



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DE CÁSCARA DE AGUACATE
(*persea americana*) VARIEDAD HASS PARA LA REMOCIÓN DEL Cr (VI)_{ac}**

Mildred María Elena Zúñiga Socop
Asesorada por el Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez

Guatemala, septiembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DE CÁSCARA DE AGUACATE
(*persea americana*) VARIEDAD HASS PARA LA REMOCIÓN DEL Cr (VI)_{ac}**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MILDRED MARÍA ELENA ZÚÑIGA SOCO
ASESORADA POR EL ING. VÍCTOR MANUEL MONZÓN VALDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. César Ariel Villela Rodas
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lémus
EXAMINADOR	Ing. Jorge Rodolfo García Carrera
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DE CÁSCARA DE AGUACATE
(*persea americana*) VARIEDAD HASS PARA LA REMOCIÓN DEL Cr (VI)_{ac}**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 18 de julio de 2019.

Mildred María Elena Zúñiga Socop

Guatemala, 14 de abril de 2021

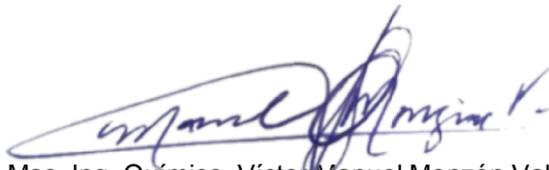
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Presente

Estimado Ingeniero Williams Guillermo Álvarez:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y aprobado el informe final del trabajo de graduación titulado: "**APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DE CÁSCARA DE AGUACATE (*persea americana*) VARIEDAD HASS PARA LA REMOCIÓN DE Cr (VI)_{ac}**", elaborado por la estudiante de Ingeniería Química, **Mildred María Elena Zúñiga Socop**, quien se identifica con el registro académico **2014-04277** y con el CUI No. **3222 65886 0801**.

Agradeciendo su atención a la presente, me suscribo de usted.

Atentamente,



Msc. Ing. Químico. Víctor Manuel Monzón Valdez
Colegiado No. 656
ASESOR
Escuela de Ingeniería Química, FIUSAC



Guatemala, 06 de junio de 2021.
Ref. EIQ.TG-IF.019.2021.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **015-2019**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Mildred María Elena Zúñiga Socop**.
Identificado con número de camé: **3222658860801**.
Identificado con registro académico: **201404277**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.
En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SOLIDOS DE CÁSCARA DE AGUACATE (*persea americana*) VARIEDAD HASS PARA LA REMOCIÓN DEL Cr (VI)ac

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Víctor Manuel Monzón Valdez, profesional de la Ingeniería Química

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. M. Sc. Ingrid Lorena Benítez P.
Química
Ingrid Lorena Benítez Paolillo
Maestría en Ciencia y Tecnología
profesional de la Q. de Medio Ambiente
Colegiado No. 1974
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo



Guatemala, 23 de septiembre de 2021
Ref. EIQ.185.2021

Aprobación del informe final del trabajo de graduación

Ingeniera
Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO **APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DE CÁSCARA DE AGUACATE (*persea americana*) VARIEDAD HASS PARA LA REMOCIÓN DEL Cr (VI)ac** del(la) estudiante Mildred María Elena Zúñiga Socop, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Química.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Williams C. Alvarez Mejia, M.I.C. M.U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Cc. Archivo
WGAM/wgam



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939



**NO SALGAS
QUÉDATE EN
CASA**

DTG. 444-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DE CÁSCARA DE AGUACATE (persea americana) VARIEDAD HASS PARA LA REMOCIÓN DEL Cr (VI)_{ac}**, presentado por la estudiante universitaria: **Mildred María Elena Zúñiga Socop**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, septiembre de 2021

AACE/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por siempre haber estado conmigo mostrándome su infinito amor y misericordia.
- San Miguel Arcángel** Por brindarme siempre su protección.
- Mi padre** Rigoberto Zúñiga, por ser un padre ejemplar, brindarme su amor y apoyo; por ser su única hija y siempre consentirme. Nada de esto sería posible sin usted, mi ejemplo a seguir y mi eterno amor.
- Mi madre** Mildred Socop, por darme su amor incondicional como solo una madre lo sabe hacer; por las oraciones dirigidas hacia mi persona, por la paciencia y comprensión y, sobre todo, por ser mi mami, y el alma de la familia.
- Mis hermanos** Rigo, Elder y Camilo Zúñiga Socop, por todo el amor y paciencia que me han brindado hasta el día de hoy; por las risas y alegrías compartidas, las peleas de hermanos, y todos los momentos juntos que me han hecho ser la persona que soy. Por ser yo el ejemplo a seguir para que un día ustedes puedan llegar hasta este lugar y cumplir cada una de sus metas y anhelos.

Mis abuelitos

Juan Zúñiga y María Morales, por mantenerse saludables y compartir conmigo esta fecha especial y, sobre todo, el apoyo y amor incondicional que me han brindado desde que nací hasta el día de hoy.

Familia en general

A mis tíos por las palabras de ánimo brindadas.

Mis amigos

Por todos los momentos que hemos compartido, porque sin ustedes mi vida universitaria no hubiese sido la misma, por acompañarme en los momentos difíciles y fáciles de la carrera, por brindarme siempre su mano cuando la necesité y porque seguimos juntos, a pesar de todo.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por todas las bendiciones derramadas hacia mi persona y familia.
Mis padres	Por su amor y apoyo incondicional.
Mis hermanos	Por ser quienes son y quererme como soy.
Mis abuelitos	Por su amor.
Familia Zúñiga Jiménez	Mis tíos, por el cariño y apoyo brindado, en mis años de universidad.
Mi asesor y revisora	Ing. Víctor Monzón y Licda. Ingrid Benítez, por el tiempo y paciencia que me brindaron durante este proceso.
Al equipo del cubículo	Inga. Adela Marroquín, Inga. Cinthya Ortiz, Inga. Mercedes Roquel e Ing. Gerardo Ordoñez por brindarme siempre la ayuda que necesité.
Amigos de carrera	Dulce Quezada, Ana Lucía Can, Josué Sales, Blanqui Ángel, Evelyn Toxcón.
Escuela de Ingeniería Química	Por todos los conocimientos brindados.

Facultad de Ingeniería

Por formar mi carrera profesional.

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser una excelente casa de estudios.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
HIPOTESIS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Aguacate	3
2.2. Metales pesados	3
2.3. Características del cromo	4
2.3.1. Toxicidad del cromo (VI) en la salud.....	5
2.3.2. Toxicidad del cromo (VI) para el medio ambiente.....	6
2.4. Biosorción.....	7
2.4.1. Mecanismos de biosorción	9
2.4.2. Factores que afectan al mecanismo de biosorción	10
2.4.2.1. Influencia de la temperatura	10
2.4.2.2. Influencia del pH.....	11
2.4.2.3. Influencia del tamaño de partícula del material biosorbente	11

2.5.	Adsorción sobre cáscara de aguacate como material biosorbente	12
3.	MARCO METODOLÓGICO	13
3.1.	Variables	13
3.1.1.	Variables independientes	13
3.1.2.	Variables dependientes	13
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	14
3.2.1.	Área de conocimiento.....	14
3.2.2.	Proceso	15
3.2.3.	Lugar	15
3.3.	Recursos humanos disponibles	15
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	15
3.4.1.	Equipos	16
3.4.1.1.	Equipos de medición	16
3.4.1.2.	Equipo auxiliar.....	16
3.4.2.	Instrumentos de laboratorio y cristalería	16
3.4.3.	Materia prima y reactivos	17
3.5.	Técnicas cualitativas o cuantitativas	17
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	17
3.6.1.	Procedimiento para el acondicionamiento del material biosorbente de cáscara de aguacate.....	18
3.6.2.	Procedimiento para la remoción de cromo (VI)	18
3.6.2.1.	Obtención de las muestras que contienen Cr (VI)	18
3.6.2.2.	Determinación de cantidad de cromo hexavalente inicial	18
3.6.3.	Procedimiento de captación del cromo (VI) mediante biosorción	19

3.6.4.	Análisis de las soluciones acuosas cromadas a la finalización del procedimiento de captación del metal mediante la utilización de cáscara de aguacate.....	20
3.6.4.1.	Determinación de concentración de cromo hexavalente	20
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	21
3.8.	Análisis estadístico	23
3.8.1.	Estadística inferencial.....	23
3.8.2.	Estadística descriptiva	24
3.8.3.	Plan de análisis de los resultados.....	26
3.8.3.1.	Programas por utilizar para el análisis de datos.....	26
4.	RESULTADOS	27
4.1.	Acondicionamiento del material biosorbente	27
4.2.	Efecto tiempo de contacto	28
4.3.	Efecto tamaño de partícula.....	29
4.3.1.	Análisis estadístico del porcentaje de remoción de Cr _(VI) en función del tamaño de partícula y el tiempo de contacto	30
4.4.	Área de contacto	40
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	41
	CONCLUSIONES	53
	RECOMENDACIONES.....	55
	BIBLIOGRAFÍA.....	57

