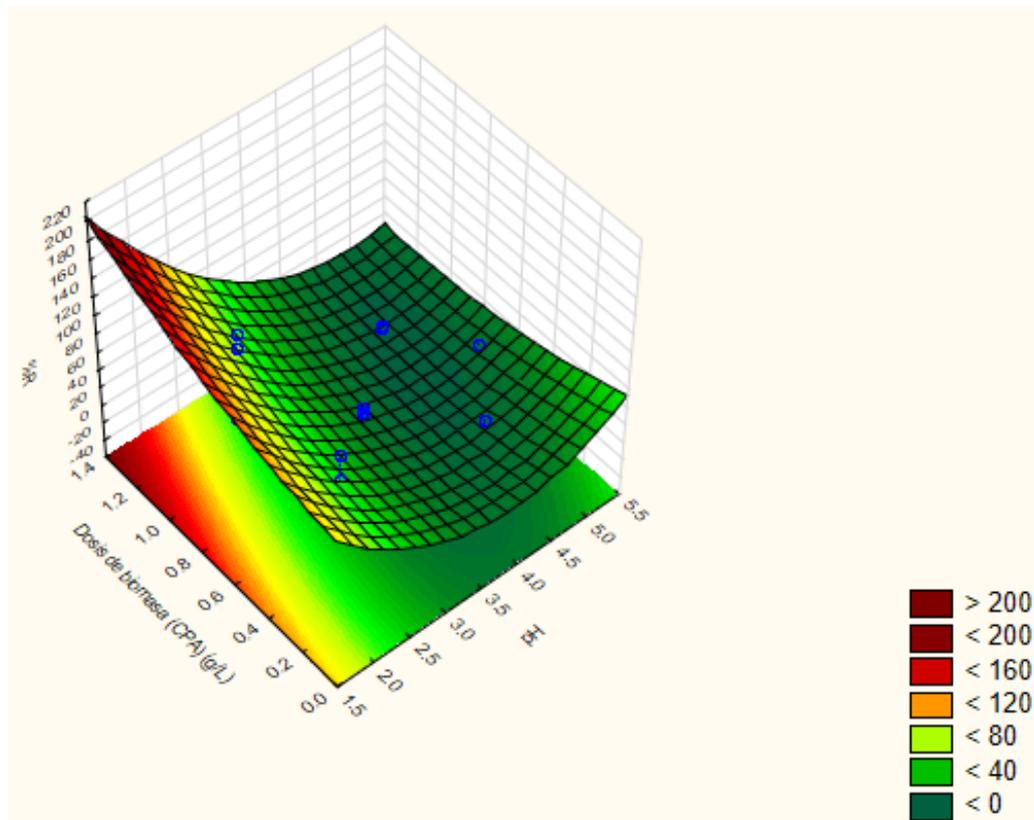


Figura 9. Superficie de respuesta de la remoción de Cr (VI), Dosis de biomasa Vs pH

Fuente: STATISTICA Versión 10

La Fig. 9 de superficie de respuesta de remoción del Cr (VI) en función de la dosis de biomasa (CPA) (g.L^{-1}) y pH, muestra una región donde la remoción de Cr (VI) es efectiva, a valores de pH cercanas a 2.00 y dosis de biomasa mayores a 1.20 g.L^{-1} . Por lo tanto, de acuerdo a la representación gráfica, la remoción de Cr (VI) aumenta a medida que aumenta la dosis de biomasa y a medida que disminuye el pH.

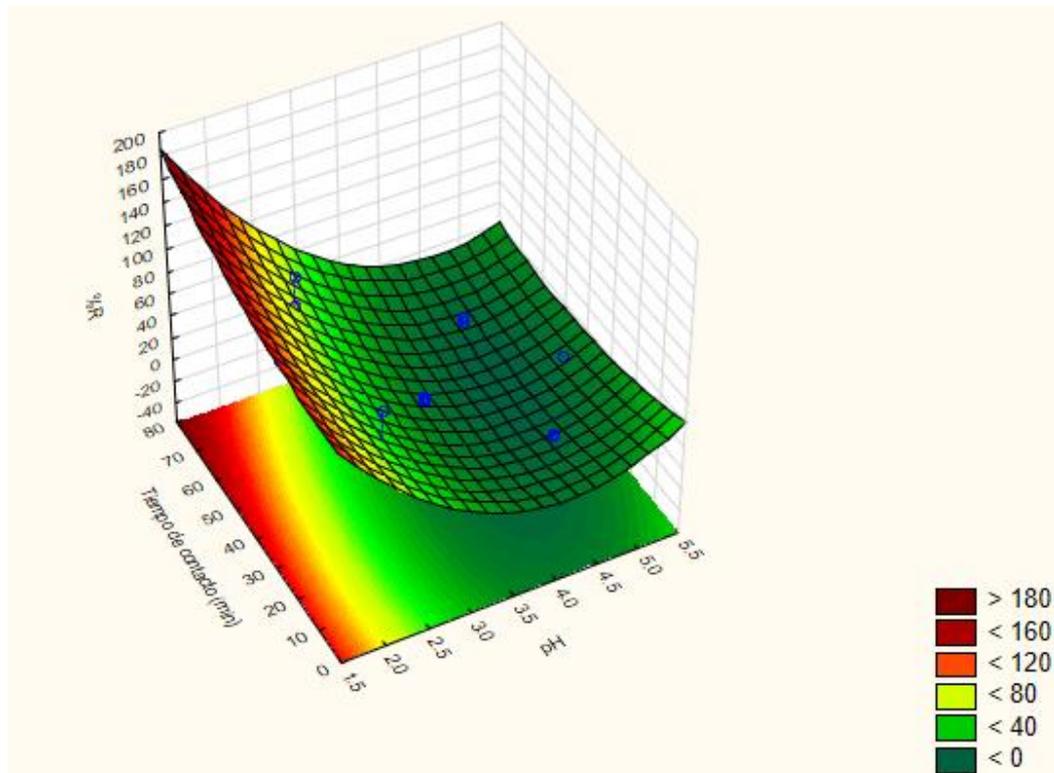


Figura 10. Superficie de respuesta de la remoción de Cr (VI), Tiempo de contacto Vs pH

Fuente: STATISTICA Versión 10

Asimismo, la Fig. 10 de superficie de respuesta de remoción del Cr (VI) en función del tiempo de contacto (min) y pH, muestra una región donde la remoción de Cr (VI) es efectiva, a valores de pH cercanas a 2.00 y tiempo de contacto desde 0 min a mayores de 60 min; este intervalo de tiempo de contacto indica que una vez que la solución con contenido de Cr(VI) entra en contacto con la biomasa, ocurre la remoción de Cr (VI) y esta remoción va aumentando a medida que transcurre el tiempo. Por lo tanto, de acuerdo a la representación gráfica, la remoción de Cr (VI) aumenta a medida que aumenta el tiempo de contacto a pH menores a 2.00.

Estos resultados se pueden observar mejor en curvaturas de contorno como se muestra a continuación:

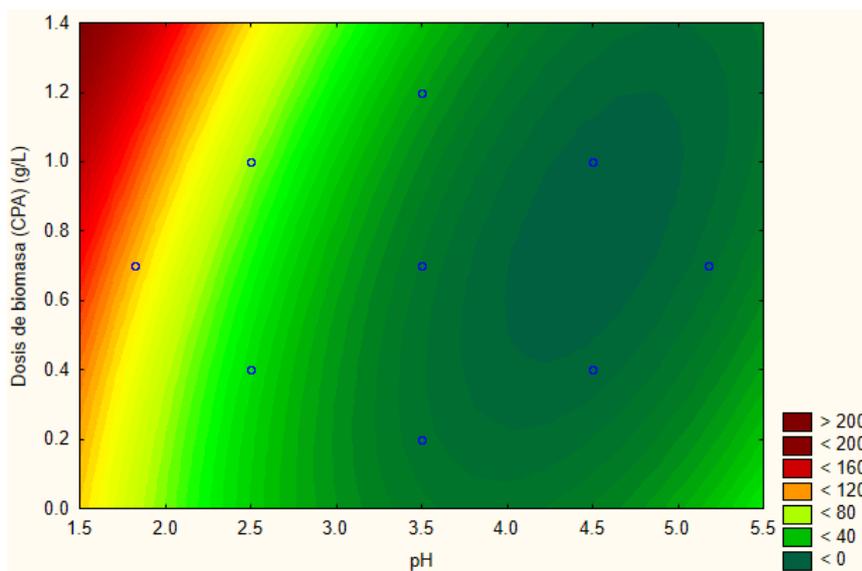


Figura 11. Curva de contorno para la remoción del Cr (VI), Dosis de biomasa vs pH

Fuente: STATISTICA Versión 10

La Fig. 11 de curvatura de contorno en función de la dosis de biomasa (CPA) (g.L^{-1}) y pH, muestra una región donde la remoción de Cr (VI) es efectiva; se observa en el gráfico a valores de pH cercanas a 2.00 y dosis de biomasa mayores a 1.20 g.L^{-1} .

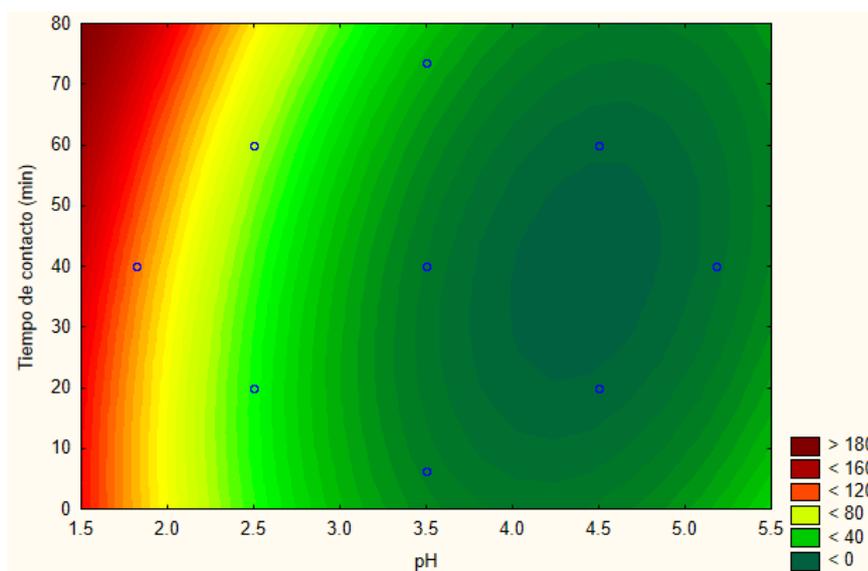


Figura 12. Curva de contorno para la remoción del Cr (VI), Tiempo de contacto vs pH

Fuente: STATISTICA Versión 10

La Fig. 12 de curvatura de contorno en función del tiempo de contacto (min) y pH, muestra una región donde la remoción de Cr (VI) es efectiva; se observa en el gráfico a valores de pH cercanos a 2.00 y tiempo de contacto de 0 a mayores de 60 min.

4.2.3. Optimización de variables

Otro resultado de la aplicación del software STATGRAPHICS CENTURION XVI con los datos de la tabla 15, es la optimización de variables del pH, dosis de biomasa (g.L^{-1}) y tiempo de contacto (min), como se muestra en la tabla 18.

Tabla 18

Optimización de variables

Optimizar respuesta			
Meta: maximizar Remoción de Cr (VI)			
Valor óptimo = 172.451			
<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
pH	1.82	5.18	1.88
Dosis de biomasa (g.L^{-1})	0.2	1.2	1.2
Tiempo de contacto (min)	6.36	73.64	73.64

Fuente: STATGRAPHICS CENTURION XVI (2010)

Los resultados optimizados (tabla 18) para la remoción de Cr (VI) confirman los valores de la representación gráfica de superficie de respuesta y curvatura de contornos. Los resultados que se establecieron como óptimos fueron para el pH 1.88, dosis de biomasa 1.20 g.L^{-1} y tiempo de contacto de 73.64 minutos. A estas condiciones se realizó pruebas de biosorción resultando que la remoción máxima de Cr (VI) fue de 99.4% con biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activado (CPA).

Torres et al. (2012), en la remoción de Cr (VI) usando cáscara de plátano (*Musa cavendishii*), con 1 g de biomasa en 100 ml de 50 mg.L^{-1} de metal la remoción fue total a los 60 minutos, pH de 1.0 y 28°C . Asimismo, se obtuvo una remoción de 84% para el Cr (VI) con algas pardas *Sargassum muticum*, con 20 mg.L^{-1} de concentración de metal y dosis de adsorbente de 2 g.L^{-1} (González et al., 2012). De la misma manera, en la remoción de cromo (VI) con cáscara de plátano verde, el porcentaje de remoción fue de 99.94% para una concentración inicial de 1.634

mg.L⁻¹, con pH 1.5, cantidad de bioadsorbente de 1 g y 60 minutos (Espinosa & Mera, 2015).

4.3. Cinética de adsorción

La cinética proporciona información sobre las vías de reacción y los tiempos para alcanzar el equilibrio. En este estudio de investigación, para la cinética de adsorción de Cr (VI), los experimentos se desarrollaron haciendo variar el tiempo de contacto desde 5.00 hasta 60.00 minutos como se observa en la tabla 19 y figura 13, con concentración inicial de Cr (VI) de 5.00 mg.L⁻¹, volumen de 500.00 mL, pH 2.00, dosis de biomasa de 0.60 g a 200 rpm a temperatura ambiente de 16.60°C.

Se muestran los resultados experimentales de la capacidad de adsorción en el tiempo (q_t) (mg.g⁻¹) en diferentes tiempos (t) (min) para el estudio cinético en la tabla 19 y figura 13.

Tabla 19

Resultado experimental para la cinética de adsorción de Cr (VI)

N°	t(min)	C _o (mg.L ⁻¹)	C _f (mg.L ⁻¹)	q _t (mg.g ⁻¹)
1	5	5.00	1.67	2.7736
2	10	5.00	0.87	3.4453
3	20	5.00	0.30	3.9179
4	30	5.00	0.12	4.0672
5	40	5.00	0.09	4.0920
6	50	5.00	0.03	4.1418
7	60	5.00	0.03	4.1418

Donde:

N°: Número de experimento

t: Tiempo de contacto (min)

C_o: Concentración inicial de Cr (VI) (mg.L⁻¹)

C_f: Concentración final de Cr (VI) en la solución (mg.L⁻¹)

q_t: capacidad de adsorción en el tiempo t (mg.g⁻¹)

Se muestra la gráfica capacidad de adsorción en el tiempo (q_t) (mg.g⁻¹) versus tiempo (t) (min).

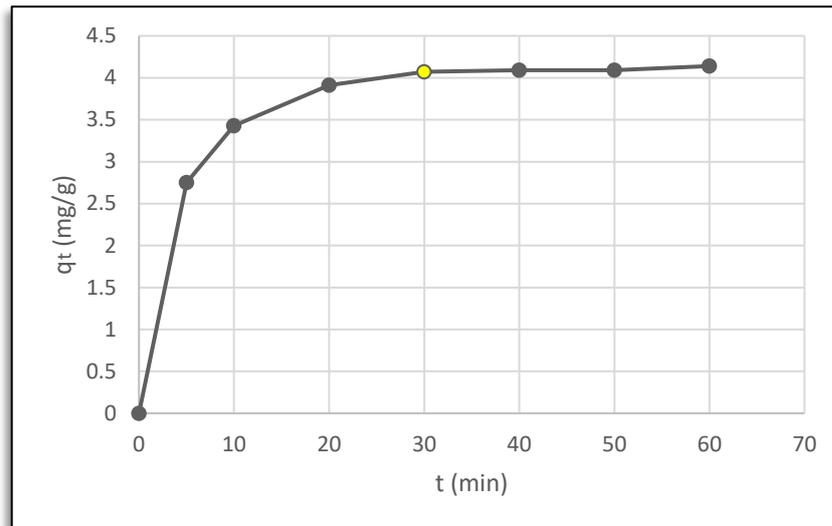


Figura 13. Cinética de adsorción del Cr (VI)

En la tabla 19 y figura 13 se observa que la capacidad de adsorción de Cr (VI) (q_t) se incrementa a medida que avanza el tiempo, en los primeros minutos, de 5.00 a 30.00 minutos, el incremento es rápido y sigue una tendencia exponencial; después de los 30.00 minutos la curva se estabiliza alcanzando un equilibrio hasta los 60.00 minutos donde se hizo constante.