APÉNDICES.....61
ANEXOS.....75

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Cáscara de Aguacate variedad Hass como material biosorbente.....	8
2.	Porcentaje de remoción de Cr _(VI) en función del tiempo de contacto para diferentes tamaños de partículas a 25 °C	28
3.	Porcentaje de remoción de Cr _(VI) en función del tamaño de partícula para diferentes tiempos de contacto a 25 °C	29
4.	Prueba de igualdad de varianzas del porcentaje de remoción de Cr _(VI) en función del tamaño de partícula (µm) y el tiempo de contacto (min) .	31
5.	Comparaciones por parejas de la prueba de Tukey para el tamaño de partícula (µm)	32
6.	Comparaciones por parejas de la prueba de Tukey para el tiempo de contacto (min)	33
7.	Gráfica de línea ajustada para el porcentaje de remoción de Cr _(VI) en función del tamaño de partícula (µm).....	34
8.	Gráfica de probabilidad de residuos para el porcentaje de remoción, tamaño de partícula (µm)	35
9.	Gráfica de valores atípicos de residuos, prueba de Grubbs para el porcentaje de remoción, tamaño de partícula	36
10.	Gráfica de línea ajustada para el porcentaje de remoción de Cr _(VI) en función del tiempo de contacto (min)	37
11.	Gráfica de probabilidad de residuos para el tiempo de remoción, tiempo de contacto.....	38
12.	Gráfica de valores atípicos de residuos, prueba de Grubbs para el porcentaje de remoción, tiempo de contacto.....	39

TABLAS

I.	VARIABLES INDEPENDIENTES.....	13
II.	VARIABLES DEPENDIENTES.....	14
III.	Datos de Concentración posterior al filtrado con el biosorbente de cáscara de aguacate variedad Hass con tamaño de partícula 424 μm .	21
IV.	Datos de concentración posterior a filtrado con el biosorbente de cáscara de aguacate variedad Hass con tamaño de partícula 250 μm .	21
V.	Datos de concentración posterior a filtrado con el biosorbente de cáscara de aguacate variedad Hass con tamaño de partícula 180 μm .	22
VI.	Datos de concentración posterior a filtrado con el biosorbente de cáscara de aguacate variedad Hass con tamaño de partícula 150 μm .	22
VII.	Criterio para análisis estadístico.....	23
VIII.	Condiciones físicas de la cáscara de aguacate variedad Hass como material biosorbente.....	27
IX.	Clasificación del tamaño de partícula de la cáscara de aguacate variedad Hass como material biosorbente.....	27
X.	Análisis de varianza.....	30
XI.	Prueba de igualdad de varianzas del porcentaje de remoción sobre $\text{Cr}_{(\text{VI})}$ en función del tamaño de partícula (μm) y el tiempo de contacto (min).....	30
XII.	Comparaciones por parejas de Tukey: tamaño de partícula (μm)	32
XIII.	Comparaciones por parejas de Tukey: tiempo (min)	33
XIV.	Valores del área de adsorción y porcentaje de remoción sobre $\text{Cr}_{(\text{VI})}$ para un tiempo de contacto de 10 min.....	40

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<i>Abs</i>	Absorbancia
<i>A_{ad}</i>	Área de adsorción
<i>C_v</i>	Coefficiente de variación
σ	Desviación estándar
<i>S</i>	Desviación estándar
<i>F_c</i>	F crítica
<i>F_{Fisher}</i>	F de Fisher
<i>GL</i>	Grados de libertad
<i>H₁</i>	Hipótesis alternativa
<i>H₀</i>	Hipótesis nula
<i>M</i>	Media
α	Nivel de significancia
<i>N₁</i>	Niveles estadísticos
<i>N</i>	Número de datos
<i>P</i>	Probabilidad
<i>G</i>	Probabilidad de Grubbs
<i>P_{Levene}</i>	Probabilidad de Levene
<i>H₁</i>(%)	Porcentaje final de humedad
<i>H₀</i>(%)	Porcentaje inicial de humedad
%R	Porcentaje de Remoción de cromo hexavalente
<i>R²</i>	R cuadrado

t_p	Tamaño de partícula
T	Temperatura
t	Tiempo
t_s	Tiempo de secado
x_i	Valor de la muestra
\bar{x}	Valor promedio
σ^2	Varianza

GLOSARIO

Absorbancia	Medida que refleja cómo se atenúa la radiación cuando atraviesa una solución concentrada.
Adsorbato	Sustancia adsorbida en la superficie de un adsorbente.
Biosorción	Término que describe la eliminación de metales pesados por la unión pasiva a biomasa no viva a partir de soluciones acuosas.
Concentración	Proporción o relación másica que hay entre la cantidad de soluto y la cantidad másica o volumétrica de disolvente.
Espectrofotometría	Medición de la cantidad de energía radiante que absorbe un sistema químico en función de la longitud de onda; es el método de análisis óptico más usado en las investigaciones bioquímicas y síntesis químicas.
Ph	Valor que representa convencionalmente la concentración de iones de hidrógeno de una solución acuosa.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación consistió en la evaluación del porcentaje de remoción mediante el aprovechamiento de la cáscara de aguacate (*persea americana*) variedad Hass, de cromo hexavalente en solución acuosa, a nivel laboratorio, mediante análisis espectrofotométricos.

Se acondicionó la cáscara de aguacate (*persea americana*) variedad Hass como material biosorbente, por medio de un lavado, secado y tamizado. Posteriormente se agregaron diferentes cantidades del biosorbente a las soluciones de desechos que contenían Cr (VI)ac y se evaluó la capacidad de remoción mediante el efecto de tamaño de partícula y tiempo de contacto. Seguidamente se filtraron las soluciones y se evaluó el porcentaje de remoción.

Se realizó una curva de calibración de dicromato de potasio, a diferentes concentraciones, con el fin de utilizarla, junto a análisis espectrofotométricos, para la determinación de la concentración de cromo hexavalente presente en la muestra.

Al obtener los resultados se determinó el porcentaje de remoción del Cr (VI)ac teniendo como material biosorbente la Cáscara de aguacate (*persea americana*) variedad Hass. Con base en ellos, se determinó a qué tamaño de partícula, y tiempo de contacto es más eficiente y si es viable la utilización del biosorbente para la aplicación sujeta a estudiar.

Los resultados del estudio muestran que fue posible alcanzar un máximo valor de 70,945 % de rendimiento de remoción sobre cromo hexavalente de la solución inicial, al realizar el proceso de biosorción a un tamaño de partícula de 150 μm y a un tiempo de 10 minutos.

Mediante el análisis de ANOVA y con ayuda de la prueba de Levene se aceptaron las hipótesis alternativas que indican que si existe una diferencia significativa en el porcentaje de remoción sobre cromo hexavalente al variar el tamaño de partícula y el tiempo de contacto.

OBJETIVOS

General

Aprovechar los residuos sólidos del aguacate (cáscara) (*persea americana*) variedad Hass para la remoción del Cr (VI)ac.

Específicos

1. Acondicionar el material para obtener un biosorbente de metales pesados a partir de la cáscara de aguacate variedad Hass.
2. Determinar el efecto del tiempo de contacto del biosorbente de cáscara de aguacate (*persea americana*) variedad Hass, sobre la remoción de Cr (VI)ac.
3. Evaluar el efecto tamaño de partícula sobre la capacidad biosortiva.
4. Determinar el área de adsorción del biosorbente de cáscara de aguacate (*persea americana*) variedad Hass.

HIPÓTESIS

Sí es posible remover eficientemente el cromo hexavalente contenido en soluciones de desechos acuosos alcalinos mediante la cáscara de aguacate variedad Hass, previamente acondicionado.

Hipótesis estadística

Tiempo de contacto

Hipótesis nula (H_0): No existe diferencia significativa en el porcentaje de remoción de cromo hexavalente al variar el tiempo de contacto entre el material biosorbente y las soluciones de desechos acuosos.

Hipótesis alternativa (H_1): Sí existe diferencia significativa en el porcentaje de remoción de cromo hexavalente al variar el tiempo de contacto entre el material biosorbente y las soluciones de desechos acuosos.

Tamaño de partícula de material biosorbente.

Hipótesis nula (H_0): no existe diferencia significativa en el porcentaje de remoción de cromo hexavalente al variar el tamaño de partícula del material biosorbente.

Hipótesis alternativa (H_1): sí existe diferencia significativa en el porcentaje de remoción de cromo hexavalente al variar el tamaño de partícula del material biosorbente.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, los metales pesados se encuentran presentes en suelos, agua y efluentes industriales. Son producidos principalmente por las actividades antropogénicas, tales como las realizadas en las industrias metalúrgica, agrícola y la manufacturera, debido a que son ampliamente utilizados en la galvanoplastia, pulido de metales, tintas, colorantes, partes automotrices, curtido de pieles, manufactura de compuestos químicos, catálisis y muchas otras actividades industriales.

Se obtendrá los desechos de ensayos realizados anteriormente en donde se encuentran en solución cromo (III) y cromo (IV).