Este comportamiento, de la figura 13, se explica debido a que la presencia de sitios de adsorción activos más catiónicos retienen fácilmente al anión Cr (VI), después que se agotan los sitios activos, los aniones adsorbidos pasan hacia los poros internos del biomaterial, explicando una adsorción más lenta a mayores tiempos (Kuppusamy et al., 2016). Este modo de adsorción, muestra que los iones de Cr (VI) interactúan químicamente con los grupos funcionales del adsorbente (Ali et al., 2016).

Ajustando a un modelo cinético

Los datos experimentales de la tabla 19 se usaron para determinar el mejor ajuste de los modelos de pseudo primer orden y pseudo segundo orden, el que se obtuvo del resultado de coeficiente (R^2) más próximo a la unidad.

Modelo de pseudo primer orden

El modelo de pseudo primer orden se muestra en la ec. (46) y la forma integrada en la ec. (47), (Lagergren, 1898), (Guo & Wang, 2019):

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (46)$$

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (47)$$

Donde q_t ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) y q_e ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) son la capacidad de adsorción en cualquier tiempo t y en el equilibrio, respectivamente; k_1 ($\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$) es la constante de velocidad de pseudo primer orden.

Para ajustar al modelo de pseudo primer orden a partir de los datos experimentales, se utilizó el paquete estadístico XLSTAT por regresión no lineal (método de Gauss-Newton).

Los resultados obtenidos para el modelo de pseudo primer orden son: capacidad de adsorción en el equilibrio (q_e) de 4.0760, constante de velocidad de pseudo primer orden (k_1) de 0.2110 y coeficiente de determinación (R^2) de 0.9680; estos resultados se muestran en la tabla 20.

Modelo de pseudo segundo orden

El modelo de pseudo segundo orden se muestra en la ec. (48) (Ho & McKay, 1999) y la forma lineal en la ec. (49), (50) (Ho & McKay, 2000).

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2[q_e - q_t]^2 \quad (48)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (49)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{h} + \frac{1}{q_e} t \quad (50)$$

Donde:

k_2 es la constante de velocidad de adsorción de pseudo segundo orden ($\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$), q_e y q_t son la capacidad de adsorción en el equilibrio y en cualquier tiempo t ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$).

$h = k_2 q_e^2$ es la velocidad de adsorción inicial ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)

En la figura 14, se muestra la gráfica de t/q_t vs t (min) del modelo de pseudo segundo orden, del cual $1/q_e$ es la pendiente y $1/h$ el intercepto:

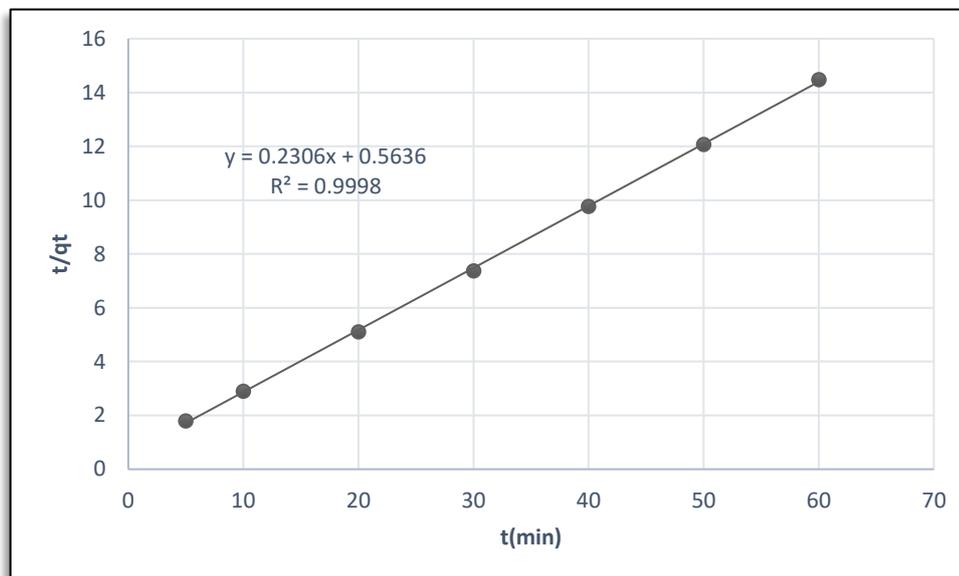


Figura 14. Cinética de adsorción de pseudo segundo orden para Cr (VI)

La constante de velocidad de pseudo segundo orden y la capacidad de adsorción en el equilibrio (q_e), se determinaron a partir de la intersección y la pendiente en el gráfico entre $\frac{t}{q_t}$ y el tiempo t . Los resultados que se obtuvieron son: Capacidad de biosorción en el equilibrio (q_e) de $4.3370 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$; constante de velocidad de pseudo segundo orden (k_2) de $0.0940 \text{ g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, coeficiente de determinación (R^2) de 0.9998 y velocidad de adsorción inicial $h = 1.7743 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, como se muestra en la tabla 20.

Tabla 20

Resultados experimentales de las constantes de los modelos cinéticos.

Constantes de velocidad Pseudo primer orden			Constantes de velocidad Pseudo segundo orden			
q_e $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	k_1 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	R^2	q_e $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	k_2 $\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$	h $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$	R^2
4.0760	0.2110	0.9680	4.3370	0.0940	1.7743	0.9998

De la tabla 20, la comparación de q_e ayudan a decidir sobre el modelo cinético que sigue la biosorción; también influye los resultados del coeficiente de determinación (R^2). En esta investigación, el modelo de pseudo primer orden tiene un valor de R^2 0.9680 y para el modelo de pseudo segundo orden R^2 0.9998; por lo que, para esta investigación, el modelo cinético de biosorción está influenciado por el modelo de pseudo segundo orden.

En la tabla 21, se muestra los resultados obtenidos por otros investigadores con diferentes adsorbentes para el cromo (VI).

Tabla 21

Comparación de las constantes cinéticas de pseudo segundo orden de Cr (VI)

Biosorbente	k_2	q_e (mg.g⁻¹)	h (mgg⁻¹min⁻¹)	Referencia
Médula de bagazo de caña de azúcar	2.92×10^{-4}	52.63	0.8088	Ullah et al. (2013)
Ramas secas de <i>Melaleuca diosmifolia</i>	0.15	50.0	378.8	Kuppusamy et al. (2016)
Algas pardas <i>Sargassum muticum</i>	0.0004	6.8	0.0185	González et al. (2012)
Bio compuesto de mango (<i>Mangifera indica</i>)	0.0058	141	115.3098	Akram et al. (2017)
Cáscara de plátano <i>Musa acuminata colla</i>	0.0940	4.3370	1.7743	Presente estudio

En la tabla 21, se aprecia los resultados de ajuste al modelo cinético de pseudo segundo orden de diversos biosorbentes obtenidos por otros investigadores, se observa que la velocidad de adsorción inicial (h) fue mayor a 100 para el caso de Bio compuesto de mango (*Mangifera indica*) y Ramas secas de *Melaleuca diosmifolia*; y fue menor a 2 para el caso de Cáscara de plátano *Musa acuminata colla*, Algas pardas *Sargassum muticum* y Médula de bagazo de caña de azúcar.

4.4. Isotermas de adsorción

El proceso de biosorción implica una fase sólida (sorbente o biosorbente), en este caso es la biomasa de cáscara de plátano (CPA) y una fase líquida (disolvente, agua), el cual tiene especies disueltas para sorber (sorbato, iones metálicos) como el Cr (VI). Debido a la afinidad de la biomasa de cáscara de plátano (CPA) por la especie de sorbato de Cr (VI), éste es atraído y ligado al sorbente por diferentes mecanismos. Este proceso continúa hasta que se establece el equilibrio entre la cantidad de especies de sorbato de Cr (VI) unidos a sólidos de biomasa de cáscara de plátano (CPA) y su porción restante en la solución (Ahalya et al., 2003). Por lo que la isoterma de adsorción relaciona los iones metálicos en la fase líquida y la concentración de Cr (VI) adsorbido (Kuppusamy et al., 2016).

Se ha realizado un estudio de adsorción de Cr (VI) sobre la biomasa de cáscara de plátano (CPA); este estudio ha sido realizado a diferentes concentraciones, de 10.00 a 50.00 mg.L⁻¹ como se ve en la tabla 22; estos resultados han sido obtenidos a 16.00°C, volumen de 50.00 mL, con 0.06 g de biomasa (CPA), pH 2.00, tiempo de 30.00 minutos y 200 rpm.

Tabla 22

Resultado experimental para la isoterma de adsorción de Cr (VI)

N°	Co (mg.L ⁻¹)	Ce (mg.L ⁻¹)	q _e (mg.g ⁻¹)	%R
1	10.00	0.72	7.7363	92.84
2	15.00	0.96	11.7040	93.63
3	20.00	1.55	15.3731	92.24
4	30.00	3.97	21.6915	86.77
5	40.00	7.55	27.0398	81.12
6	50.00	12.90	30.9204	74.21

Donde:

Co: Es la concentración de Cr (VI) en el inicio de la fase líquida (mg.L⁻¹)

Ce: Es la concentración de equilibrio (final) de Cr (VI) en la fase líquida (mg.L⁻¹)

q_e : Es la cantidad de Cr (VI) adsorbido por unidad de masa de sorbente (mg.g⁻¹)

%R: Es el porcentaje de remoción

En la tabla 22 se observa claramente que a medida que aumenta la concentración inicial de Cr (VI) de 10.00 a 50.00 (mg.L⁻¹), también aumenta la capacidad de

adsorción de Cr (VI) por el biosorbente, q_e de 7.7364 a 30.9204 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) y a la vez se reduce el porcentaje de remoción (%R) de 92.84 % a 74.21 %.

Kahraman and Pehlivan (2017) utilizando biocarbón de semillas de oleaster (*Elaeagnus*) (OSBC) y biocarbón de hueso de cereza (*Prunus avium*) (CSBC), cuando aumenta la concentración inicial de Cr (VI) de 2×10^{-4} M a 6×10^{-3} M, tiene como resultado un incremento en la capacidad de adsorción, debido a un aumento de la fuerza impulsora del gradiente de concentración con el aumento de la concentración inicial de Cr (VI), pero la remoción en el equilibrio se reduce de 95 a 84%. Lo mismo pasa cuando aumenta la concentración de 5.5 a 52 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; ocurre un aumento en la capacidad de adsorción de Cr (VI) de 1.831 a 16.430 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ y una disminución en la remoción de equilibrio de Cr (VI) de 99.90 a 94.78% en la biosorción de Cr (VI) utilizando hojas de eucalipto (*Globulus labill*) modificado molecularmente con activación ácida (Miranda, 2017).

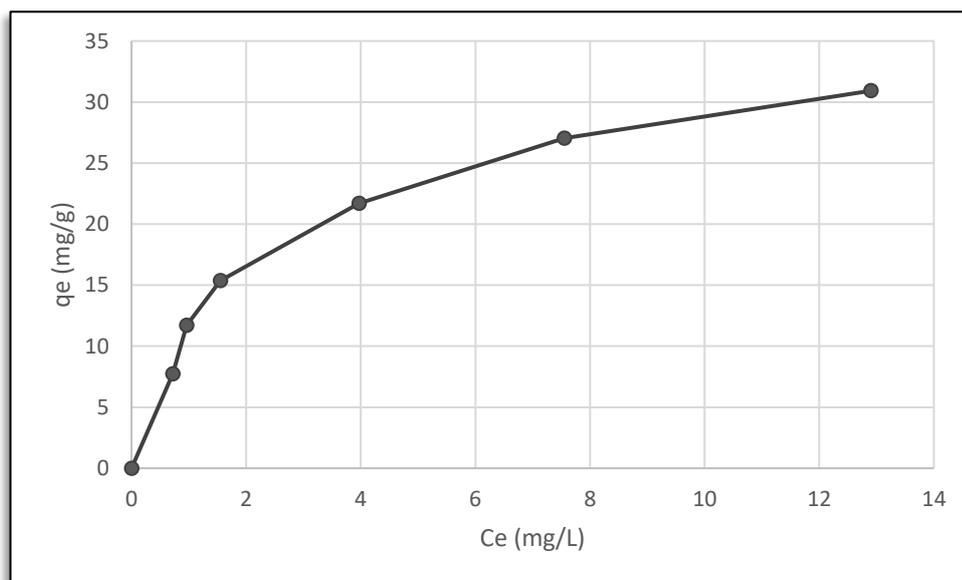


Figura 15. Isoterma de adsorción de Cr (VI) a diferentes concentraciones

En la figura 15, se muestra la curva q_e ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) vs C_e ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), el cual muestra el comportamiento de la cantidad de Cr (VI) adsorbido por unidad de masa de biosorbente de cáscara de plátano (CPA) frente a la concentración de Cr (VI) que queda aún en la solución, la cual fue obtenida a partir de diferentes concentraciones (10.00 -50.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) según la tabla 22.

Ajustando a un modelo de equilibrio

En este estudio de adsorción de Cr (VI) sobre la biomasa de cáscara de plátano (CPA), los datos experimentales de la tabla 19 fueron utilizados encontrar el modelo de mejor ajuste de los modelos de isoterma de Langmuir y Freundlich.

Isoterma de Langmuir

El modelo de la isoterma de Langmuir asume que ocurre la adsorción en monocapa sobre una superficie, el cual tiene un número finito de sitios idénticos de adsorción y homogéneos. El modelo de Langmuir se puede expresar de la siguiente manera, (Volesky & Holan, 1995):

$$q_e = \frac{bC_e q_{max}}{1 + bC_e} \quad (51)$$

Donde:

q_e : Es la cantidad de Cr (VI) adsorbido por unidad de masa de sorbente (mg.g^{-1}).

q_{max} : Es la cantidad máxima adsorbida por unidad de masa de sorbente para formar una monocapa completa en la superficie unida a un alto C_e (mg.g^{-1}).

C_e : Es la concentración de equilibrio (final) del soluto en la solución (mg.L^{-1}).

b : Es una constante de Langmuir relacionada con la afinidad de los sitios de unión (L.mg^{-1})

Es linealizada de la siguiente forma (Amel et al., 2012):

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max}b} + \frac{C_e}{q_{max}} \quad (52)$$

En la figura 16, se muestra la gráfica C_e/q_e (g.L^{-1}) versus C_e (mg.L^{-1}), de la ecuación linealizada, de la que $1/q_{max}$ es la pendiente y del intercepto se halla la constante de Langmuir (b). Esta gráfica representa el ajuste del modelo de isoterma de Langmuir experimental.

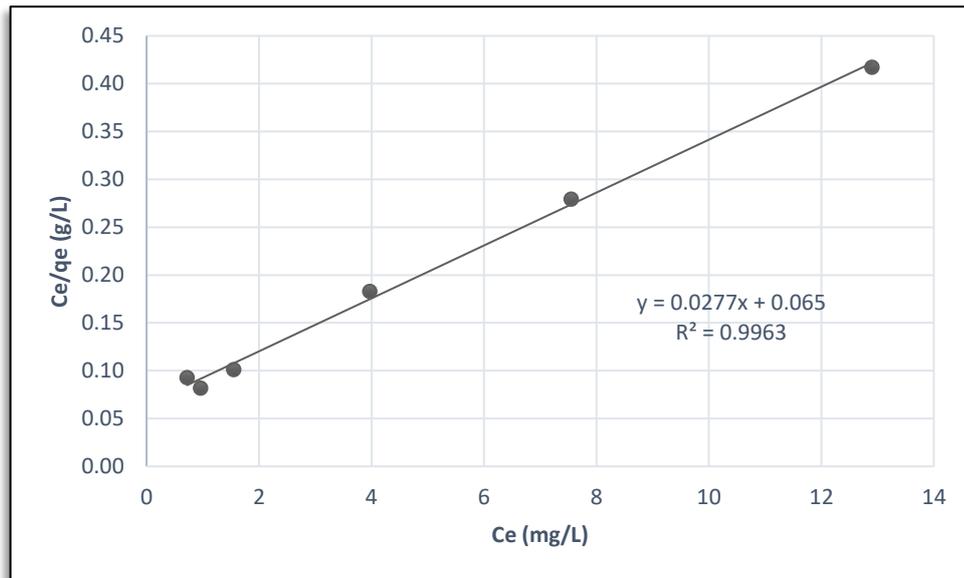


Figura 16. Isotherma de Langmuir para el Cr (VI)

La constante de Langmuir (b) y la capacidad máxima de adsorción (q_{max}), se determinaron a partir de la intersección y la pendiente en el gráfico entre C_e/q_e y C_e , obteniéndose resultados de capacidad máxima de adsorción (q_{max}) de 36.1011; constante de Langmuir (b) de 0.4262 y coeficiente de determinación (R^2) de 0.9963, los que muestran en la tabla 23 y tabla 27.

Tabla 23

Resultado experimental de las constantes de la isoterma de Langmuir

Constantes de la isoterma de Langmuir			
T (°C)	q_{max} (mg.g ⁻¹)	b (L.mg ⁻¹)	R^2
16	36.1011	0.4262	0.9963

En la tabla 24, se muestra una comparación entre los resultados de la capacidad máxima de adsorción de Cr (VI) de las Isothermas de Langmuir de otros investigadores usando diferentes biosorbentes y la biomasa usada en el presente trabajo de investigación.

Tabla 24

Comparación de la capacidad máxima de adsorción de Cr (VI) con otros adsorbentes.

Adsorbente	Capacidad máxima de adsorción (q_e) ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	Referencia
Cáscara de plátano	131.56	Memon et al. (2009)
Ramas secas de <i>Melaleuca diosmifolia</i>	62.5	Kuppusamy et al. (2016)
Algas pardas <i>Sargassum muticum</i>	196.1	Gonzáles et al. (2012)
Biocompuesto de mango (<i>Mangifera indica</i>)	322.58	Akram et al. (2017)
Biomasa nativa e inmovilizada de bagazo de caña de azúcar	495.56	Ullah et al. (2013)
Cáscara de plátano <i>Musa acuminata colla</i>	36.1011	Presente estudio

Se puede observar en la tabla 24, que de las diferentes biomásas que se utilizaron en la biosorción del Cr (VI), se reportan resultados diferentes en la capacidad máxima de adsorción (q_e) ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$). El resultado de la capacidad máxima de adsorción del presente estudio de investigación es de $q_e = 36.1011 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, el cual se aproxima al resultado de Ramas secas de *Melaleuca diosmifolia*. También se observa resultados de la capacidad máxima de adsorción q_e mayores a $100 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, tales como cáscara de plátano, Algas pardas *Sargassum muticum*, Biocompuesto de mango (*Mangifera indica*) y Biomasa nativa e inmovilizada de bagazo de caña de azúcar.

Los resultados del factor de separación (R_L), según la ecuación (53), se muestran en la tabla 25 y figura 17.

$$R_L = \frac{1}{(1 + bC_0)} \quad (53)$$

Donde:

C_0 : Es la concentración inicial de los iones del metal ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

b: Es la constante de Langmuir

Tabla 25

Factor de separación (R_L) de la Isoterma de Langmuir

T (°C)	N°	C ₀	R _L
16.00	1	10.00	0.1900
16.00	2	15.00	0.1353
16.00	3	20.00	0.1050
16.00	4	30.00	0.0725
16.00	5	40.00	0.0554
16.00	6	50.00	0.0448

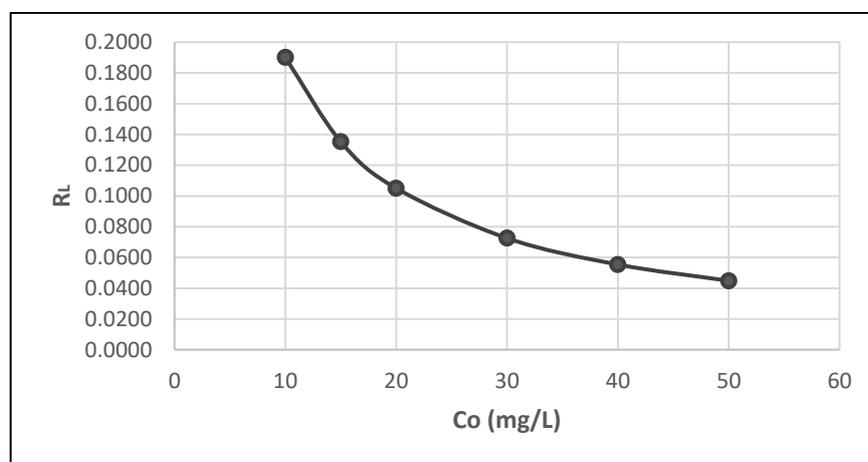


Figura 17. Factor de separación R_L de la Isoterma de Langmuir

En la tabla 25 y figura 17, se observa que los valores del factor de separación (R_L) calculados están entre 0.0448 y 0.1900 que corresponde a ($0 < R_L < 1$), es decir, son valores mayores a cero y menores de 1; lo cual indica que la sorción de Cr (VI) con cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activado (CPA) es altamente favorable en la temperatura de 16.00°C. Se observa también que los datos más bajos del factor de separación (R_L), se acercan a cero, lo que da una posibilidad de adsorción irreversible. Por consiguiente, la cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activado (CPA), es eficaz para la eliminación de Cr (VI) de soluciones acuosas.

Asimismo, Memon et al. (2009) obtuvo valores calculados de factor de separación (R_L) entre 0.21 y 0.99 en un rango de temperatura de 20 – 40 °C, el cual es altamente favorable para la cáscara de plátano en la remoción de Cr (VI). Para el biosorbente

de biocarbón de semillas de oleaster y el biocarbón de hueso de cereza en la remoción de Cr (VI), los valores de R_L también estuvieron entre 0 y 1 en cada concentración inicial y los datos más bajos de R_L estuvieron bastante cerca de cero (Kahraman & Pehlivan, 2017).

Isoterma de Freundlich

El modelo de Isoterma de Freundlich describe la adsorción en la superficie heterogénea, se expresa de la siguiente forma (Volesky & Holan, 1995):

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (54)$$

Y es linealizada en la siguiente forma (Mahindrakar & Rathod, 2018):

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (55)$$

Donde:

q_e : Es la cantidad de Cr (VI) adsorbido por unidad de masa de sorbente (mg.g^{-1}).

C_e : Es la concentración de equilibrio (final) del soluto en la solución (mg.L^{-1}).

K_f : Es la constante de Freundlich.

n : Es el factor de heterogeneidad del biosorbente.

Los datos experimentales han sido obtenidos a 16.00°C a diferentes concentraciones desde 10.00 hasta 50.00 mg.L^{-1} , con 0.06 g de biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activado (CPA), pH de 2.00, tiempo de contacto de 30 minutos y 200 rpm.

En la figura 18 se observa la gráfica $\log q_e$ versus $\log C_e$, el cual representa el ajuste del modelo de la isoterma de Freundlich; se obtiene n de la pendiente y del intercepto se obtiene K_f .

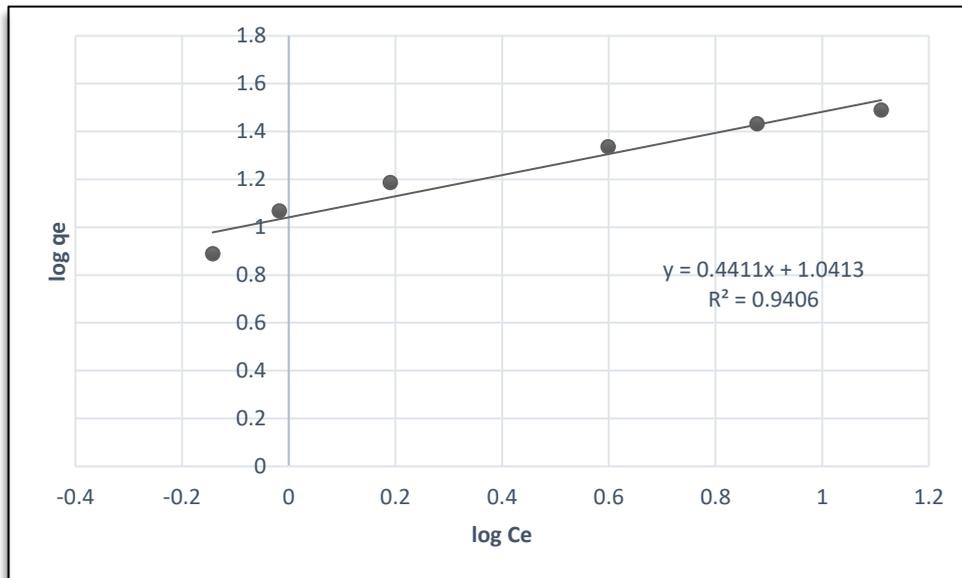


Figura 18. Isoterma de Freundlich para el Cr (VI)

La constante de Freundlich (K_f) y (n), se determinaron a partir de la intersección y la pendiente en el gráfico entre $\log q_e$ y $\log C_e$. Se obtuvo resultados de la constante de Freundlich (K_f) de 10.9977; factor de heterogeneidad del biosorbente (n) de 2.2671 y coeficiente de determinación (R^2) de 0.9406; los que se muestran en la tabla 26 y tabla 27.

Tabla 26

Resultado experimental de las constantes de la Isoterma de Freundlich

Constantes de la Isoterma de Freundlich			
$1/n$	n	k_f	R^2
0.4411	2.2671	10.9977	0.9406

En la tabla 26, muestra el valor obtenido del factor de heterogeneidad “n”, siendo el resultado de $n = 2.2671$, por lo que la superficie del biosorbente es de naturaleza heterogénea y esto conduce a una adsorción favorable con buenas características de adsorción.

Por otro lado, el parámetro $1/n$ del modelo de Freundlich; en esta investigación el valor de $1/n$ es 0.4411, por lo que corresponde a un proceso de adsorción favorable.

Los resultados experimentales de los modelos de las isotermas de Langmuir y Freundlich, se resumen en la tabla 27.

Tabla 27

Resumen de las constantes de las Isotermas de Langmuir y Freundlich

Constantes de la Isoterma de Langmuir			Constantes de la Isoterma de Freundlich		
q_{max} ($mg \cdot g^{-1}$)	b $L \cdot mg^{-1}$	R^2	n	k_f	R^2
36.1011	0.4262	0.9963	2.2671	10.9977	0.9406

En los resultados resumidos en la tabla 27, se observa los resultados experimentales de los coeficientes de determinación (R^2), siendo para la isoterma de Langmuir ($R^2 = 0.9963$) y para la isoterma de Freundlich ($R^2 = 0.9406$); esto indica que el coeficiente de determinación de la isoterma de Freundlich es inferior al obtenido por la isoterma de Langmuir, por lo que el modelo de Freundlich no es tan adecuado para describir el proceso de biosorción de Cr (VI) sobre la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activado (CPA), a pesar de que la constante n sea mayor a 2, el cual indica una adsorción buena. Los resultados de coeficiente de determinación más alto del modelo de Langmuir ($R^2 = 0.9963$), indican que se ajusta mejor a este modelo que al modelo de Freundlich ($R^2 = 0.9406$) y se concluye de estos resultados que hay una distribución homogénea de sitios activos en la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activado (CPA).

En la tabla 28 se observa los resultados experimentales de las constantes de la isoterma de Freundlich de diferentes biomazas de otros investigadores para la biosorción de Cr (VI)

Tabla 28

Comparación de las constantes experimentales de la isoterma de Freundlich

Adsorbente	n	k_f	Referencia
Compuestos bacterianos de celulosa – magnetita	2.795	1.218	Stoica-Guzun et al. (2016)
Residuos de café	0.896	7.65	Cubides & Ramírez (2014)
Hojas de eucalipto <i>Globulus labill</i>	1.1425	0.5701	Miranda (2017)
Cáscara de plátano <i>Musa acuminata</i> Colla	2.2671	10.9977	Presente estudio

En la tabla 28, se observan los resultados experimentales de las constantes de la isoterma de Freundlich para el Cr (VI) con otros adsorbentes; en las que los valores de $n = 2.2671$ del presente trabajo de investigación, así como los otros resultados con $n > 2$ como los compuestos bacterianos de celulosa – magnetita presentan buenas características de adsorción; también se observa en la tabla 25 que las biomásas de hojas de eucalipto *Globulus labill* con n (entre 1 y 2) presentan adsorción moderadamente difíciles y la biomasa de residuos de café con $n < 1$ presenta deficiente adsorción. Esto es de acuerdo a los rangos establecidos para valores de n de la isoterma de Freundlich los cuales se indican en el marco teórico sección 1.1.9.

4.5. Estudio termodinámico

Para entender el proceso natural de la adsorción del Cr (VI), se calculan los parámetros de la termodinámica, tales como los cambios en la entalpía estándar (ΔH°), entropía estándar (ΔS°) y el estándar energía libre de Gibbs (ΔG°). Los parámetros termodinámicos fueron calculados con las siguientes ecuaciones

Se utilizaron las siguientes ecuaciones (Akram et al., 2017):

$$K_C = \frac{C_a}{C_e} \quad (56)$$

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_C \quad (57)$$

$$\ln K_C = \frac{\Delta S^0}{R} - \frac{\Delta H^0}{RT} \quad (58)$$

Donde:

ΔG^0 : Es la energía libre de Gibbs estándar ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)

ΔH^0 : Es la entropía estándar ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)

ΔS^0 : Es la entropía estándar ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

K_C : Es la constante de equilibrio

C_a : Concentración en la fase sólida del adsorbente en el equilibrio ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

C_e : Concentración en el equilibrio (final) en la solución ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

R : Es la constante universal de los gases ($8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T : Es la temperatura en Kelvin (K)

Para realizar este estudio de investigación, se hizo variar la temperatura desde 20.00°C hasta 60.00°C como se ve en la tabla 29 y figura 19; en volumen de 100.00 mL , $\text{pH } 2.00$, 0.12 g de dosis de biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activado (CPA), $5.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de concentración inicial y 200 rpm de agitación.

Tabla 29

Resultado experimental para el estudio termodinámico de adsorción

N°	T °C	T (K)	Ce mg.L ⁻¹	Ca mg.L ⁻¹	K _C	q _e mg.g ⁻¹	%R
1	20.00	293.15	3.01	1.9851	0.6584	1.6542	39.70
2	30.00	303.15	0.87	4.1343	4.7759	3.4453	82.69
3	40.00	313.15	0.42	4.5821	10.9643	3.8184	91.64
4	50.00	323.15	0.42	4.5821	10.9643	3.8184	91.64
5	60.00	333.15	0.45	4.5522	10.1667	3.7935	91.04

En la tabla 29, se ve los resultados de adsorción de Cr (VI) a diferentes temperaturas, se observa que la concentración en la fase sólida en el equilibrio ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) (C_a) aumenta con el incremento de la temperatura desde $1.9851 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

(20.00°C) hasta 4.5821 mg.L⁻¹ (40.00°C); esto se ve reflejado en los resultados del porcentaje de remoción (%R), aumenta desde 39.70% (20.00°C) hasta 91.64 % (40.00°C); la capacidad de adsorción (mg.g⁻¹) (q_e) aumenta desde 1.6542 mg.g⁻¹ hasta 3.8184 mg.g⁻¹. El %R y (q_e) aumentan a medida que aumenta la temperatura hasta los 40.00°C y a los 60.00°C se observa que disminuyen estos valores de %R y (q_e); la máxima remoción se observa a los 40.00°C.