Es importante la remoción del cromo hexavalente del medio ambiente, especialmente de las aguas residuales industriales, para disminuir la contaminación ambiental. Desde un punto de vista medioambiental, resulta interesante obtener un material partiendo de materias primas verdes o de procesos que involucren menor inversión económica, como lo es la cáscara de aguacate.

La biosorción es una tecnología potencial para la detoxificación de aguas contaminadas con metales pesados como el cromo hexavalente. Esta técnica implica la remoción del Cr (VI)_{ac} presente mediante el uso de materiales biológicos no vivos o no activos metabólicamente, a los que se les denomina “biosorbentes”. Por este motivo se han investigado diferentes procedimientos para la evaluación de la cáscara de aguacate como biosorbente.

1. ANTECEDENTES

En Guatemala no se han llevado a cabo investigaciones sobre la capacidad biosortiva de la cáscara de aguacate en la eliminación de metales pesados en aguas industriales. Esta investigación será de gran ayuda como un paso exploratorio para la descontaminación de este tipo de aguas mediante una solución favorable al medio ambiente.

La búsqueda de los respectivos antecedentes del tema se basó en proyectos o estudios realizados con anterioridad en otros países, los cuales consisten en el acondicionamiento de cáscara de aguacate para la remoción de carga contaminante, provocada por metales pesados (tales como el cromo hexavalente), en soluciones acuosas.

En el año 2010, Netzahuatl-Muñoz, Alma Rosa; Pineda-Camacho, Gabriela; Barragán-Huerta, Blanca Estela; Cristiani-Urbina, Eliseo del Centro Nacional de Investigaciones Científicas, la Habana, Cuba, redactaron un artículo científico titulado *Evaluación de la cáscara del aguacate para la remoción de cromo hexavalente y cromo total de soluciones acuosas*. La investigación tenía como objetivo evaluar el potencial de la cáscara del aguacate variedad Hass para remover cromo hexavalente [Cr (VI)] y cromo total de soluciones acuosas. La cáscara de aguacate fue capaz de transformar químicamente al menos parte del Cr (VI) inicialmente presente en la solución acuosa a Cr (III). Asimismo, la cáscara del aguacate removió parte del cromo total indicando que posee la capacidad de biosorberlo.

En el 2015, Ángeles C., Carranza R., Días A., Chuquimajo J., y Beca V. de la Universidad Nacional del Callo realizaron un estudio científico titulado *Bioadsorción de cromo (VI) a partir de aglomerados de Palta*, en donde se comprobó la capacidad de bioadsorción de cromo (VI) en solución acuosa mediante pellets de distintos tamaños de partículas elaboradas con la cáscara de aguacate variedad Hass, comprobando así que a 400 μm se obtuvo una mayor área de contacto y, por lo tanto, de bioadsorción.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Aguacate

El aguacate (*persea americana*) es un árbol originario de México y Guatemala perteneciente a la familia de las lauráceas. Su fruto, comestible, se conoce como aguacate, palta, cura, avocado o abacate. Se divide en tres "razas": mexicana, guatemalteca y antillana.

Estas tres razas de *P. americana*, desde la antigüedad se fueron mezclando naturalmente entre ellas por medio de su propio sistema de reproducción.

El resultado de estas fusiones, producidas por medio de polinización cruzada, dieron origen a incontables variedades, híbridas naturales indefinidas. Todas estas nuevas variedades funcionaron bien hasta que en el año 1935 se patentó en Estados Unidos una nueva variedad llamada 'Hass', de progenitores desconocidos (pero con más porcentaje de guatemalteca), originado en La Habra, un lugar de California, donde el Sr. Rudolph Gay Hass la detectó entre los árboles de su huerto¹.

2.2. Metales pesados

Los metales pesados son elementos con densidades, pesos y números atómicos superiores a 5 gr/cm³, 44,956 y 20, respectivamente, excepto los elementos de los grupos alcalino, alcalinotérreo, lantánidos y actínidos. Los metales pesados se pueden clasificar en esenciales (Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn, V, entre otros), los cuales cumplen alguna función biológica a concentraciones

¹ VAUGHAN, Ronald; REED, Brian; JENSEN, James; MATSUMOTO, Mark. *Procesos Físicoquímicos*. p. 15.

traza, y en no esenciales (Cr, Cd, Hg, Pb, As, Sb, entre otros.), cuando no cumplen ninguna función biológica conocida. Se encuentran presentes de forma natural en la corteza terrestre (yacimientos) y son extraídos por el hombre para su fundición y posterior uso industrial.

Las principales causas de acumulación natural en los ecosistemas son la erosión, la actividad volcánica y los incendios forestales, que de la misma manera cumplen ciclos de acumulación y remediación, sin presentarse un efecto tóxico o nocivo para los ecosistemas.

Los metales pesados en los ecosistemas pueden ser detectados en su estado natural o complejados con sales. En las aguas superficiales pueden existir en forma de coloides o partículas, apareciendo como hidróxidos, óxidos, silicatos, sulfuros o adsorbidos en minerales del grupo de las arcillas, sílice y materia orgánica. También se pueden encontrar en fase disuelta (debido a la baja solubilidad de estos elementos, las concentraciones presentadas son muy bajas en forma iónica o complejos organometálicos), la cual es dependiente del pH, del tipo de sorbente en los que se encuentran adsorbidos y, por último, del estado de oxidación de las fases minerales y el ambiente redox del sistema².

En general se considera, que los metales son perjudiciales, pero muchos resultan esenciales en nuestra dieta y en algunos casos, su deficiencia o exceso puede conducir a problemas de salud, por ejemplo, el organismo requiere de hierro, cobalto, cobre, manganeso, molibdeno, vanadio, estroncio y zinc. Otros, en cambio, no cumplen una función fisiológica conocida, alteran la salud y es mejor evitarlos siempre.

2.3. Características del cromo

El cromo hexavalente se refiere a compuestos químicos que contienen el elemento cromo en el estado de oxidación 6. Prácticamente todo el mineral de

² CORTUELO, Mario; MARQUÉZ, Dolores. *Los metales pesados en las aguas (I), su origen y acción de agentes biológicos*. p. 236.

cromo se procesa a través de cromo hexavalente, específicamente la sal de dicromato de sodio. Otros compuestos de cromo hexavalente son trióxido de cromo y diversas sales de cromato y dicromato. El cromo hexavalente se utiliza para la producción de acero inoxidable, colorantes textiles, conservación de la madera, de cuero curtido, y como recubrimientos anticorrosión y conversión, así como una variedad de usos de nicho.

El cromo hexavalente también se puede formar cuando se realiza “trabajo en caliente”, tales como la soldadura en acero inoxidable o de fusión del metal de cromo. En estas situaciones, el cromo se encuentra en su forma trivalente, pero las altas temperaturas implicadas en el proceso dan como resultado la oxidación a cromo hexavalente.

2.3.1. Toxicidad del cromo (VI) en la salud

El cromo (VI) es un peligro para la salud de los humanos, mayoritariamente para la gente que trabaja en la industria del acero y textil. La gente que fuma tabaco también puede tener un alto grado de exposición al cromo. El cromo (VI) es conocido porque causa varios efectos sobre la salud. Cuando es un compuesto en los productos de la piel, puede causar reacciones alérgicas, como es erupciones cutáneas. Después de ser respirado el cromo (VI) puede causar irritación de la nariz y sangrado de la nariz.

El envenenamiento con cromo (VI) es una importante enfermedad ambiental que puede dar lugar a efectos adversos en la salud durante el curso de la vida.

El cromo (VI) tiene efectos tóxicos en muchos órganos, sistemas y procesos fisiológicos, incluyendo el desarrollo de la línea roja hemática, los riñones, el sistema cardiovascular, el sistema nervioso y el aparato reproductor.

La naturaleza de las manifestaciones de toxicidad no solo depende de la magnitud de la exposición, sino también de las características de la persona expuesta; la neurotoxicidad del cromo (VI) es más crítica para el feto en desarrollo y el niño en crecimiento que para los adultos.

Otros problemas de salud que son causado por el cromo (VI) son:

- Erupciones cutáneas
- Malestar de estómago y úlceras
- Problemas respiratorios
- Debilitamiento del sistema inmune
- Daño en los riñones e hígado
- Alteración del material genético
- Cáncer de pulmón
- Muerte

2.3.2. Toxicidad del cromo (VI) para el medio ambiente

El aire y el agua se contaminan con cromo (III y VI) a partir de las actividades humanas. La concentración de cromo en el aire en forma de material particulado puede aumentar como resultado de la quema de carbón y petróleo, la producción de acero, soldadura de acero inoxidable, manufactura de productos químicos y uso de productos que contienen cromo.

La contaminación de las aguas ocurre por la descarga de desechos derivados de la manufactura de colorantes y pigmentos para el curtido de cueros; la mayor parte de las veces, el cromo se va al fondo y solo una pequeña parte se diluye en el agua.

El suelo también puede contaminarse, debido al depósito de residuos de la industria y cenizas de carbón provenientes de plantas generadoras de electricidad.