Huang et al. (2013), indica que, el incremento de temperatura de 20, 35 y 45°C, la capacidad de adsorción (mg.g⁻¹) (q_e) disminuye de 24.5, 19.4 y 14.9 mg.g⁻¹, demostrando ser un proceso exotérmico para la adsorción de Cr(VI) del gel de la cáscara de mangostán. De la misma manera, para el biocompuesto de mango (*Mangifera indica*), la capacidad de adsorción (mg.g⁻¹) (q_e) disminuye al aumentar la temperatura, lo que indica que la baja temperatura favorece la eliminación de Cr (VI) y sugiere que la adsorción es de naturaleza exotérmica; además reporta una máxima remoción a los 33°C con 0.05 g de dosis de adsorbente, pH 3, concentración inicial 1000 mg.L⁻¹, tiempo de contacto 30 min y agitación 120 rpm (Akram et al., 2017). En el caso de la biosorción de Cr (VI) usando biomasa de hueso de *Prunus Pérsica* (durazno), la capacidad de adsorción se vio favorecida con el incremento de temperatura de (25°C) 0.40 mg.g⁻¹, (60°C) 0.84 mg.g⁻¹ y a (80°C) 0.83 mg.g⁻¹, el proceso fue inverso a los 80°C; estos resultados se obtuvieron a las condiciones de temperatura a pH 2 y concentración inicial de Cr (VI) de 10 mg.L⁻¹ (Flores, 2014).

En la figura 19 se representa el comportamiento del porcentaje de remoción del Cr (VI) (%R) con biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activado con respecto a la variación de la temperatura, % Remoción versus T (°C).

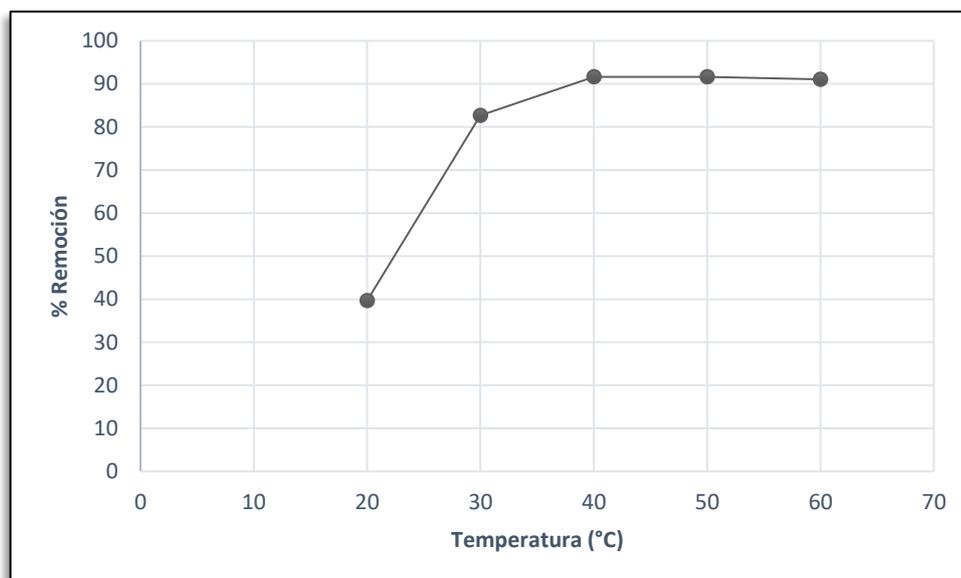


Figura 19. Variación de la temperatura en la remoción de Cr (VI)

En la figura 19 se observa el porcentaje de remoción (%R) versus la temperatura, se observa que al inicio, cuando se aumenta de 20.00 a 40.00°C, la remoción aumenta rápidamente hasta 91.60 %, después de ello, la remoción se mantiene constante hasta los 50.00°C y muestra una ligera disminución en la remoción a los 60.00°C. Por lo tanto, la máxima biosorción de Cr (VI) es hasta los 50.00°C. Este aumento de la remoción con el aumento de la temperatura se puede explicar con que disminuye el espesor de la capa que rodea al biosorbente, disminuye la resistencia a la transferencia de la capa externa o que se incrementa los sitios activos disponibles en el biosorbente; pero cuando la temperatura es aún más alta, ocurre la disminución en la biosorción de metales por el daño ocurrido en la superficie (González et al., 2012).

En la figura 20, se muestra la gráfica $\ln K_C$ versus $1/T$, del cual se obtienen los valores de entropía estándar (ΔH^0) kJ.mol^{-1} y la entropía estándar (ΔS^0) $\text{kJ.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

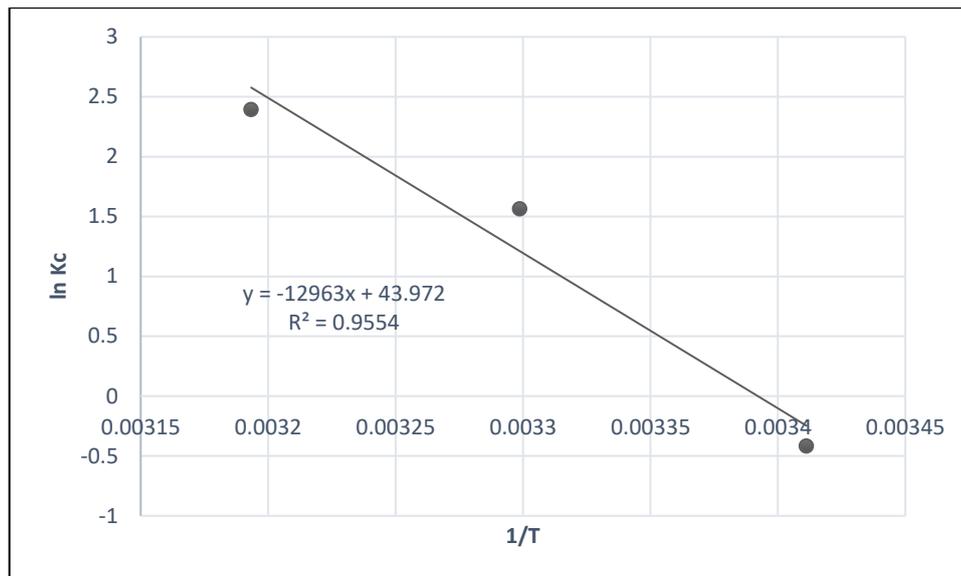


Figura 20. Termodinámica de adsorción de Cr (VI)

La figura 20, muestra la gráfica $\ln K_C$ versus $1/T$, del cual se obtienen los valores de ΔH^0 y ΔS^0 de la pendiente y el intercepto del gráfico de $\ln K_C$ y $1/T$ respectivamente.

Los resultados termodinámicos de K_C , ΔH^0 , ΔG^0 y ΔS^0 calculados de la adsorción de Cr (VI) en la CPA a varias temperaturas se muestran en la Tabla 30.

Tabla 30

Valores de los parámetros termodinámicos para la adsorción del Cr(VI)

T (K)	ΔG^0 (kJ. mol ⁻¹)	ΔH^0 (kJ. mol ⁻¹)	ΔS^0 (kJ. mol ⁻¹ . K ⁻¹)
293.15	1.0186	107.7744	0.3656
303.15	-3.9408		
313.15	-6.2345		
323.15	-6.4336		
333.15	-6.4235		

De la tabla 30 se observa el valor positivo de ΔH^0 (107.7744) el cual confirma la naturaleza endotérmica del proceso de adsorción del Cr (VI), el valor positivo de ΔS^0 sugiere que la aleatoriedad aumentó en la interfaz sólido/líquido como resultado de la adsorción de Cr (VI) en la superficie de la biomasa cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activado (CPA). Los valores negativos de ΔG^0

indican que el proceso de adsorción es espontáneo, además se observa que los valores de ΔG^0 disminuyen con el aumento de temperatura hasta los 50.00°C (323.15 K), lo que indica que la adsorción es favorable hasta 323.15 K, y se observa que a 60.00°C (333.15 K) el valor de ΔG^0 aumenta, lo cual indica que existe una disminución de la adsorción a temperaturas más altas.

Memon et al. (2009) en la biosorción de Cr (VI) con cáscara de plátano encontraron valores negativos de los parámetros termodinámicos $\Delta H^\circ = -30.5 \text{ kJ.mol}^{-1}$, $\Delta S^\circ = 0.11 \text{ kJ.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ y $\Delta G^\circ(303 \text{ K}) = -3.81 \text{ kJ.mol}^{-1}$, el cual demuestra una naturaleza exotérmica y espontánea del fenómeno de sorción. Por su parte, (Akram et al., 2017), utilizando biocompuesto de mango (*Mangifera indica*) obtuvo parámetros termodinámicos negativos para el proceso de adsorción como $\Delta H^\circ = -68.3435742 \text{ kJ.mol}^{-1}$ el cual confirma que es de naturaleza exotérmica; $\Delta S^\circ = -0.18423 \text{ kJ.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ indica que la aleatoriedad disminuyó en la interfaz sólido – líquido como resultado de la adsorción de Cr (VI) en la superficie y ΔG° en el rango de $-12.2265 \text{ kJ.mol}^{-1}$ (306 K) (33°C) a $-6.96776 \text{ kJ.mol}^{-1}$ (334 K) (61°C) indica que es de naturaleza espontánea.

4.6. Biosorción de Cr (VI) en agua residual de Curtiembre FIQ-UNA

Se ha desarrollado una aplicación en agua residual en la planta piloto de curtiembre de la FIQ-UNA usando 1.20 g.L⁻¹ de dosis de biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activado (CPA), pH 2.0, tiempo de contacto 60 minutos, 200 rpm y a temperatura ambiente de 15.00 °C. Se realizó el experimento sin tratamiento (Co) y con tratamiento (Cf), los resultados se muestran en la tabla 31.

Tabla 31

Porcentaje de remoción de Cr (VI) de agua residual curtiembre FIQ-UNA

$[Cr^{+6}]_o \text{ (mg.L}^{-1}\text{)}$	$[Cr^{+6}]_f \text{ (mg.L}^{-1}\text{)}$	% R
1.24	0.48	61.00

La tabla 31 muestra los resultados de concentración inicial de Cr (VI) (sin tratamiento) $Co = 1.24 \text{ mg.L}^{-1}$ y concentración final de Cr (VI) (con tratamiento usando CPA) $Cf = 0.48 \text{ mg.L}^{-1}$, lo cual da un porcentaje de remoción de Cr (VI) de 61.00 %. Este resultado se debe a que en el agua residual existen diferentes tipos de



iones metálicos, lo que hace que haya una interferencia en la adsorción de los iones de Cr (VI) (Akram et al., 2017).

La concentración final de Cr (VI) (con tratamiento de CPA) de 0.48 mg.L^{-1} se encuentra por debajo de los VMA para descargas de efluentes al alcantarillado que es de 0.50 mg.L^{-1} de Cr (VI).

Se reporta porcentaje de remoción de Cr (VI) de agua residual de curtiembre fue 90.88% con biomasa de hojas de eucalipto a pH 3.00, volumen de agua residual de 100.00 mL, temperatura de tratamiento 25.00°C y velocidad de agitación 200 rpm (Miranda, 2017). La influencia de ciertos iones mostraron que solo los iones de Fe (de los probados) suprimieron la sorción de Cr (VI) de las aguas residuales industriales (Memon et al., 2009).

CONCLUSIONES

- Las características fisicoquímicas de la biomasa de cáscara de plátano *Musa acuminata colla* (CP) fueron Humedad 9.00%, ceniza 13.48%, grasa 2.96%, carbohidratos 54.73%, proteína 7.88% y fibra 11.95%. La espectroscopia de rayos infrarrojos de la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activado (CPA) muestra picos que indican la presencia de grupos funcionales de hidroxilos y carboxilos responsables de la adsorción lo que demuestra la presencia de celulosa, lignina y hemicelulosa.
- La remoción de Cr (VI) está influenciada por las variables de pH y dosis de biomasa; los parámetros óptimos fueron pH 1.88, dosis de biomasa 1.20 g.L⁻¹, tiempo de contacto 73.64 min, a estas condiciones el porcentaje de remoción es 99.40%. Así mismo, el modelo cinético de pseudo segundo orden se ajustó mejor a los datos experimentales de la cinética de adsorción con valor de constante cinético $K_2 = 0.0940 \text{ g.mg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ y $R^2 = 0.9998$.
- Explica mejor el proceso de biosorción la isoterma de Langmuir con valores de las constantes de capacidad máxima de adsorción $q_{\text{max}} = 36.1011 \text{ mg.g}^{-1}$; constante relacionada con la afinidad de los sitios de unión $b = 0.4262 \text{ L.mg}^{-1}$ y coeficiente $R^2 = 0.9963$. En la termodinámica de adsorción, el valor positivo de ΔH indica que fue de naturaleza de adsorción endotérmica; los valores negativos de ΔG^0 indican que el proceso de adsorción es espontáneo y existe una disminución de la adsorción a temperaturas más altas.
- El estudio de biosorción en agua residual industrial de la Planta Piloto de Curtiembre de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Altiplano – PUNO; se obtuvo un porcentaje de remoción del 61.00%, debido a la presencia de otros iones que interfirieron en la adsorción con el Cr (VI).

RECOMENDACIONES

- Caracterizar la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activada (CPA) mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y por espectroscopía infrarroja FTIR antes y después de la adsorción.
- Profundizar el estudio de la biomasa de cáscara de plátano (*Musa acuminata colla*) activada (CPA) con el estudio de la influencia de la concentración inicial de Cr (VI) en la determinación del punto óptimo.
- En el estudio de la biosorción de cáscara de plátano realizar análisis de Cromo Total y Cromo (III) adicional al análisis de Cr (VI), asimismo, la regeneración de la biomasa.
- Realizar pruebas de biosorción directamente en aguas residuales industriales y determinar los efectos de la temperatura, dosis de adsorbente, tiempo de contacto, tamaño de partícula para obtener los puntos óptimos de máxima capacidad de adsorción.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahalya, N., Ramachandra, T., & Kanamadi, R. (2003). Biosorption of heavy metals. *Res. J. Chem. Environ*, 7(4), 71-79.
- Ahmad, M., & Alrozi, R. (2010). Optimization of preparation conditions for mangosteen peel-based activated carbons for the removal of Remazol Brilliant Blue R using response surface methodology. *Chemical Engineering Journal*, 165(3), 883-890. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.10.049>
- Akram, M., Bhatti, H., Iqbal, M., Noreen, S., & Sadaf, S. (2017). Biocomposite efficiency for Cr (VI) adsorption: kinetic, equilibrium and thermodynamics studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(1), 400-411. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.002>
- Ali, A., Saeed, K., & Mabood, F. (2016). Removal of chromium (VI) from aqueous medium using chemically modified banana peels as efficient low-cost adsorbent. *Alexandria Engineering Journal*, 55(3), 2933-2942. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.05.011>
- Amel, K., Hassena, M., & Kerroum, D. (2012). Isotherm and kinetics study of biosorption of cationic dye onto banana peel. *Energy Procedia*, 19, 286-295. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.208>
- Anwar, J., Shafique, U., Salman, M., Dar, A., & Anwar, S. (2010). Removal of Pb (II) and Cd (II) from water by adsorption on peels of banana. *Bioresource technology*, 101(6), 1752-1755. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.021>
- Arauzo, M., Rivera, M., Valladolid, M., Noreña, C., & Cedenilla, O. (2003). Contaminación por cromo en el agua intersticial, en el agua del cauce y en los sedimentos del río Jarama. *limnetica*, 22(3-4), 85-98.
- ATSDR. (2012). Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades: Resumen de Salud Pública Cromo. In.
- Ayala, C., Rivas, G., & Zambrana, C. (2003). *Estudio proximal comparativo de la cáscara y pulpa de platano (Musa paradisiaca) para su aprovechamiento completo en la alimentación humana y animal*. Universidad de El Salvador,

- Bhatnagar, A., Sillanpää, M., & Witek-Krowiak, A. (2015). Agricultural waste peels as versatile biomass for water purification—A review. *Chemical Engineering Journal*, 270, 244-271. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.01.135>
- Castro, B. (2015). *Uso de la cáscara de banano (musa paradisiaca) maduro deshidratada (seca) como proceso de bioadsorción para la retención de metales pesados, plomo y cromo en aguas contaminadas*. (masterThesis), Universidad de Guayaquil: Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Retrieved from <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/8641>
- Chávez, A. (2010). Descripción de la nocividad del cromo proveniente de la industria curtiembre y de las posibles formas de removerlo. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 9(17), 41-49.
- Costa, M., & Klein, C. (2006). Toxicity and carcinogenicity of chromium compounds in humans. *Critical reviews in toxicology*, 36(2), 155-163. doi:<https://doi.org/10.1080/10408440500534032>
- Cubides, P., & Ramírez, J. (2014). Adsorción de Cr VI sobre residuos de café. *Revista Mutis*, 4(2), 18-25. doi:<https://doi.org/10.21789/22561498.953>
- Díaz, C., Jacinto, C., Medina, R., Navarro, A., Cuizano, N., & Llanos, B. (2013). Estudio de la biosorción de cromo (VI) con quitosano cuaternario reticulado para su aplicación en biorremediación de aguas contaminadas. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 79, 304-318.
- Dufour, E. (2009). Principles of infrared spectroscopy. *Infrared spectroscopy for food quality analysis and control*, 3-27. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374136-3.00001-8>
- Espinosa, G., & Mera, G. (2015). *Alternativas ambientales para la remoción de cromo hexavalente en residuos líquidos de los laboratorios especializados de la Universidad de Nariño*. Universidad de manizales: Facultad de ciencias contables, económicas y administrativas, Manizales, Colombia. Retrieved from <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/handle/6789/2250>
- Farooq, U., Kozinski, J., Khan, M., & Athar, M. (2010). Biosorption of heavy metal ions using wheat based biosorbents—a review of the recent literature. *Bioresource*

technology, *101*(14), 5043-5053.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.030>

Fernández, A. (2012). El agua: un recurso esencial. *Química viva*, *11*(3), 147-170.

Flores, W. (2014). *Cinética de la biosorción de cromo hexavalente en solución acuosa por biomasa de hueso de Prunus Pérsica (Durazno)*. Universidad Nacional del Altiplano: Escuela de Posgrado, Puno. Retrieved from <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/361>

González, Y., Rodríguez, I., Guibal, E., Calero, M., & Martín-Lara, M. (2012). Biosorption of hexavalent chromium from aqueous solution by *Sargassum muticum* brown alga. Application of statistical design for process optimization. *Chemical Engineering Journal*, *183*, 68-76.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.12.022>

Guo, X., & Wang, J. (2019). A general kinetic model for adsorption: Theoretical analysis and modeling. *Journal of Molecular Liquids*, 111100.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111100>

Guterres, M., Melo, M., Andrade, D., Ribeiro, E., Luiz, V., & De Resende, M. (2011). Evaluation of hexavalent chromium removal in a continuous biological filter with the use of central composite design (CCD). *Journal of environmental management*, *92*(4), 1165-1173.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.022>

Haar, D. (1967). CHAPTER I - The Black Body Radiation Law. In D. T. Haar (Ed.), *The Old Quantum Theory* (pp. 3-14): Pergamon.

Ho, & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process biochemistry*, *34*(5), 451-465. doi:[https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5)

Ho, & McKay, G. (2000). The kinetics of sorption of divalent metal ions onto sphagnum moss peat. *Water research*, *34*(3), 735-742. doi:[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00232-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00232-8)

- Huamán, G., Souza, L., Torem, M., & Saavedra, G. (2006). Biosorption of cadmium by green coconut shell powder. *Minerals engineering*, 19(5), 380-387. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.12.003>
- Huang, K., Xiu, Y., & Zhu, H. (2013). Selective removal of Cr (VI) from aqueous solution by adsorption on mangosteen peel. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(9), 5930-5938. doi:10.1007 / s11356-013-1497-0
- Jamil, M., Memon, S., Bhangar, M., & Khuhawar, M. (2008). Banana peel: a green and economical sorbent for Cr (III) removal. *Pakistan Journal of Analytical & Environmental Chemistry*, 9(1), 6.
- Kahraman, H., & Pehlivan, E. (2017). Cr⁶⁺ removal using oleaster (*Elaeagnus*) seed and cherry (*Prunus avium*) stone biochar. *Powder Technology*, 306, 61-67. doi:<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.10.050>
- Kataria, N., & Garg, V. (2018). Optimization of Pb (II) and Cd (II) adsorption onto ZnO nanoflowers using central composite design: isotherms and kinetics modelling. *Journal of Molecular Liquids*, 271, 228-239. doi:<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.08.135>
- Kong, L., & Adidharma, H. (2019). A new adsorption model based on generalized van der Waals partition function for the description of all types of adsorption isotherms. *Chemical Engineering Journal*, 375, 122112. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122112>
- Kratochvil, D., & Volesky, B. (1998). Advances in the biosorption of heavy metals. *Trends in biotechnology*, 16(7), 291-300. doi:[https://doi.org/10.1016/S0167-7799\(98\)01218-9](https://doi.org/10.1016/S0167-7799(98)01218-9)
- Kuppusamy, S., Thavamani, P., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., Lee, Y., & Naidu, R. (2016). Potential of *Melaleuca diosmifolia* leaf as a low-cost adsorbent for hexavalent chromium removal from contaminated water bodies. *Process Safety and Environmental Protection*, 100, 173-182. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.01.009>
- Lagergren, S. (1898). Zur theorie der sogenannten adsorption gelöster stoffe. *Kungliga svenska vetenskapsakademiens. Handlingar*, 24, 1-39.

- Li, J., Lin, Q., Zhang, X., & Yan, Y. (2009). Kinetic parameters and mechanisms of the batch biosorption of Cr (VI) and Cr (III) onto *Leersia hexandra* Swartz biomass. *Journal of Colloid and interface Science*, 333(1), 71-77. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.02.021>
- Losada, L., Sotto, M., & Artunduaga, O. (2015). Remoción de cromo hexavalente utilizando cáscara de moringa oleifera como bio-adsorbente. *Revista Nova*, 1, 74-87.
- Machrouhi, A., Alilou, H., Farnane, M., El Hamidi, S., Sadiq, M., Abdennouri, M., . . . Barka, N. (2019). Statistical optimization of activated carbon from *Thapsia transtagana* stems and dyes removal efficiency using central composite design. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 4(4), 544-553. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2019.09.002>
- Mahindrakar, K., & Rathod, V. (2018). Utilization of banana peels for removal of strontium (II) from water. *Environmental technology & innovation*, 11, 371-383. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.06.015>
- Memon, J., Memon, S., Bhangar, M., El-Turki, A., Hallam, K., & Allen, G. (2009). Banana peel: a green and economical sorbent for the selective removal of Cr (VI) from industrial wastewater. *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*, 70(2), 232-237. doi:<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2008.12.032>
- Memon, J., Memon, S., Bhangar, M., Memon, G., El-Turki, A., & Allen, G. (2008). Characterization of banana peel by scanning electron microscopy and FT-IR spectroscopy and its use for cadmium removal. *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*, 66(2), 260-265. doi:<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2008.07.001>
- Miranda, N. (2017). *Biosorción de cromo Cr(VI) de soluciones acuosas por la biomasa residual de hojas de eucalipto (Globulus labill)*. Universidad Nacional del Altiplano: Escuela de posgrado, Puno. Retrieved from <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/8747>
- Miretzky, P., & Fernandez, A. (2010). Cr (VI) and Cr (III) removal from aqueous solution by raw and modified lignocellulosic materials: a review. *Journal of hazardous materials*, 180(1-3), 1-19. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.060>

- Molina, N., Aguilar, P., & Cordovez, C. (2010). Plomo, cromo III y cromo VI y sus efectos sobre la salud humana. *Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular*, 8(1), 77-88.
- mSalman, J. (2014). Optimization of preparation conditions for activated carbon from palm oil fronds using response surface methodology on removal of pesticides from aqueous solution. *Arabian Journal of Chemistry*, 7(1), 101-108. doi:<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.05.033>
- Mukherjee, A., Karmakar, B., & Halder, G. (2020). Response surface optimized free radical grafting of methyl methacrylate on de-lignified rice straw for evaluating its application potential as flame retardant roofing material. *Chemical Engineering Journal Advances*, 1-53. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ceja.2020.100007>
- Najafpour, A., Khorrami, A., Azar, P., & Tehrani, M. (2019). Study of heavy metals biosorption by tea fungus in Kombucha drink using Central Composite Design. *Journal of Food Composition and Analysis*, 103359. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103359>
- Pradhan, D., Sukla, L., Sawyer, M., & Rahman, P. (2017). Recent bioreduction of hexavalent chromium in wastewater treatment: a review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 55, 1-20. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.06.040>
- Renner, T. (2007). *Quantities, units and symbols in physical chemistry*: Royal Society of Chemistry.
- Reyes, E., Cerino, F., & Suárez, M. (2006). Remoción de metales pesados con carbón activado como soporte de biomasa. *Ingenierías*, 9(31), 59-64.
- Richard, F., & Bourg, A. (1991). Aqueous geochemistry of chromium: a review. *Water research*, 25(7), 807-816. doi:[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(91\)90160-R](https://doi.org/10.1016/0043-1354(91)90160-R)
- Rumpa, S., Rumki, N., & Saha, B. (2011). Sources and toxicity of hexavalent chromium. *Journal of Coordination Chemistry*, 64(10), 1782-1806. doi:<https://doi.org/10.1080/00958972.2011.583646>

- Saha, B., & Orvig, C. (2010). Biosorbents for hexavalent chromium elimination from industrial and municipal effluents. *Coordination Chemistry Reviews*, 254(23-24), 2959-2972. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ccr.2010.06.005>
- Sekhar, C., Kamala, C., Chary, N., & Anjaneyulu, Y. (2003). Removal of heavy metals using a plant biomass with reference to environmental control. *International Journal of Mineral Processing*, 68(1-4), 37-45. doi:[https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(02\)00047-9](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(02)00047-9)
- Shen, Y., Wang, S., Huang, S., Tzou, Y., & Huang, J. (2010). Biosorption of Cr (VI) by coconut coir: spectroscopic investigation on the reaction mechanism of Cr (VI) with lignocellulosic material. *Journal of hazardous materials*, 179(1-3), 160-165. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.02.073>
- Sierra, C. (2016). *Calidad del agua: Evaluación y diagnóstico*. Colombia: Sello Editorial de la Universidad de Medellín.
- Skoog, D., Holler, F., & Nieman, T. (2008). *Principios de análisis instrumental*.
- Stoica-Guzun, A., Stroescu, M., Jinga, S., Mihalache, N., Botez, A., Matei, C., . . . Ionita, V. (2016). Box-Behnken experimental design for chromium (VI) ions removal by bacterial cellulose-magnetite composites. *International journal of biological macromolecules*, 91, 1062-1072. doi:<http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.ijbiomac.2016.06.070>
- Tanweer, A., & Danish, M. (2018). Prospects of banana waste utilization in wastewater treatment: A review. *Journal of environmental management*, 206, 330-348. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.061>
- Tejada, C., Quiñones, E., Tejada, L., & Marimón, W. (2015). Absorción de Cromo Hexavalente en soluciones acuosas por cascaras de naranja (*Citrus sinensis*). *Producción + Limpia*, 10, 9-21.
- Téllez, J., Carbajal, R., & Gaitán, A. (2004). Aspectos toxicológicos relacionados con la utilización del cromo en el proceso productivo de curtiembres. *Revista de la Facultad de Medicina*, 52(1), 50-61.

- Temesgen, F., Gabbiye, N., & Sahu, O. (2018). Biosorption of reactive red dye (RRD) on activated surface of banana and orange peels: economical alternative for textile effluent. *Surfaces and Interfaces*, 12, 151-159. doi:<https://doi.org/10.1016/j.surfin.2018.04.007>
- Torab-Mostaedi, M., Asadollahzadeh, M., Hemmati, A., & Khosravi, A. (2013). Equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies for biosorption of cadmium and nickel on grapefruit peel. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 44(2), 295-302. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtice.2012.11.001>
- Torres, L., Cárdenas, J., Moctezuma, M., Martínez, V., & Acosta, I. (2012). Remoción de cromo hexavalente por la cascara de Plátano (*Musa cavendishii*). *Química Hoy*, 2(A), 29-32.
- Tseng, R., & Wu, F. (2008). Inferring the favorable adsorption level and the concurrent multi-stage process with the Freundlich constant. *J Hazard Mater*, 155(1-2), 277-287. doi:10.1016/j.jhazmat.2007.11.061
- Ullah, I., Nadeem, R., Iqbal, M., & Manzoor, Q. (2013). Biosorption of chromium onto native and immobilized sugarcane bagasse waste biomass. *Ecological engineering*, 60, 99-107. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.028>
- Villen-Guzman, M., Gutierrez-Pinilla, D., Gomez-Lahoz, C., Vereda-Alonso, C., Rodriguez-Maroto, J., & Arhoun, B. (2019). Optimization of Ni (II) biosorption from aqueous solution on modified lemon peel. *Environmental Research*, 108849. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108849>
- Volesky, B., & Holan, Z. (1995). Biosorption of heavy metals. *Biotechnology progress*, 11(3), 235-250. doi:<https://doi.org/10.1021/bp00033a001>
- Zhang, C. (2007). *Fundamentals of environmental sampling and analysis* (W. Science Ed.): John Wiley & Sons.



ANEXOS

Anexo 1. Valores Máximos Admisibles (VMA) para la descarga de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado D.S.N°010-2019-VIVIENDA

El Peruano

Firmado Digitalmente por:
EDITORIA PERU
Fecha: 11/03/2019 07:05:52

El Peruano / Lunes 11 de marzo de 2019

NORMAS LEGALES

17

Artículo 2.- Incorporación de los artículos 13-A y 14-A al Reglamento de la Ley N° 29973, Ley General de la Persona con Discapacidad, aprobado por Decreto Supremo N° 002-2014-MIMP.

Incorpórase los artículos 13-A y 14-A al Reglamento de la Ley N° 29973, Ley General de la Persona con Discapacidad, aprobado por Decreto Supremo N° 002-2014-MIMP, quedando redactado de la siguiente manera:

"Artículo 13-A.- Supervisión de las condiciones de accesibilidad en los espacios públicos y privados de uso público con fines recreacionales y que cuenten con juegos infantiles.

El Consejo Nacional para la Integración de la Persona con Discapacidad – CONADIS supervisa el cumplimiento de las condiciones de accesibilidad en los espacios públicos y privados de uso público con fines recreacionales y que cuenten con juegos infantiles.

Ante el incumplimiento de las normas de accesibilidad respecto de edificaciones privadas, el CONADIS elabora y remite al Gobierno Local el informe técnico de supervisión, en un plazo de cinco (5) días hábiles, para su evaluación, y si fuera el caso, el inicio del procedimiento administrativo sancionador. Concluido dicho procedimiento, se comunica al CONADIS para que lo incorpore en el informe anual que remite al Congreso de la República."