El cromo VI tiene un potencial de oxidación muy grande y se reduce rápidamente a cromo III en cuanto entra en solución con materia orgánica. Este es menos soluble en agua, aunque también puede enlazarse con moléculas orgánicas lipofílicas, lo que lo vuelve biodisponible. El cromo III se encuentra en las sales de cromo; desde el punto de vista ecológico, el cromo trivalente es un poco más fácil de degradar (ATDRS, S.A.)

El vertido incontrolado de cromo al medio ambiente se genera, principalmente, porque la mayor parte de los sistemas colectores de aguas residuales no posibilitan la separación de efluentes urbanos e industriales, de modo que las aguas residuales de las zonas urbanas con polígonos industriales son siempre de tipo mixto³.

2.4. Biosorción

La biosorción es un término que describe la eliminación de metales pesados por la unión pasiva a biomasa no viva a partir de soluciones acuosas; el mecanismo de remoción no está controlado por el metabolismo.

El término bioacumulación se refiere al proceso activo por el cual los metales son eliminados por la actividad metabólica de un organismo vivo. Los

³ REPETTO, Manuel; SANZ, P. *Toxicología de los metales*. p. 59.

estudios de mecanismos del proceso de biosorción se intensificaron por la necesidad de eliminar metales pesados provenientes de efluentes industriales, como los que derivan de la minería, electro platinado, o bien para recuperar metales preciosos a partir de soluciones en procesos industriales.

Se prefiere la biosorción sobre procesos más eficientes de eliminación de metales pesados en aguas de desecho, tales como precipitación química, ósmosis reversa, intercambio iónico, dado que estos son muy honerosos para la industria.

En cambio, la biosorción es de bajo costo, ya que emplea biomateriales sin aplicación industrial, como desechos agrícolas (cáscaras de arroz, naranja, limón y aguacate, marlo de maíz, salvado de soja y arroz, entre otros.), algas con pobre poder gelificante no utilizadas en procesos industriales, hongos y levaduras.

Figura 1. Cáscara de aguacate variedad Hass como material biosorbente



Fuente: VÁSQUEZ, Anderson. *Centro de salud Aguimes*.

<https://sites.google.com/site/centrodesaluddeaguimessalud-a-la-carta/nutricion/aguacate>.

Consulta: 30 de marzo de 2019.

La biosorción es una de las tecnologías más prometedoras para la retirada de metales tóxicos de las aguas residuales ya que, al tratarse de un proceso con características únicas, lo convierte en una alternativa potencial a los procesos convencionales, entre otras cuestiones, porque es un proceso generalmente rápido y que resulta muy interesante para la extracción de iones metálicos a bajas concentraciones de grandes volúmenes de agua.

2.4.1. Mecanismos de biosorción

Una vez que la biosorción se asocia exclusivamente a la captación pasiva de iones metálicos, puede ser excluido el mecanismo de transporte a través de la membrana celular que solo tiene lugar con células vivas y que se relaciona con un sistema de defensa activo por parte de los microorganismos que reaccionan frente a la presencia de iones metálicos tóxicos⁴.

Por otra parte, los átomos y moléculas son retenidos siempre por los sólidos por fuerzas de cohesión del tipo de Van der Waals. En el interior de un cuerpo sólido, los átomos y moléculas están completamente rodeados por otros, de esta manera sus fuerzas atractivas están satisfechas por todos los lados. En contraste con esto, los átomos y moléculas que se encuentran en la superficie de los sólidos tienen solo parcialmente equilibradas sus fuerzas atractivas que únicamente pueden ser neutralizadas por otros átomos o moléculas que puedan unirse a la superficie dando lugar al fenómeno de adsorción⁵.

Para la fijación de metales pesados en la biosorción se han sugerido una serie de mecanismos que explican la retención o secuestro del metal en diferentes partes del biosorbente. Así, puede ocurrir vía:

- Complejación o quelación: el metal se une a los centros activos de la pared celular mediante enlaces químicos formando determinados complejos.
- Adsorción física: se incluyen aquí los fenómenos asociados a fuerzas de Van der Waals. En este caso, la biosorción es rápida y reversible.

⁴ CORTUELO, Mario; MARQUÉZ, Dolores. *Los metales pesados en las aguas (I), su origen y acción de agentes biológicos*. p. 237.

⁵ MCKAY, Gordon. *Application of two resistance mass transfer models for the adsorption of dyes on peat*. p. 3.

- Intercambio iónico: propio de los iones metálicos divalentes que se intercambian con iones propios de los polisacáridos presentes en la biomasa. El proceso también es rápido y reversible.
- Precipitación: el mecanismo está asociado a la formación de un complejo en la pared celular que posteriormente es hidrolizado.

Generalmente se considera que en la biosorción de metales pesados pueden aparecer simultáneamente más de uno de los mecanismos señalados, siendo, en algunos casos, muy difícil de explicar el o los mecanismos que tienen lugar en un proceso de biosorción determinado⁶.

2.4.2. Factores que afectan al mecanismo de biosorción

Los diferentes factores que afectan el proceso de biosorción se citan a continuación:

2.4.2.1. Influencia de la temperatura

Es bien conocido que la temperatura es uno de los factores que más influyen en los procesos de sorción. El efecto de la temperatura sobre la biosorción depende del calor de adsorción (cambio de entalpía). Generalmente, cuando la adsorción es de tipo físico, el calor de adsorción es negativo, lo que indica que la reacción es exotérmica y se favorece a bajas temperaturas. Por el contrario, cuando la adsorción es de tipo químico, el calor de adsorción es positivo, indicando que el proceso es endotérmico y se ve favorecido por altas temperaturas

La biomasa contiene usualmente más de un tipo de sitio activo para la unión del metal. El efecto de la temperatura para cada clase de sitio puede ser diferente y contribuir de forma distinta a la unión del metal. Para la mayoría de los metales, el calor de reacción es constante e independiente del grado de ocupación de los sitios activos del sorbente⁷.

⁶ VOLESKY, Kratochvil. *Biominet Proceedings*. p. 245.

⁷ NETZAHUALT, Alma; PINEDA, Gabriela; BARRAGÁN, Blanca; CRISTIANI, Eliseo. *Evaluación de la cáscara de aguacate para la remoción de cromo hexavalente y cromo total de soluciones acuosas*. p. 3.

2.4.2.2. Influencia del pH

El valor del pH de la fase acuosa es el factor más importante tanto en la biosorción de cationes como de aniones, siendo el efecto distinto en ambos casos. Así, mientras que la biosorción de cationes suele estar favorecida para valores de pH superiores a 4,5, la adsorción de aniones prefiere un valor bajo de pH, entre 1,5 y 4. Existen tres vías de influencia del pH en la biosorción del metal:

- El estado químico del sitio activo podría cambiar con el valor del pH. Cuando el grupo de unión del metal es débilmente ácido o básico, la disponibilidad del sitio libre depende del pH. El logaritmo de la constante de disociación del ácido conjugado (pKa) podría ser uno de los parámetros clave para la determinación del pH óptimo para ocupar los sitios activos.
- Valores extremos de pH, como los empleados para la regeneración (desorción) del sorbente, podría dañar la estructura del material. En este sentido, la distorsión de las células, la pérdida significativa de peso y el descenso en la capacidad de adsorción, son algunos de los efectos observados por diversos investigadores.
- La especiación del metal en solución depende del pH, ya que los metales en soluciones acuosas se encuentran como iones hidrolizados a pH bajos, especialmente aniones de metales de alta carga y pequeño tamaño⁸.

2.4.2.3. Influencia del tamaño de partícula del material biosorbente

Al variar el tamaño de partícula manteniendo la velocidad constante puede que exista una gran diferencia en el rendimiento, y es relativamente menor cuando la partícula es fina. Evidentemente, cuanto más pequeñas sean las partículas, mayor es la superficie interfacial y más corta la longitud de los poros, por lo tanto, mayor es la velocidad de transferencia de masa. Sin embargo, tamaños excesivamente pequeños pueden hacer que las partículas se apelmacen lo que dificulta la extracción⁹.

⁸ BAES, Elias. *Étude du processus de coagulation-floculation du système dans l'élimination de métaux de transition*. p. 19.

⁹ *Ibíd.*

2.5. Adsorción sobre cáscara de aguacate como material biosorbente

El proceso de adsorción consiste en la captación de sustancias solubles presentes en la interfaz de una solución, pudiendo constituirse dicha interfaz entre un líquido y un gas, un sólido o entre dos líquidos diferentes.

El uso del término sorción se debe a la dificultad de diferenciar la adsorción física de la adsorción química, y se emplea para describir el mecanismo por el cual la materia orgánica se adhiere al material biosorbente. El equilibrio se alcanza cuando se igualan las tasas de sorción y desorción, momento en el que se agota la capacidad de adsorción del biosorbente. La capacidad teórica de adsorción de un determinado contaminante por medio del material biosorbente se puede determinar calculando su isoterma de adsorción.

La cantidad de adsorbato que puede retener un adsorbente es función de las características y de la concentración del adsorbato y de la temperatura. En general, la cantidad de materia adsorbida se determina como función de la concentración a temperatura constante, y la función resultante se conoce con el nombre de isoterma de adsorción¹⁰.