Artículo 14-A.- Cumplimiento de las normas de accesibilidad

(...)
Los gobiernos locales, en el marco de sus competencias, emiten las disposiciones necesarias para fiscalizar y sancionar el incumplimiento de las normas de accesibilidad en las edificaciones privadas ubicadas en sus jurisdicciones, considerando como circunstancia agravante cuando los espacios privados de acceso y uso público con fines recreacionales que cuenten con juegos infantiles no sean accesibles para niños, niñas y adolescentes con discapacidad".

Artículo 3.- Financiamiento

La implementación de la presente norma se financia con cargo al presupuesto institucional de las entidades involucradas, sin demandar recursos adicionales al Tesoro Público.

Artículo 4.- Refrendo

El presente Decreto Supremo es refrendado por la Ministra de la Mujer y Poblaciones Vulnerables, el Ministro de la Producción, la Ministra de Salud, el Ministro de Educación y el Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

DISPOSICIONES COMPLEMENTARIAS FINALES

Primera.- DISPOSICIÓN NORMATIVA DE LOS GOBIERNOS LOCALES

Los gobiernos locales, en un plazo de noventa (90) días hábiles, establecen las disposiciones normativas necesarias para la fiscalización de las edificaciones privadas y su correspondiente sanción por el incumplimiento de las normas de accesibilidad, adecuación urbanística y arquitectónica para las personas con discapacidad.

Segunda.- CRITERIOS DE ACCESIBILIDAD Y DISEÑO UNIVERSAL

El Instituto Nacional de la Calidad – INACAL, en coordinación con el CONADIS, en un plazo de ciento ochenta (180) días hábiles, contados a partir del día siguiente de la publicación del presente Decreto Supremo, emite la Norma Técnica que contiene los requisitos técnicos para los juegos infantiles ubicados en los espacios públicos y privados de uso público con fines recreacionales para los niños, niñas y adolescentes con discapacidad, considerando criterios de accesibilidad y de diseño universal, garantizando especialmente su seguridad.

Tercera.- INFORME ANUAL AL CONGRESO DE LA REPÚBLICA

El Presidente del Consejo Nacional para la Integración de la Persona con Discapacidad remite el informe sobre el cumplimiento de la Ley N° 30603, Ley que garantiza el derecho al juego y la accesibilidad urbana para niños, niñas y adolescentes con discapacidad a la Comisión de Inclusión Social y Personas con Discapacidad del Congreso de la República, en el marco del Día Nacional de la Persona con Discapacidad.

Cuarta.- ELABORACIÓN DE LA ESTRATEGIA NACIONAL

El Ministerio de Salud, el Ministerio de la Mujer y Poblaciones Vulnerables, a través del CONADIS; y en coordinación con los gobiernos regionales, en un plazo de ciento ochenta (180) días hábiles, elaboran una Estrategia Nacional Multianual para promover el acceso de las personas con discapacidad a las tecnologías de apoyo, dispositivos y ayudas compensatorias.

Dado en la Casa de Gobierno, en Lima, a los nueve días del mes de marzo del año dos mil diecinueve.

MARTÍN ALBERTO VIZCARRA CORNEJO
Presidente de la República

DANIEL ALFARO PAREDES
Ministro de Educación

ANA MARÍA MENDIETA TREFOGLI
Ministra de la Mujer y Poblaciones Vulnerables

RAÚL PÉREZ-REYES ESPEJO
Ministro de la Producción

ELIZABETH ZULEMA TOMÁS GONZÁLES
Ministra de Salud

JAVIER PIQUÉ DEL POZO
Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento

1748339-2

VIVIENDA, CONSTRUCCION Y SANEAMIENTO

Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario

**DECRETO SUPREMO
N° 010-2019-VIVIENDA**

EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA

CONSIDERANDO:

Que, el artículo 6 de la Ley N° 30156, Ley de Organización y Funciones del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, en concordancia con el artículo 5 del Decreto Legislativo N° 1280, Decreto Legislativo que aprueba la Ley Marco de la Gestión y Prestación de los Servicios de Saneamiento, establece que este Ministerio es el Ente rector de las políticas nacionales y sectoriales dentro de su ámbito de competencia, las cuales son de obligatorio cumplimiento por los tres niveles de gobierno en el marco del proceso de descentralización, y en todo el territorio nacional;

Que, el artículo 25 del citado Decreto Legislativo, establece la prohibición de descargar en las redes de alcantarillado sanitario, sustancias o elementos extraños que contravengan las normas vigentes sobre la calidad de los efluentes; para ello, los usuarios del servicio de

Quinta.- Asistencia Técnica

Sin perjuicio de las funciones que realicen las entidades e instituciones con competencias reconocidas en materia de saneamiento, el Organismo Técnico de la Administración de los Servicios de Saneamiento (OTASS), en el marco de sus funciones y competencias, brinda asistencia técnica a los prestadores de servicios de saneamiento del ámbito urbano, para el adecuado cumplimiento del presente Reglamento.

DISPOSICIONES COMPLEMENTARIAS TRANSITORIAS

Primera.- Plazo para el Registro de UND

Los prestadores de los servicios de saneamiento tienen un plazo máximo de un (1) año, contados desde el día siguiente de la publicación del presente Reglamento en el Diario Oficial El Peruano, para registrar y/o actualizar a la totalidad de sus UND que se encuentren dentro de su ámbito de responsabilidad.

Segunda.- Implementación del punto de toma de muestra del UND

Los prestadores de los servicios de saneamiento, en un plazo no mayor de dos (2) años, contados a partir del día siguiente de publicado el presente Reglamento en el Diario Oficial El Peruano, realizan las acciones necesarias para implementar, bajo responsabilidad, que todos los UND cuenten con una caja de registro o dispositivo similar como conexión domiciliaria en la parte externa de su predio, acorde con las características y especificaciones técnicas establecidas en la normativa sectorial.

Tercera.- Procedimiento para identificar y determinar el punto de toma de muestra temporal del UND

En tanto se implemente la instalación del punto de toma de muestra o conexión domiciliaria mencionada en la Segunda Disposición Complementaria Transitoria, a efectos de aplicar lo dispuesto en el presente Reglamento, los prestadores de los servicios de saneamiento, identifican y determinan el punto de toma de muestra temporal del UND, el cual en todos los casos debe estar ubicado antes de la red de alcantarillado sanitario. Para dicho fin, se debe cumplir con el procedimiento siguiente:

1. El prestador de los servicios de saneamiento, notifica al UND, precisando el día y hora en que se lleva a cabo la visita a sus instalaciones, a fin de realizar la verificación y determinación del punto de toma de muestra temporal, el cual puede contar con la presencia del UND o su representante, persona encargada o con la persona que se encuentre en las instalaciones. Dicha notificación se realiza con cinco (5) días previos a la inspección a las instalaciones del UND.

2. El prestador de los servicios de saneamiento se apersona a las instalaciones del UND a efectos de proceder con lo señalado en el numeral precedente, previa verificación de que la notificación realizada al UND, cumple con las disposiciones establecidas en el artículo 21 del Texto Único Ordenado de la Ley N° 27444, Ley del Procedimiento Administrativo General (TUO de la Ley N° 27444), aprobado por el Decreto Supremo N° 006-2017-JUS, para lo cual procede a levantar el Acta de inspección, según el formato aprobado en el Anexo N° 3 del presente Reglamento.

3. Durante la diligencia, el personal del prestador de los servicios de saneamiento solicita, bajo responsabilidad, al UND o su representante, la presentación del diagrama de flujo y balance hídrico a aquellos UND cuyos volúmenes y concentraciones de descarga de aguas residuales no domésticas afecten significativamente el sistema de alcantarillado sanitario y tratamiento de aguas residuales. La no presentación de la documentación antes mencionada no invalida la diligencia ni el Acta de inspección. Sin perjuicio de ello, el prestador de los servicios de saneamiento, puede otorgar un plazo máximo de treinta (30) días hábiles, a partir del día siguiente de realizada la diligencia, a efectos que el UND cumpla con presentarlos. El incumplimiento de este plazo determina la suspensión temporal establecida en el artículo 15 del presente Reglamento.

4. En el Acta de inspección debe constar la determinación del punto de toma de muestra temporal. La suscripción del Acta por parte del UND o su representante no es obligatoria, por lo que si este se niega a suscribirla, no la invalida, sin perjuicio de que consigne dicha circunstancia en el Acta. Una copia del Acta debe ser entregada al UND o su representante.

5. Si el UND o su representante no permite el ingreso a sus instalaciones u obstaculiza las labores del personal del prestador de los servicios de saneamiento debidamente identificado, este procede a consignar dicha circunstancia en el Acta de inspección, y a suspender temporalmente el servicio de agua potable y alcantarillado sanitario, hasta la efectiva realización de la inspección. El Acta de inspección es notificada al UND o su representante en el momento de la diligencia, cumpliendo con las disposiciones establecidas en los párrafos 21.1, 21.3 y 21.4 del artículo 21 del TUO de la Ley N° 27444.

6. Suspendidos temporalmente los servicios de agua potable y alcantarillado sanitario, el prestador de los servicios de saneamiento reprograma la visita a las instalaciones del UND, a solicitud de este, para lo cual debe restablecer los servicios de agua potable y alcantarillado sanitario, de acuerdo a las disposiciones que para dicho fin apruebe la Sunass.

ANEXO N° 1

PARÁMETRO	UNIDAD	SIMBOLOGÍA	VMA PARA DESCARGAS AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	DBO ₅	500
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	DQO	1000
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	S.S.T.	500
Aceites y Grasas	mg/l	A y G	100

ANEXO N° 2

PARÁMETRO	UNIDAD	SIMBOLOGÍA	VMA PARA DESCARGAS AL SISTEMA 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
Plomo	mg/l	Pb	0.5
Sulfatos	mg/l	SO ₄ ²⁻	1000
Sulfuros	mg/l	S ²⁻	5
Zinc	mg/l	Zn	10
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	NH ⁴⁺	80
Potencial Hidrógeno	unidad	pH	6-9
Sólidos Sedimentables	ml/l/h	S.S.	8.5
Temperatura	°C	T	<35

(1) La aplicación de estos parámetros a cada actividad económica por procesos productivos, es la precisada en el presente Reglamento tomando como referencia el código CIIU. Aquellas actividades que no estén incluidas en este código, deben cumplir con los parámetros indicados en el presente Anexo. Los parámetros establecidos en los Anexos N° 1 y N° 2 del presente Reglamento, son determinados a partir del análisis de muestras puntuales.

(2) Las concentraciones de los parámetros establecidos en los Anexos N° 1 y N° 2 deben ser determinadas a partir del análisis de muestras puntuales.

Anexo 2. Límite Máximo Permissible (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de actividad minero-metalúrgico D.S. N°10-2010-MINAM

424114

 **NORMAS LEGALES**

El Peruano
Lima, sábado 21 de agosto de 2010

la Ministra de Economía y Finanzas y por el Ministro de Transportes y Comunicaciones.

Regístrese, comuníquese y publíquese.

ALAN GARCÍA PÉREZ
Presidente Constitucional de la República

JAVIER VELASQUEZ QUESQUÉN
Presidente del Consejo de Ministros

MERCEDES ARÁOZ FERNÁNDEZ
Ministra de Economía y Finanzas

ENRIQUE CORNEJO RAMÍREZ
Ministro de Transportes y Comunicaciones

533964-6

Autorizan viaje de funcionario de OSIPTEL a Colombia para participar en eventos organizados por el Centro de Excelencia de las Américas de la Unión Internacional de Telecomunicaciones

**RESOLUCIÓN SUPREMA
N° 194-2010-PCM**

Lima, 20 de agosto de 2010

Vista, la Carta N° 816-GG.RI/2010 del Gerente General del Consejo Directivo del Organismo Supervisor de la Inversión Privada en Telecomunicaciones - OSIPTEL; y,

CONSIDERANDO:

Que, por comunicación de fecha 27 de julio de 2010 la Asesora en Gestión y Desarrollo de Recursos Humanos del Centro de Excelencia para la Región Américas de la Oficina Regional de la Unión Internacional de Telecomunicaciones - UIT para las Américas ha invitado al Gerente General del Organismo Supervisor de la Inversión Privada en Telecomunicaciones - OSIPTEL a participar en la "I Reunión del Comité Estratégico y de Calidad del Centro de Excelencia de las Américas de la Unión Internacional de Telecomunicaciones - UIT", así como en el "IV Foro Internacional Futuro de las Tecnologías de la Información en Telecomunicación - TIC en la Región Américas", a llevarse a cabo en la ciudad de Bogotá, República de Colombia, del 30 de agosto al 3 de setiembre de 2010;

Que, los mencionados eventos son organizados por el Centro de Excelencia de las Américas de la Unión Internacional de Telecomunicaciones y cuentan con la colaboración de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Colombia;

Que, las citadas reuniones congregarán a los expertos de la región de los organismos reguladores de telecomunicaciones y de las instituciones que forman parte de la Red de Nodos del Centro de Excelencia de las Américas de la UIT;

Que, en atención al prestigio internacional del OSIPTEL, este organismo ha sido reconocido e incorporado a la Red de Nodos del Centro de Excelencia de las Américas, habiéndose firmado para ello, el 3 de octubre de 2008, el Acuerdo de Participación de dicha Red de Nodos entre el OSIPTEL y la UIT;

Que, en el marco de este Acuerdo, el OSIPTEL y la UIT realizan actividades conjuntas con la finalidad de fortalecer las capacidades de los funcionarios del OSIPTEL, siendo la línea de contar con un mecanismo regional que fortalezca la capacidad de generar conocimiento y experiencia para el talento humano de más alto nivel de la Región Américas y contribuir a su capacitación y desarrollo;

Que, en el IV Foro Internacional Futuro de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) en la Región Américas se tratarán importantes temas del sector, tales como la participación empresarial necesaria para el aporte de las TIC al desarrollo social, las redes de bajo costo en la inclusión digital, las aplicaciones TIC en las Américas, la regulación de aplicaciones, contenidos y televisión digital;

Que, en este sentido, la participación en estos eventos permitirá obtener recursos y generar la posibilidad de capacitación a los funcionarios del OSIPTEL en políticas de telecomunicaciones, gestión o gerencia de telecomunicaciones, nuevas tecnologías, servicios de telecomunicaciones y regulación de las telecomunicaciones;

Que, el señor Alejandro Gustavo Jiménez Morales además de ser el Gerente General del OSIPTEL es responsable de las coordinaciones con el Centro de Excelencia de las Américas de la UIT, por lo cual su participación permitirá un adecuado intercambio de experiencias e información sobre temas muy importantes para la regulación de los servicios públicos de telecomunicaciones y las políticas de capacitación y fortalecimiento de las capacidades de los recursos humanos del sector;

Que, la UIT asumirá los costos del pasaje aéreo del citado funcionario, correspondiendo asumir al OSIPTEL, con cargo a su presupuesto, los gastos por concepto de viáticos y tarifa única por uso de aeropuerto;

De conformidad con lo establecido por la Ley N° 27619, Ley que regula la autorización de viajes al exterior de funcionarios y servidores públicos del Poder Ejecutivo; su Reglamento, aprobado mediante Decreto Supremo N° 047-2002-PCM; la Ley N° 29289, la Ley N° 29465, Ley de Presupuesto del Sector Público para el Año Fiscal 2010; y el Reglamento de Organización y Funciones de la Presidencia del Consejo de Ministros, aprobado por el Decreto Supremo N° 063-2007-PCM; y,

Estando a lo acordado;

SE RESUELVE:

Artículo 1°.- Autorizar el viaje del señor Alejandro Gustavo Jiménez Morales, Gerente General del Organismo Supervisor de la Inversión Privada en Telecomunicaciones - OSIPTEL, a la ciudad de Bogotá, República de Colombia, del 29 de agosto al 4 de setiembre de 2010, para los fines expuestos en la parte considerativa de la presente resolución.