La afinidad del sorbente por el sorbato determina su distribución entre las fases sólida y líquida. La calidad del sorbente está dada por la cantidad del sorbato que puede atraer y retener en forma inmovilizada, lo cual se denomina capacidad de adsorción o capacidad de captura del sorbente. Se han desarrollado varios modelos para cuantificar la cantidad máxima de Cr (VI) que puede ser adsorbida sobre la superficie del adsorbente, los cuales consisten en graficar la concentración de soluto [Cr (VI)] en la fase sólida, en función de la concentración de Cr (VI) en la fase líquida o concentración en equilibrio¹¹.

¹⁰ UCUN, Handan; BAYHAN, Kemal; KAYA, Yusuf; ÇAKICI, Avni; ALGUR, Faruk. *Biosorption of chromium (VI) from aqueous solution by cone biomass of Pinus sylvestris*. p. 2.

¹¹ NETZAHUALT, Alma; PINEDA, Gabriela; BARRAGÁN, Blanca; CRISTIANI, Eliseo. *Evaluación de la cáscara de aguacate para la remoción de cromo hexavalente y cromo total de soluciones acuosas*. p. 7.

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Propiedad, característica o atributo que es susceptible a asumir diferentes valores, es decir, puede variar. Dentro de ellas se encuentran las variables independientes, consideradas como las causas y las variables dependientes; consideradas como el factor que es observado y medido para determinar el efecto de la variable independiente.

3.1.1. Variables independientes

Las variables independientes durante el procedimiento serán aquellas que se modifiquen durante el respectivo análisis.

Tabla I. Variables independientes

Variable Independiente	Unidad
Tiempo de contacto	min
Tamaño de partícula del material biosorbente	µm

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

3.1.2. Variables dependientes

Son variables que se verán afectadas durante el análisis.

Tabla II. **Variables dependientes**

Variable dependiente	Unidad
Concentración de cromo hexavalente	mol/L
Rendimiento de remoción	%
Absorbancia	--

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

Este trabajo se limita exclusivamente al acondicionamiento de la cáscara de aguacate como material biosorbente de metales contenidos en soluciones de desechos acuosos alcalinos.

Se llevará a cabo el procedimiento de obtención del material biosorbente a partir de la cáscara de aguacate (*persea americana*) variedad Hass, a escala laboratorio, el cual será acondicionado para su respectivo uso. Se analizarán distintas soluciones de Cr (VI)_{ac} para posteriormente ser sometidas a procesos de biosorción mediante cuatro tamaños de partícula: 424 µm, 250 µm, 180 µm y 150 µm.

3.2.1. Área de conocimiento

Fundamento de conocimiento: química general, química analítica, química orgánica, fisicoquímica, calidad del agua y transferencia de masa.

3.2.2. Proceso

Evaluación del rendimiento de remoción de cromo hexavalente en muestras de agua contaminada con el catión referido, utilizando cáscara de aguacate (*persea americana*) variedad Hass.

3.2.3. Lugar

La parte experimental se llevó a cabo en el Laboratorio 2 del área de Química de la Escuela de Ingeniería Química, FIUSAC; y la medición de concentraciones por medio de espectrofotometría en el Laboratorio de Análisis Físicoquímico –LAFIQ- del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Mildred María Elena Zúñiga Socop
- Asesor: Msc. Ing. Qco. Víctor Manuel Monzón Valdez
- Revisora: Msc. Lic. Qca. Ingrid Lorena Benítez Pacheco

3.4. Recursos materiales disponibles

Todo equipo, cristalería y materia prima que se utilizó durante la recolección y ordenamiento de la información.

3.4.1. Equipos

Los equipos se dividen en equipos de medición y equipos auxiliares para la evaluación de remoción de cromo hexavalente en soluciones acuosas mediante la utilización de cáscara de aguacate como material biosorbente.

3.4.1.1. Equipos de medición

- Espectrofotómetro Spectroquant® Pharo 300.
- Espectrofotómetro Genesys 10S UV-VIS.
- Balanza analítica RADWAG WPS 750/C/1 (legibilidad 0,01g y capacidad hasta 2kg).

3.4.1.2. Equipo auxiliar

- Plancha de calentamiento con agitación VELP SCIENTIFICA.
- Tamizador (Tamiz -100; tamiz + 200).
- Termómetro de vidrio con mercurio como fluido (legibilidad 0,1°C y rango de medición de 0 a 100 °C).

3.4.2. Instrumentos de laboratorio y cristalería

- Beakers de vidrio con capacidad de 25, 100, 600 y 1 000 mL.
- Varilla de agitación de vidrio.
- Kitazato de vidrio de 500 mL.
- Erlenmeyer de vidrio de 100 mL.
- Embudo de vidrio de 1 000 mL.
- Pizeta de polietileno de 125 mL.
- Agitador magnético de 1 plg.

- Espátula con mango de madera de 15 cm de largo.
- Balones aforados de 100 mL.
- Pipetas volumétricas de varios volúmenes.
- Probeta de 25, 50 y 100 mL.
- Cubetas de plástico y cuarzo para espectrofotometría de 10 cm.

3.4.3. Materia prima y reactivos

La materia prima necesaria para la realización del estudio consiste únicamente en la cáscara seca de aguacate variedad Hass y los desechos proporcionados que contienen el cromo (IV).

3.5. Técnicas cualitativas o cuantitativas

En este estudio se empleó una técnica experimental a nivel laboratorio para medir los parámetros a analizar en la muestra de soluciones con metales pesados, como lo son: el porcentaje de remoción de cromo, tiempo de contacto y el efecto del tamaño de partícula.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

La recolección de datos se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Análisis Físicoquímicos (LAFIQ) ubicado en el primer nivel del edificio T5 de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.6.1. Procedimiento para el acondicionamiento del material biosorbente de cáscara de aguacate

- Recolectar cáscaras de aguacate variedad Hass.
- Retirar residuos de pulpa presentes en la cáscara.
- Lavar con agua desmineralizada para el retiro de residuos orgánicos.
- Secar al sol durante un tiempo de 9 horas.
- Molienda de la materia prima ya seca.
- Tamizar el material biosorbente
- Clasificar el material tamizado separado por diferentes tamaños de partícula

3.6.2. Procedimiento para la remoción de cromo (VI)

La medición de la remoción de metales pesados, tomando como referencia la absorbancia, se realizó por medio de espectrofotometría, según el siguiente procedimiento.

3.6.2.1. Obtención de las muestras que contienen Cr (VI)

Las muestras fueron proporcionadas de los desechos de cromo del Laboratorio de Análisis Físicoquímicos (LAFIQ)

3.6.2.2. Determinación de cantidad de cromo hexavalente inicial

- Se preparó una solución de dicromato de potasio 150 ppm.

- Se agregó la solución, preparada en el paso anterior, a una cubeta de cuarzo de 10 cm.
- Se colocó la cubeta en el espectrofotómetro Genesys 10S UV-VIS.
- Se ajustó a una longitud de onda de 352 nm.
- Se midió la absorbancia.
- Se convirtieron los 150 ppm de dicromato de potasio en ppm de cromo hexavalente.

3.6.3. Procedimiento de captación del cromo (VI) mediante biosorción

- Se midieron alícuotas de 30 mL de desechos acuosos que contenían metales pesados.
- Se determinó la concentración inicial de los metales presentes en las soluciones utilizando un espectrofotómetro.
- A cada solución preparada se le agregó la cantidad del material biosorbente definida en la tabla y se mantuvo a una agitación de 120rpm durante 10 minutos. Finalmente se filtraron por gravedad.
- Se midió la concentración final de los metales presentes en las soluciones utilizando un espectrofotómetro.

3.6.4. Análisis de las soluciones acuosas cromadas a la finalización del procedimiento de captación del metal mediante la utilización de cáscara de aguacate

Para la segunda parte de la investigación se procedió de la siguiente manera:

3.6.4.1. Determinación de concentración de cromo hexavalente

- Se realizó una curva de calibración con valores conocidos de concentraciones de cromo (VI) en función de sus respectivas absorbancias.
- Se tomaron 20 mL de cada Beaker.
- Se realizó el blanco con agua destilada en el espectrofotómetro Genesys 10S UV-VIS para su calibración.
- Se colocó un nivel de absorbancia de 352 nm.
- Se colocó la solución en una celda espectrofotométrica de cuarzo de 10 cm.
- Se realizaron las lecturas.
- Se calculó la concentración de cromo hexavalente mediante sus absorbancias utilizando la curva de calibración del apéndice 1 y el procedimiento de la sección 3.6.2.2.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Para la tabulación, ordenamiento y procesamiento de los datos se utilizaron las siguientes tablas:

Tabla III. Datos de absorbancia posterior al filtrado con el biosorbente de cáscara de aguacate variedad Hass con tamaño de partícula 424 μm

Tamaño de partícula (μm)	424		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4
Solución con metales pesados (mL)	Cantidad de biosorbente (g)	Tiempo de contacto (min)	Absorbancia medida	Absorbancia medida	Absorbancia medida	Absorbancia medida
30	1	10				
		20				
		30				

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. Datos de absorbancia posterior a filtrado con el biosorbente de cáscara de aguacate variedad Hass con tamaño de partícula 250 μm

Tamaño de partícula (μm)	250		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4
Solución con metales pesados (mL)	Cantidad de biosorbente (g)	Tiempo de contacto (min)	Absorbancia medida	Absorbancia medida	Absorbancia medida	Absorbancia medida
30	1	10				
		20				
		30				

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. Datos de absorbancia posterior a filtrado con el biosorbente de cáscara de aguacate variedad Hass con tamaño de partícula 180 μm

Tamaño de partícula (μm)	180		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4
Solución con metales pesados (mL)	Cantidad de biosorbente (g)	Tiempo de contacto (min)	Absorbancia medida	Absorbancia medida	Absorbancia medida	Absorbancia medida
30	1	10				
		20				
		30				

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. Datos de absorbancia posterior a filtrado con el biosorbente de cáscara de aguacate variedad Hass con tamaño de partícula 150 μm

Tamaño de partícula (μm)	150		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4
Solución con metales pesados (mL)	Cantidad de biosorbente (g)	Tiempo de contacto (min)	Absorbancia medida	Absorbancia medida	Absorbancia medida	Absorbancia medida
30	1	10				
		20				
		30				

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

A continuación, se presenta una breve descripción del análisis estadístico utilizado.

3.8.1. Estadística inferencial

- Análisis de varianza

Se realizará el análisis de la metodología experimental mediante el uso del análisis de varianzas. El análisis de varianzas evalúa la variación de una variable independiente en función de las variaciones de la variable dependiente. Requiere el uso de repeticiones y de tratamientos, donde los tratamientos refieren las variaciones de la variable dependiente.

Para aceptar o rechazar una hipótesis estadística, se utilizó el criterio de la distribución de Fisher. Se usó una confiabilidad del 95 % y se comparó la F crítica con la F calculada a partir de los siguientes criterios de varianza.

Tabla VII. **Criterio para análisis estadístico**

Criterio de comparación del valor de F de Fisher y la F crítica
Si $F > F_{crítica}$ se rechaza H_0
Si $P < \alpha$ se rechaza H_0
Si $P > \alpha$ se acepta H_0

Fuente: elaboración propia.

- Análisis prueba de Tukey

El método de Tukey se utiliza en ANOVA para crear intervalos de confianza para todas las diferencias en parejas entre las medias de los niveles de los factores mientras controla la tasa de error por familia en un nivel especificado.

- Análisis prueba de residuos

La prueba de residuos es una validación de la regresión; es el proceso de decidir si los resultados numéricos cuantifican relaciones de hipótesis entre variables obtenidos. Se hará uso de los métodos gráficos de residuos para la interpretación de resultados.

3.8.2. Estadística descriptiva

- Media muestral

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N} \text{ Ecuación 1}$$

Donde:

\bar{x} = Valor promedio

$\sum_{i=1}^n x_i$ = Sumatoria de valores obtenidos.

N = Número de datos

- Varianza

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N-1} \text{ Ecuación 2}$$

Donde:

σ^2 = Varianza

\bar{x} = Valor promedio

x_i = Valores de la muestra

N = Número de datos

- Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

σ = Desviación w estándar

\bar{x} = Valor promedio

x_i = Valores de la muestra

N = Número de datos

- Coeficiente de variación

$$C_v = \frac{\sigma}{|\bar{x}|} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

C_v = Coeficiente de variación

σ = Desviación estándar

\bar{x} = Valor promedio

3.8.3. Plan de análisis de los resultados

Se hizo uso de la estadística inferencial para determinar las características de los resultados, separar el efecto de los tratamientos y probar la hipótesis estadística de trabajo. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con una confiabilidad del 95 %

Se hizo uso de la estadística descriptiva para organizar, presentar y dar un análisis general de los datos obtenidos en la investigación que ayudaron a completar el análisis de las pruebas de la estadística inferencial.

3.8.3.1. Programas por utilizar para el análisis de datos

- Microsoft Word 2019: se utilizó para la presentación de tablas y gráficas para los resultados.
- Microsoft Excel 2019: se utilizó para la tabulación, ordenamiento y realización de cálculos que permitió la modelación de las gráficas del comportamiento del porcentaje de remoción sobre $Cr_{(VI)}$ en función del tiempo de contacto y en función del tamaño de partícula que se presentarán en la sección de resultados.
- MiniTab 18: es un software estadístico que se utilizó para el análisis y validación de los resultados estadísticamente.

4. RESULTADOS

4.1. Acondicionamiento del material biosorbente

A continuación, se presentan las condiciones finales a la que se acondicionó la cáscara de aguacate variedad Hass.

Tabla VIII. **Condiciones físicas de la cáscara de aguacate variedad Hass como material biosorbente**

H_o (%)	H_f (%)	T_s (min)	T (°C)
57,82	10,93	9 h	30°C

Fuente: elaboración propia, con base en resultados obtenidos del apéndice 15.

Tabla IX. **Porcentaje obtenido como clasificación del tamaño de partícula de la cáscara de aguacate variedad Hass usado como material biosorbente**

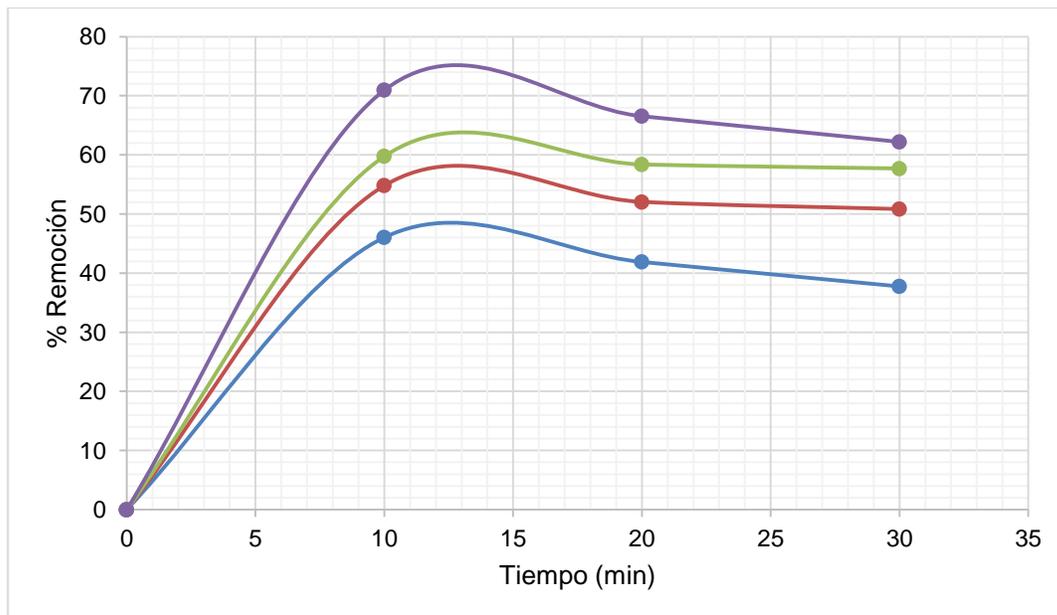
Porcentaje obtenido (%)	t_p (µm)
31	425
27	250
22	180
20	150

Fuente: elaboración propia.

4.2. Efecto tiempo de contacto

A continuación, se presentan los resultados del porcentaje de remoción en función del efecto tiempo de contacto para los tamaños de partículas de 425, 250, 180 y 150 μm .

Figura 2. **Porcentaje de remoción de $\text{Cr}_{(\text{VI})}$ en función del tiempo de contacto para diferentes tamaños de partículas a 25 °C**



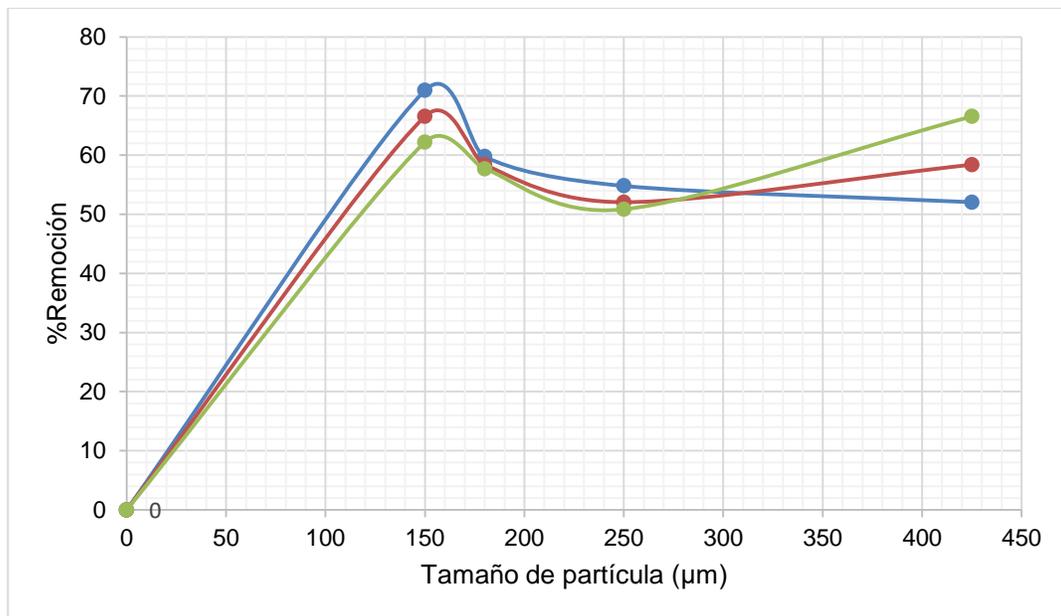
Color	Tamaño de partícula (μm)	Modelo matemático
	150	$\%R = -0,1882t^2 + 7,469t + 3,7695$
	180	$\%R = -0,1511t^2 + 6,2506t + 3,0884$
	250	$\%R = -0,14t^2 + 5,6981t + 2,955$
	425	$\%R = -0,1254t^2 + 4,854t + 2,5097$

Fuente: elaboración propia.