Artículo 2°.- Los gastos que irrogue el cumplimiento de la presente resolución se efectuarán con cargo al presupuesto del OSIPTEL, de acuerdo al siguiente detalle:

Tarifa Única por Uso de Aeropuerto	US\$	31,00
Viáticos	US\$	1 200,00

Artículo 3°.- Dentro de los quince (15) días calendario siguientes de efectuado el viaje, el referido funcionario deberá presentar a su institución un informe detallado describiendo las acciones realizadas, los resultados obtenidos y la rendición de cuentas por los viáticos entregados.

Artículo 4°.- La presente Resolución no otorga derecho a exoneración o liberación de impuestos aduaneros de ninguna clase o denominación.

Artículo 5°.- La presente Resolución Suprema será refrendada por el Presidente del Consejo de Ministros.

Regístrese, comuníquese y publíquese.

ALAN GARCÍA PÉREZ
Presidente Constitucional de la República

JAVIER VELASQUEZ QUESQUÉN
Presidente del Consejo de Ministros

533964-7

AMBIENTE

Aprueban Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero - Metalúrgicas

**DECRETO SUPREMO
N° 010-2010-MINAM**

EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA:

El Peruano

Lima, sábado 21 de agosto de 2010

NORMAS LEGALES

424117

Minas aprobará los Términos de Referencia conforme a los cuales deba elaborarse el Plan de Implementación para el Cumplimiento de los LMP, así como el procedimiento de evaluación de dichos planes.

Tercera.- En el plazo de dos (02) años contados a partir de la entrada en vigencia del presente Decreto Supremo, el Ministerio del Ambiente en coordinación con el Ministerio de Energía y Minas evaluará la necesidad de establecer nuevos LMP para los siguientes parámetros:

- Nitrógeno amoniacal
- Nitrógeno como nitratos
- Demanda Química de Oxígeno
- Aluminio
- Antimonio
- Manganeseo
- Molibdeno
- Níquel
- Fenol
- Radio 226
- Selenio
- Sulfatos

Para tal efecto, el Ministerio de Energía y Minas dispondrá la modificación de los Programas de Monitoreo de las actividades mineras en curso de modo que se incluyan los parámetros aquí mencionados.

**DISPOSICIÓN COMPLEMENTARIA
TRANSITORIA**

Única.- Hasta la aprobación del Protocolo de Monitoreo de Aguas y Efluentes Líquidos se aplicará supletoriamente, el Protocolo de Monitoreo de Calidad de Agua, aprobado por Resolución Directoral N° 004-94-EM/DGAA.

**DISPOSICIÓN COMPLEMENTARIA
DEROGATORIA**

Única.- Deróguese la Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM, salvo los artículos 7°, 9°, 10°, 11° y 12°, así como los Anexos 03, 04, 05 y 06, los cuales mantienen su vigencia hasta la aprobación y entrada en vigencia del Protocolo de Monitoreo de Aguas y Efluentes Líquidos.

Dado en la Casa de Gobierno, en Lima, a los veinte días del mes de agosto del año dos mil diez.

ALAN GARCÍA PÉREZ
Presidente Constitucional de la República

ANTONIO JOSÉ BRACK EGG
Ministro del Ambiente

PEDRO SÁNCHEZ GAMARRA
Ministro de Energía y Minas

ANEXO 01

**LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES
PARA LA DESCARGA DE EFLUENTES LÍQUIDOS DE
ACTIVIDADES MINERO - METALÚRGICAS**

Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el Promedio anual
pH		6 - 9	6 - 9
Sólidos Totales	en mg/L	50	25
Suspensión			
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

(*) En muestra no filtrada

- Los valores indicados en la columna "Límite en cualquier momento" son aplicables a cualquier muestra colectada por el Titular Minero, el Ente Fiscalizador o la Autoridad Competente, siempre que el muestreo y análisis hayan sido realizados de conformidad con el Protocolo de Monitoreo de Aguas y Efluentes del Ministerio de Energía y Minas; en este Protocolo se establecerán entre otros aspectos, los niveles de precisión, exactitud y límites de detección del método utilizado.

- Los valores indicados en la columna "Promedio anual" se aplican al promedio aritmético de todas las muestras colectadas durante el último año calendario previo a la fecha de referencia, incluyendo las muestras recolectadas por el Titular Minero y por el Ente Fiscalizador siempre que éstas hayan sido recolectadas y analizadas de conformidad con el Protocolo de Monitoreo de Aguas y Efluentes del Ministerio de Energía y Minas

533964-1

**COMERCIO EXTERIOR
Y TURISMO**

**Autorizan viaje de representante de
PROMPERÚ a la República Popular
China para participar en la Feria "Asia
Fruit Logística 2010"**

**RESOLUCIÓN SUPREMA
N° 103-2010-MINCETUR**

Lima, 20 de agosto de 2010

Visto el Oficio N° 301-2010-PROMPERU/SG, de la Secretaría General de la Comisión de Promoción del Perú para la Exportación y el Turismo - PROMPERÚ.

CONSIDERANDO:

Que, la Comisión de Promoción del Perú para la Exportación y el Turismo - PROMPERÚ, es un organismo público técnico especializado adscrito al Ministerio de Comercio Exterior y Turismo, competente para proponer y ejecutar los planes y estrategias de promoción de bienes y servicios exportables, así como de turismo interno y receptivo, promoviendo y difundiendo la imagen del Perú en materia turística y de exportaciones;

Que, PROMPERÚ, conjuntamente con cuatro empresas agroexportadoras y cinco gremios exportadores nacionales, han programado su participación en la Feria "ASIA FRUIT LOGÍSTICA 2010", organizado por la empresa Messe Berlin GmbH, a realizarse en la ciudad de Hong Kong, República Popular China, del 8 al 10 de setiembre del 2010, con el objetivo de promover las exportaciones de frutas y hortalizas frescas en el mercado asiático, a fin de consolidar nuestra presencia como país abastecedor de frutas y hortalizas de calidad;

Que, la participación de PROMPERÚ en este evento permitirá evaluar la participación de las empresas peruanas exportadoras en dicho mercado, así como conocer los aspectos de la cadena de comercialización y distribución de frutas y hortalizas entre las ciudades chinas de Hong Kong y Guangzhou;

Que, la Secretaría General de PROMPERÚ ha solicitado que se autorice el viaje del señor Víctor Germán Sarabia Molina, quien presta servicios en dicha entidad, para que en representación de PROMPERÚ, participe en la referida feria, realizando acciones de promoción de las exportaciones de importancia para el país y coordinando cuanto se refiere a la instalación del stand peruano;

Que, la Ley N° 29465, Ley de Presupuesto del Sector Público para el Año Fiscal 2010, prohíbe los viajes al exterior con cargo a recursos públicos, salvo los casos excepcionales que la misma Ley señala, entre ellos, los viajes que se efectúen en el marco de las acciones de promoción de importancia para el Perú, los que deben realizarse en categoría económica y ser autorizados por Resolución Suprema;

De conformidad con el Decreto de Urgencia N° 001-2010, la Ley N° 27790, de Organización y Funciones del

Anexo 3. Valores referenciales de efluentes para alcantarillado y aguas superficiales
D.S. N°003-2002-PRODUCE

Parámetros	Curtiembre (Alcantarillado)	Papel	
		Aguas superficiales	Alcantarillado
Grado de acidez o alcalinidad (pH)	6.5 – 9.5	-	-
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅), mg.L ⁻¹	1000	250	1000
Demanda Química de Oxígeno (DQO), mg.L ⁻¹	2500	1000	3000
Sólidos Suspendidos Totales (SST), mg.L ⁻¹	1000	-	-
Sulfuros, mg.L ⁻¹	10	-	-
Cromo (VI), mg.L ⁻¹	0.5	-	-
Cromo Total, mg.L ⁻¹	5	-	-
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₄), mg.L ⁻¹	50	-	-

*En curso: Se refiere a las actividades de las empresas de los subsectores curtiembre y papel que a la fecha de vigencia del presente Decreto Supremo se encuentran operando.

Fuente: DECRETO SUPREMO N°003-2002-PRODUCE.

Anexo 4. Taxonomía de la biomasa de cáscara de plátano.



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRONÓMICA
LABORATORIO DE TAXONOMÍA VEGETAL

CONSTANCIA

EL QUE SUSCRIBE JEFE DEL LABORATORIO DE TAXONOMÍA VEGETAL DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRONÓMICA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS DE LA U. N. A. PUNO, HACE CONSTAR QUE EL ESPECÍMEN BOTÁNICO PUESTO A LA VISTA PERTENECE A LA ESPECIE *Musa acuminata* Colla "Plátano de seda", "Bananero" que posee la siguiente Posición Taxonómica.

REINO Vegetal
SUB REINO Phanerogamae
DIVISIÓN Angiospermae
CLASE Monocotyledoneae
ÓRDEN Zingiberales
FAMILIA Musaceae
GÉNERO Musa
ESPECIE *Musa acuminata* Colla.

SE EXPIDE LA PRESENTE CONSTANCIA A PETICIÓN ESCRITA DE LA Srta. YENI PILAR PARI LUQUE EGRESADA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO-PUNO Y PARA LOS FINES QUE CREA CONVENIENTES.

PUNO, C.U. 24 de setiembre del 2019



G. MARIO A. SOLANO LARICO
Jefe Laboratorio Taxonomía Vegetal
FCA. UNA. - PUNO



Anexo 5. Resultado de análisis físico químico de la biomasa de cáscara de plátano



Universidad Nacional del Altiplano - Puno
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD ACREDITADA
LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD



Nº 001149

LQ - 2020

Certificado de Análisis

ASUNTO : Análisis Físico Químico de: CASCARA DE PLATANO
PROCEDENCIA : CASCARA DE PLATANO (*Musa acuminata* Colla), PUNO
INTERESADO : YENI PILAR PARI LUQUE
MOTIVO : CONTROL DE CALIDAD
MUESTREO : 02/01/2020, por el interesado
ANÁLISIS : 02/01/2020
COD. MUESTRA : B009-000217

CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS:

COLOR : Marron
OLOR Y SABOR : Característico al platano
CONSISTENCIA : Solida y seca

CARACTERÍSTICAS FÍSICO - QUÍMICAS

PARÁMETROS ANALIZADOS	RESULTADO	UNIDAD	MÉTODO DE ANÁLISIS
CENIZA	13.48	%	AOAC 923.03
FIBRA BRUTA	11.95	%	AOAC 978.10
GRASA	2.96	%	AOAC 920.85
HUMEDAD	9.00	%	AOAC 925.10
PROTEÍNA	7.88	%	AOAC 920.87
CARBOIDRATOS	54.73	%	-----
ENERGIA	244.29	Kcal/g de muestra	

Puno 27 de enero del 2020



Walter B. Apaza
DECANO - UNA

JSP

ING. LUZ MARINA TEVES PONCE
ANALISTA DEL LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD
FIQ - UNA - CEP - 162393

Ciudad Universitaria Av. Floral s/n Facultad de Ing. Química - Telefax: (051) 366190

Anexo 6.Resultado de análisis por Rayos Infrarrojos de la cáscara de plátano (CP)



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE CIENCIAS
LABICER (Laboratorio N° 12)
ANÁLISIS QUÍMICO, CONSULTORÍA E INVESTIGACIÓN



INFORME TÉCNICO N° 0043 – 20 – LABICER

1. DATOS DEL SOLICITANTE
 - 1.1 NOMBRE DEL SOLICITANTE : YENI PILAR PARI LUQUE
 - 1.2 DNI : 40713803
2. CRONOGRAMA DE FECHAS
 - 2.1 FECHA DE EMISIÓN : 10 / 01 / 2020
3. ANÁLISIS SOLICITADO : ANÁLISIS QUÍMICO EN MUESTRA DE CÁSCARA DE PLÁTANO
4. DATOS REFERENCIALES DE LA MUESTRA SEGÚN EL SOLICITANTE
 - 4.1 IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA : 01 MUESTRA DE CÁSCARA DE PLÁTANO "MUSA ACUMINATA COLLA"
5. LUGAR DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA: LABORATORIO LABICER - FACULTAD DE CIENCIAS
6. CONDICIONES AMBIENTALES : Temperatura: 25°C; Humedad relativa: 62%
7. EQUIPO UTILIZADO : Espectrofotómetro Infrarrojo. PERKIN ELMER, FRONTIER.
8. RESULTADOS

ANÁLISIS	RESULTADO	MÉTODO UTILIZADO
Espectrofotometría Infrarroja	El perfil espectroscópico de la muestra de cáscara de plátano, evidencia picos correspondientes a los siguientes grupos funcionales: O-H, C=C, C-H, C-O. <i>Ver espectro en Anexo</i>	Espectrofotometría Infrarroja por reflectancia total atenuada

9. VALIDEZ DEL INFORME TÉCNICO
Los resultados de este Informe técnico son válidos solo para la muestra proporcionada por el solicitante del servicio en las condiciones indicadas del presente informe técnico.

Bach. Natalia Quispe
Analista Químico
LABICER – UNI

M.Sc. Otilia Acha de la Cruz
Jefe de Laboratorio
Firmado por:
Ing. Sebastián Lazo Ochoa
CIP 74236

(*) El Laboratorio no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra.

ANEXO

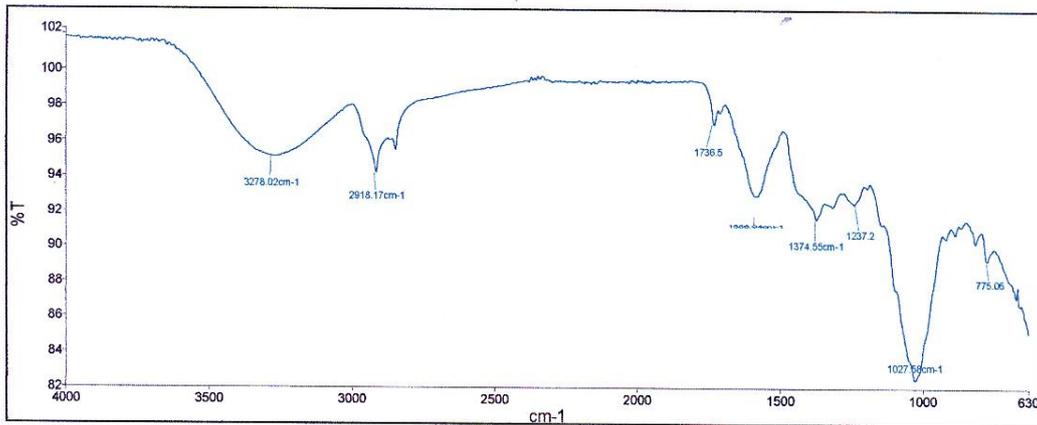


Figura 1. ESPECTRO INFRARROJO DE LA MUESTRA DE CÁSCARA DE PLÁTANO "MUSA ACUMINATA COLLA"

Tabla 1. ASIGNACIÓN DE PICOS DEL ESPECTRO INFRARROJO DE LA MUESTRA

Picos característicos de la muestra (cm ⁻¹)	Grupo Funcional	Modo de vibración	Rango de absorción (cm ⁻¹)
3278.02	O - H	Tensión (fuerte)	3000 - 3700
2918.17	C - H	Vibración del grupo - CH	2935 - 2915
1736.50	C=O	Vibración de tensión	~ 1725
1586.94	C = C	Tensión (medio-débil)	1675 - 1600
	N - H	Flexión (banda ancha)	1640 - 1560
1374.55	C - H	Tensión (débil)	1350 - 1000
1237.20	CH ₃	Tensión (débil)	~ 1200
1027.58	C - O	Tensión (fuerte)	1320 - 1000
	= C - H	Flexión fuera del plano	100 - 650



Anexo 7. Resultado de análisis por Rayos Infrarrojos de la cáscara de plátano (CPA)



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE CIENCIAS
LABICER (Laboratorio N° 12)
ANÁLISIS QUÍMICO, CONSULTORÍA E INVESTIGACIÓN



INFORME TÉCNICO N° 0044 – 20 – LABICER

1. DATOS DEL SOLICITANTE
 - 1.1 NOMBRE DEL SOLICITANTE : YENI PILAR PARI LUQUE
 - 1.2 DNI : 40713803
2. CRONOGRAMA DE FECHAS
 - 2.1 FECHA DE EMISIÓN : 10 / 01 / 2020
3. ANÁLISIS SOLICITADO : ANÁLISIS QUÍMICO EN MUESTRA DE CÁSCARA DE PLÁTANO ACTIVADA
4. DATOS REFERENCIALES DE LA MUESTRA SEGÚN EL SOLICITANTE
 - 4.1 IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA : 01 MUESTRA DE CÁSCARA DE PLÁTANO ACTIVADA "MUSA ACUMINATA COLLA"
5. LUGAR DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA: LABORATORIO LABICER - FACULTAD DE CIENCIAS
6. CONDICIONES AMBIENTALES : Temperatura: 25°C; Humedad relativa: 62%
7. EQUIPO UTILIZADO : Espectrofotómetro Infrarrojo. PERKIN ELMER, FRONTIER.
8. RESULTADOS

ANÁLISIS	RESULTADO	MÉTODO UTILIZADO
Espectrofotometría Infrarroja	El perfil espectroscópico de la muestra de cáscara de plátano activada, evidencia picos correspondientes a los siguientes grupos funcionales: O-H, C=C, C-H, C-O. <i>Ver espectro en Anexo</i>	Espectrofotometría Infrarroja por reflectancia total atenuada

9. VALIDEZ DEL INFORME TÉCNICO
Los resultados de este Informe técnico son válidos solo para la muestra proporcionada por el solicitante del servicio en las condiciones indicadas del presente informe técnico.