4.3. Efecto tamaño de partícula

A continuación, se presentan los resultados del porcentaje de remoción en función del efecto tamaño de partícula para tiempos de 10, 20 y 30 min.

Figura 3. **Porcentaje de remoción de Cr_(VI) en función del tamaño de partícula para diferentes tiempos de contacto a 25 °C**



Color	Tiempo (min)	Modelo matemático
Blue	10	$\%R = -0,0009tp^2 + 0,473tp + 3,8232$
Red	20	$\%R = -0,0007tp^2 + 0,432tp + 3,8064$
Green	30	$\%R = -0,0006tp^2 + 0,3954tp + 3,6534$

Fuente: elaboración propia.

4.3.1. Análisis estadístico del porcentaje de remoción de Cr_(VI) en función del tamaño de partícula y el tiempo de contacto

A continuación, se presenta un análisis estadístico de la información recolectada.

Tabla X. Análisis de varianza

Fuente	G L	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	F crítico
Tamaño de partícula (µm)	3	3893,87	1297,96	1888,1	0,000	3,598
Tiempo (min)	2	266,08	133,04	193,53	0,000	
Tamaño de partícula (µm)*Tiempo (min)	6	65,44	10,91	15,87	0,000	
Error	36	24,75	0,69			
Total	47	4250,13				

Fuente: elaboración propia, empleando MiniTab.

Tabla XI. Prueba de igualdad de varianzas del porcentaje de remoción de Cr_(VI) en función del tamaño de partícula (µm) y el tiempo de contacto (min)

Método	Estadística de prueba	Valor p
Comparaciones múltiples	—	0,772
Levene	0,92	0,531

Fuente: elaboración propia, empleando MiniTab.

- Criterios de comparación del estadístico de la prueba de Levene

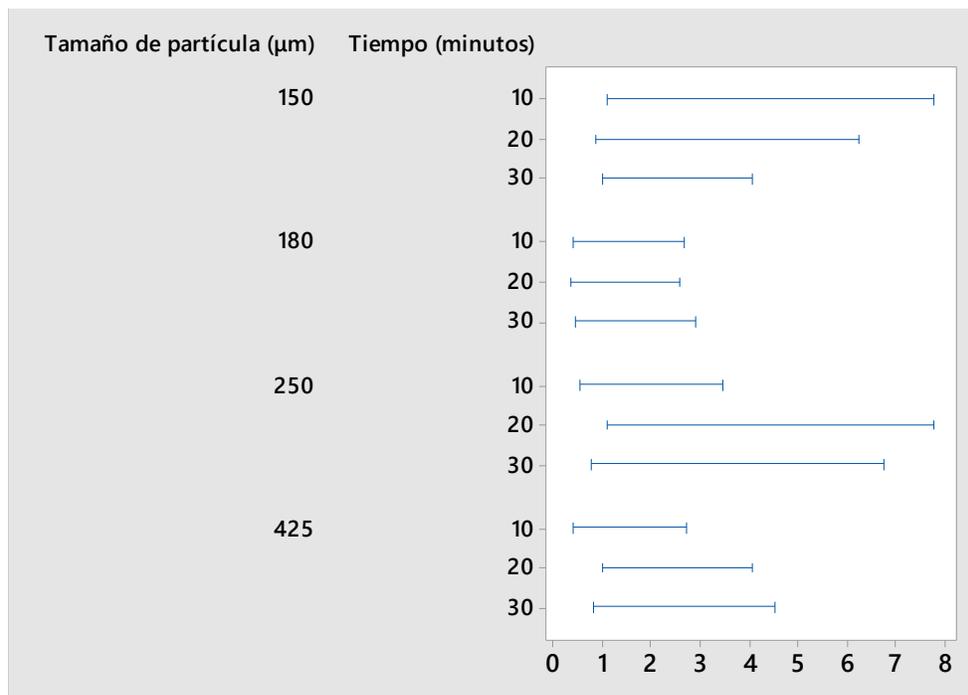
Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

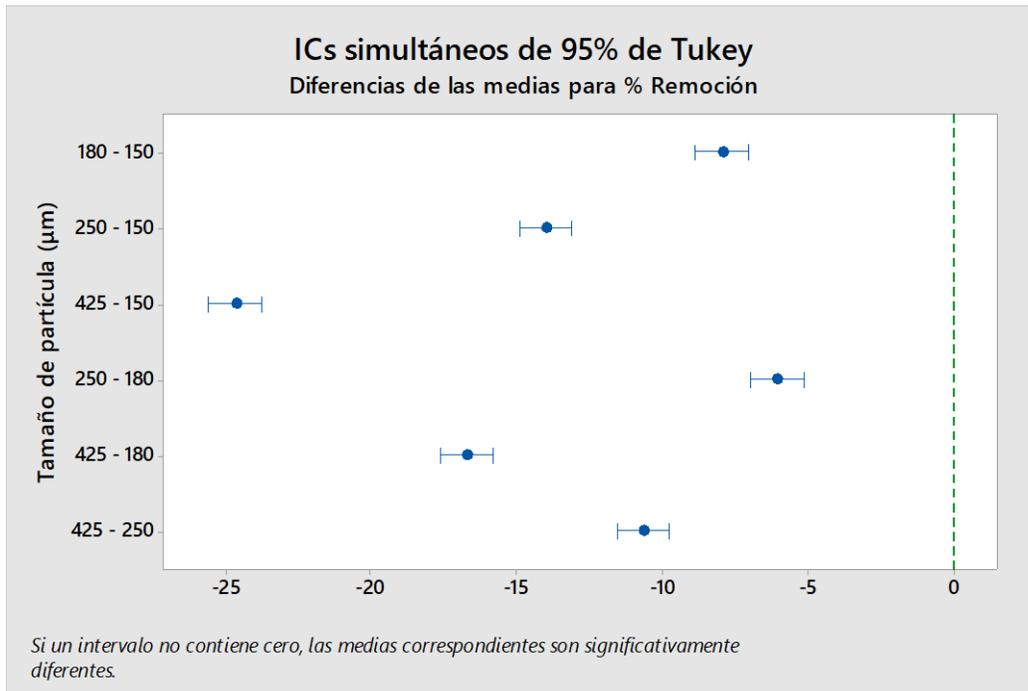
- Si $P_{Levene} > P$ se rechaza la H_0

Figura 4. **Prueba de igualdad de varianzas del porcentaje de remoción de $Cr_{(VI)}$ en función del tamaño de partícula (μm) y el tiempo de contacto (min)**



Fuente: elaboración propia, empleando MiniTab.

Figura 5. **Comparaciones por parejas de Tukey para el tamaño de partícula (μm)**



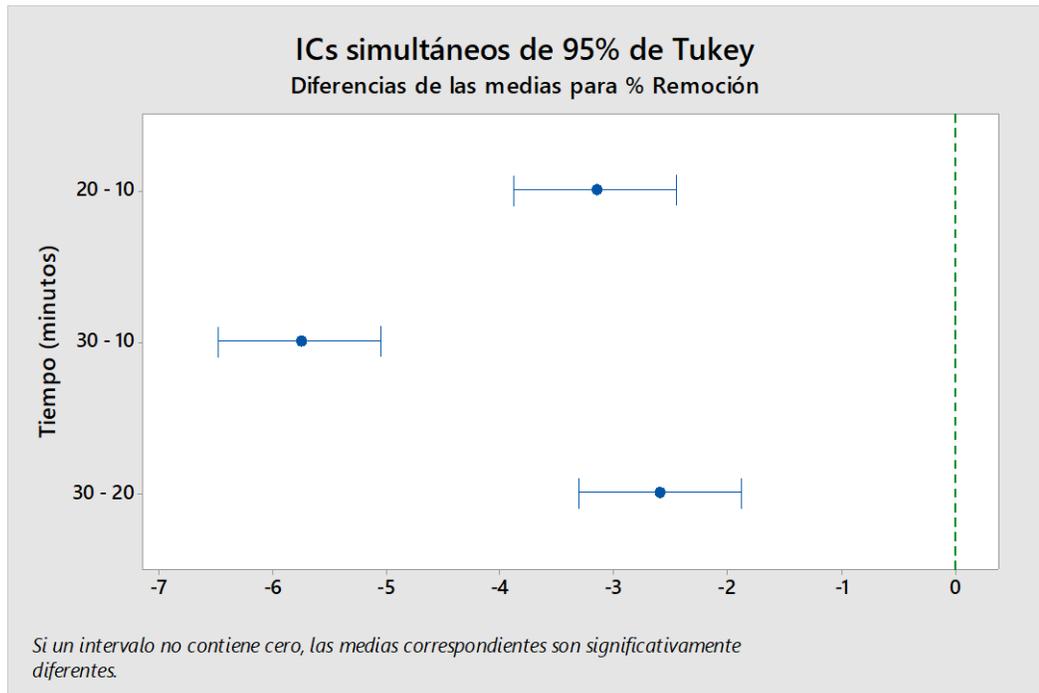
Fuente: elaboración propia, empleando MiniTab.