Bach. Natalia Quispe
Analista Químico
LABICER – UNI



M.Sc. Otilia Acha de la Cruz
Jefe de Laboratorio
Firmado por:
Ing. Sebastián Lazo Ochoa
CIP 74236

(*) El Laboratorio no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra.

ANEXO

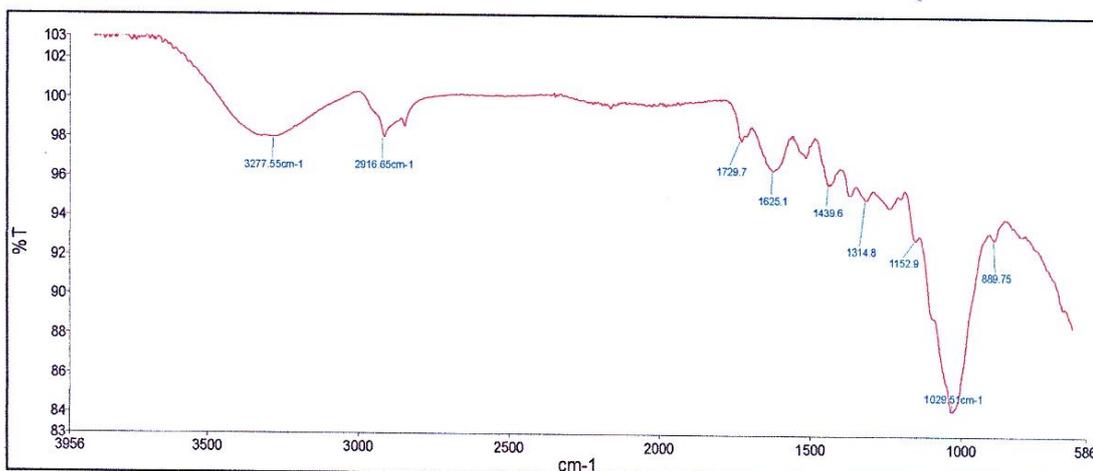


Figura 1. ESPECTRO INFRARROJO DE LA MUESTRA DE CÁSCARA DE PLÁTANO ACTIVADA "MUSA ACUMINATA COLLA"

Tabla 1. ASIGNACIÓN DE PICOS DEL ESPECTRO INFRARROJO DE LA MUESTRA

Picos característicos de la muestra (cm ⁻¹)	Grupo Funcional	Modo de vibración	Rango de absorción (cm ⁻¹)
3277.55	O - H	Tensión (fuerte)	3000 - 3700
2916.65	C - H	Vibración del grupo - CH	2935 - 2915
1729.70	C=O	Vibración de tensión	~ 1725
1625.10	C = C	Tensión (medio-débil)	1675 - 1600
	N - H	Flexión (banda ancha)	1640 - 1560
1439.60	C - H	Tensión (débil)	1350 - 1000
1029.51	C - O	Tensión (fuerte)	1320 - 1000
	= C - H	Flexión fuera del plano	100 - 650



Anexo 8. Resultado de análisis de Cr (VI) de Laboratorios Analíticos del Sur



Laboratorios Analíticos del Sur

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN DEL
INACAL CON REGISTRO N° LE-050



Registro N° LE - 050

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-19-00685

Fecha de emisión : 23/12/2019

Página 1 de 3

Señores : PARI LUQUE YENI PILAR
Dirección : JR LAMPA 600 PUNO
Atención : PARI LUQUE, YENI PILAR
Proyecto : BIOSORCION DE Cr VI

PROTOCOLO DE MUESTREO

Muestreo realizado por : Cliente : YENI PILAR PARI LUQUE
Registro de muestreo : 495-19
Procedimiento Aplicado : Muestreado por el cliente

Fecha de recepción : 20/12/2019
Fecha de ensayo : 20/12/2019
Nro de muestras : 20

Cod. Interno L.A.S.	(c) Nombre de muestra	(c) Matriz de la muestra	(c) Zona, Urb, AAHH/Dist/Prov/Depart.	(c) Punto de muestreo y/o coordenadas	(c) Fecha de inicio de muestreo	(c) Hora de inicio de muestreo
AG19001267	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-01	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FIQ / PUNO / PUNO	FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD	19/12/2019	15:00
AG19001268	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-02	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FIQ / PUNO / PUNO	FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD	19/12/2019	15:10
AG19001269	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-03	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FIQ / PUNO / PUNO	FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD	19/12/2019	15:20
AG19001270	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-04	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FIQ / PUNO / PUNO	FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD	19/12/2019	15:30
AG19001271	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-05	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FIQ / PUNO / PUNO	FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD	19/12/2019	15:30
AG19001272	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-06	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FIQ / PUNO / PUNO	FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD	19/12/2019	15:55
AG19001273	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-07	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FIQ / PUNO / PUNO	FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD	19/12/2019	16:05
AG19001274	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-08	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FIQ / PUNO / PUNO	FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD	19/12/2019	16:10
AG19001275	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-09	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FIQ / PUNO / PUNO	FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD	19/12/2019	16:20
AG19001276	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-10	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FIQ / PUNO / PUNO	FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD	19/12/2019	16:23
AG19001277	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-11	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FIQ / PUNO / PUNO	FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD	19/12/2019	16:25
AG19001278	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-12	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FIQ / PUNO / PUNO	FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD	19/12/2019	16:25
AG19001279	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-13	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FIQ / PUNO / PUNO	FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD	19/12/2019	16:30
AG19001280	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-14	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FIQ / PUNO / PUNO	FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD	19/12/2019	16:35
AG19001281	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-15	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FIQ / PUNO / PUNO	FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD	19/12/2019	16:40
AG19001282	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-16	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FIQ / PUNO / PUNO	FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD	19/12/2019	16:40
AG19001283	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-17	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FIQ / PUNO / PUNO	FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD	19/12/2019	16:47
AG19001284	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-18	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FIQ / PUNO / PUNO	FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD	19/12/2019	16:47
AG19001285	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-19	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FIQ / PUNO / PUNO	FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD	19/12/2019	16:50
AG19001286	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-20	Agua de Proceso - Agua Purificada	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FIQ / PUNO / PUNO	FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD	19/12/2019	16:55

(c) : datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Condiciones de recepción de la muestra Cooler refrigerado
Observación -

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Omar A. Juárez Soto
Gerente de Operaciones

"<Valor numérico" = Límite de detección del método, "<Valor Numérico" = Límite de cuantificación del método. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de productos como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados solo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Parque Industrial Rio Seco C - 1 Cerro Colorado - Arequipa - Perú
Teléfono (054) 443294 Fax (054) 444582 www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

N° 10358



Laboratorios Analíticos del Sur

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN DEL
INACAL CON REGISTRO N° LE-050



Registro N° LE - 050

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-19-00685

Fecha de emisión : 23/12/2019

Página 2 de 3

RESULTADOS DE ENSAYO FISICO QUIMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	827
		Cr VI mg/L
AG19001267	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-01	2,67
AG19001268	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-02	4,69
AG19001269	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-03	0,794
AG19001270	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-04	4,76
AG19001271	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-05	1,297
AG19001272	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-06	4,69
AG19001273	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-07	0,080
AG19001274	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-08	4,56
AG19001275	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-09	0,253
AG19001276	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-10	4,71
AG19001277	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-11	4,69
AG19001278	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-12	4,30
AG19001279	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-13	4,57
AG19001280	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-14	4,05
AG19001281	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-15	4,10
AG19001282	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-16	4,31
AG19001283	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-17	3,35
AG19001284	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-18	4,38
AG19001285	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-19	3,95
AG19001286	SOLUCIONES ACUOSAS DE Cr VI M-20	3,12

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Omar A. Juárez Soto
Gerente de Operaciones
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

™<Valor numérico> = Límite de detección del método, ™<Valor Numérico> = Límite de cuantificación del método.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados solo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Parque Industrial Río Seco C - 1 Cerro Colorado - Arequipa - Perú
Teléfono (054) 443294 Fax (054) 444582 www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

Nº 10359

Anexo 9. Determinación de Cromo Hexavalente

DETERMINACIÓN DE CROMO HEXAVALENTE Zhang (2007)

REACTIVOS

Solución estándar de cromo (1 mL = 5 µg Cr): Diluir 10 mL de solución Stock de cromo (141.4 mg K₂Cr₂O₇ en 1L; 1 mL = 50 µg Cr) en 100 mL.

Solución de Permanganato de Potasio: Disolver 4 g de KMnO₄ en 100 mL de agua.

Solución de Difenilcarbazida: Disolver 250 mg de 1,5-difenilcarbazida en 50 mL de acetona. Esta solución por ser inestable, se debe mantener en una refrigeradora y descartar cuando la solución se decolore.

H₂SO₄ 6N: Diluir 16.70 mL de H₂SO₄ concentrado en 100 mL

PROCEDIMIENTO:

En matraces Erlenmeyer de 100 mL transferir volúmenes de 0, 5, 10, 15 y 20 mL de solución estándar de cromo (5 µg.mL⁻¹), los cuales corresponden a 0 - 100 µg Cr respectivamente. Adicionar 2 gotas de H₂SO₄ 6N para acidificar; y añadir agua hasta enrase a 100 mL.

Adicionar 2 mL de solución de difenilcarbazida en cada matraz. Al final el volumen es 102 mL. Tapar, mezclar y dejar en reposo por 15 minutos para que desarrolle color rojo - violeta.

Medir la absorbancia (A) a una longitud de onda de 540 nm. Construir curva de calibración estándar, trazando valores de absorbancia contra microgramos de cromo en 102 mL de volumen final. Hacer análisis de regresión para obtener los coeficientes de regresión (µg Cr en X, absorbancia en Y).

Para muestras desconocidas, proceder de la misma forma descrita anteriormente, registrar la lectura de absorbancia y utilizar la curva de calibración estándar. Se calcula la concentración de Cr de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$mg Cr/L = \frac{\mu g Cr (en 102 mL volumen final)}{V}$$

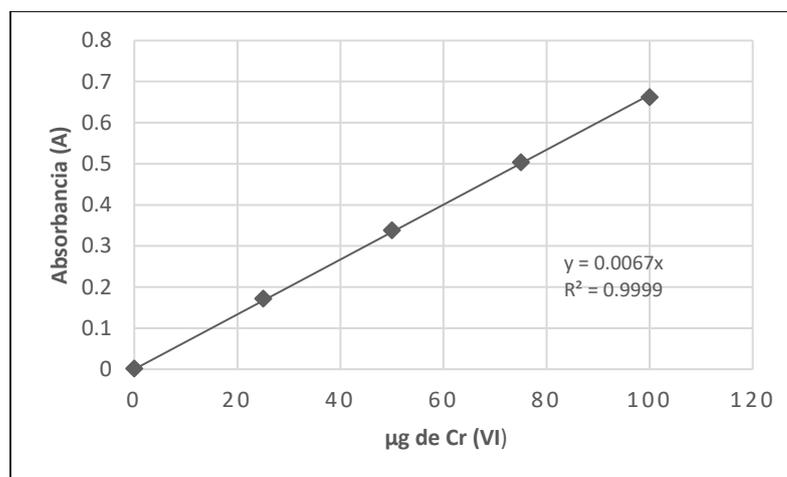
Donde: V= mL muestra original

Resultados de la lectura de absorbancia

$\mu\text{g Cr (VI)}$	Absorbancia
0	0.002
25	0.172
50	0.338
75	0.504
100	0.662

Anexo 10. Curva de calibración estándar de Cromo (VI)

A. Curva de calibración



B. Desarrollo del color para la curva de calibración de Cr (VI)



Anexo 11. Imágenes de la parte experimental del presente trabajo de investigación



Cáscara de plátano "*Musa acuminata colla*" - Proceso de secado



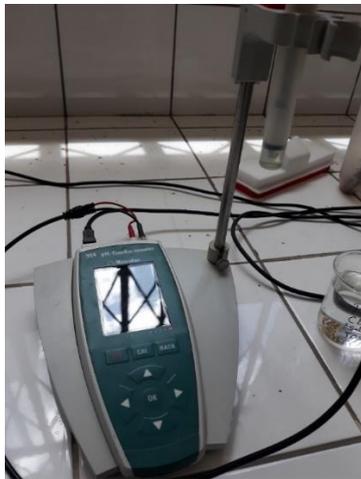
Proceso de molido



Tamizado por tamaño de partícula de 500 μm , 250 μm , 125 μm , 63 μm y 45 μm



Proceso de impregnación química con HNO_3 0.10 M - Secado



Ajuste de pH



Proceso de biosorción



Filtrado de muestras



Preparación de muestras para análisis de Cr (VI)



Lectura de Cr (VI) en Espectrofotómetro



Muestra de agua residual

Anexo 12. Constancia de uso de laboratorio para el desarrollo experimental



Universidad Nacional Del Altiplano - Puno
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA
ACREDITADA

(Resolución de Presidencia del Consejo Directivo AD-HOC Nro. 210-2016 SINEACE/CDAH-P)



CONSTANCIA

EL DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO.

HACE CONSTAR:

Que la Srta. **YENI PILAR PARI LUQUE**, ha utilizado instalaciones del Laboratorio de Control de Calidad y otros de esta Facultad, desde el 11 de diciembre al 17 de enero 2020; para el desarrollo experimental de su trabajo de tesis de investigación intitulado "BIOSORCIÓN DEL CROMO HEXAVALENTE EN SOLUCIONES ACUOSAS UTILIZANDO BIOMASA DE CÁSCARA DE PLÁTANO (*Musa acuminata* Colla)", haciendo uso de materiales y equipos para los análisis correspondientes.

Se expide la presente constancia a solicitud de la interesada, para los fines que vea conveniente.

Puno, 31 de enero del 2020

Walter B. Aparicio Córdova, Ph.D.
DECANO IQ - UNA

C.c.
Archivo '20
ETP/rva