Tabla XII. **Comparaciones por parejas de Tukey: tamaño de partícula (μm)**

Tp (μm)	N ₁	Media (μm)	Agrupación			
150	12	66,5671	A			
180	12	58,6109		B		
250	12	52,5637			C	
425	12	41,8946				D

Fuente: elaboración propia, empleando MiniTab.

Figura 6. **Comparaciones por parejas de Tukey para el tiempo de contacto (min)**



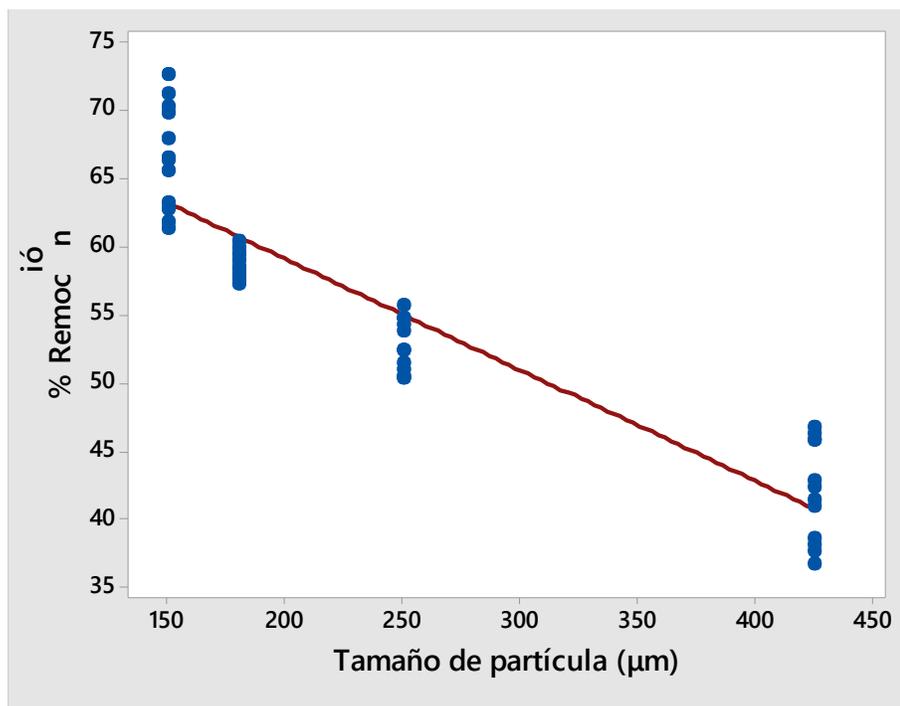
Fuente: elaboración propia, empleando MiniTab.

Tabla XIII. **Comparaciones por parejas de Tukey: tiempo (min)**

Tiempo (min)	N ₁	Media (min)	Agrupación		
10	16	57,8826	A		
20	16	54,7199		B	
30	16	52,1248			C

Fuente: elaboración propia, empleando MiniTab.

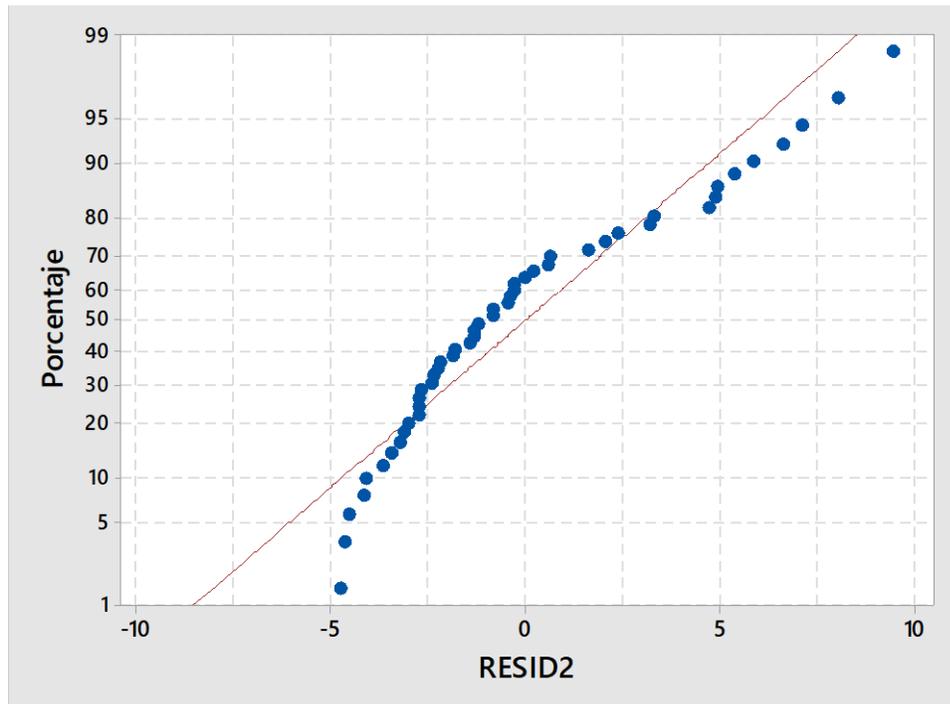
Figura 7. **Gráfica de línea ajustada para el porcentaje de remoción de $Cr_{(VI)}$ en función del tamaño de partícula (μm)**



S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	Ecuación de regresión
3,7191	85,03%	84,70%	% R= 75,35 – 0,08134 tp
Fuente	GL	SC	P
Regresión	1	3613,85	0,000
Error	46	636,28	
Total	47	4250,13	

Fuente: elaboración propia, empleando MiniTab.

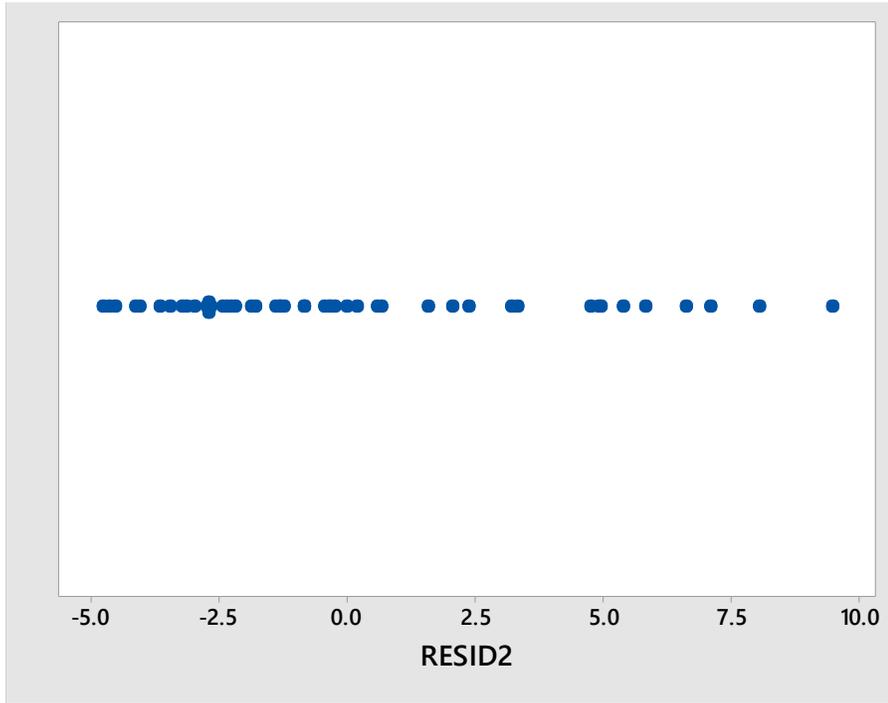
Figura 8. **Gráfica de probabilidad de residuos para el porcentaje de remoción, tamaño de partícula (μm)**



M	S	N₁	P
-2.2204E-15	3,679	48	< 0,005

Fuente: elaboración propia, empleando MiniTab.

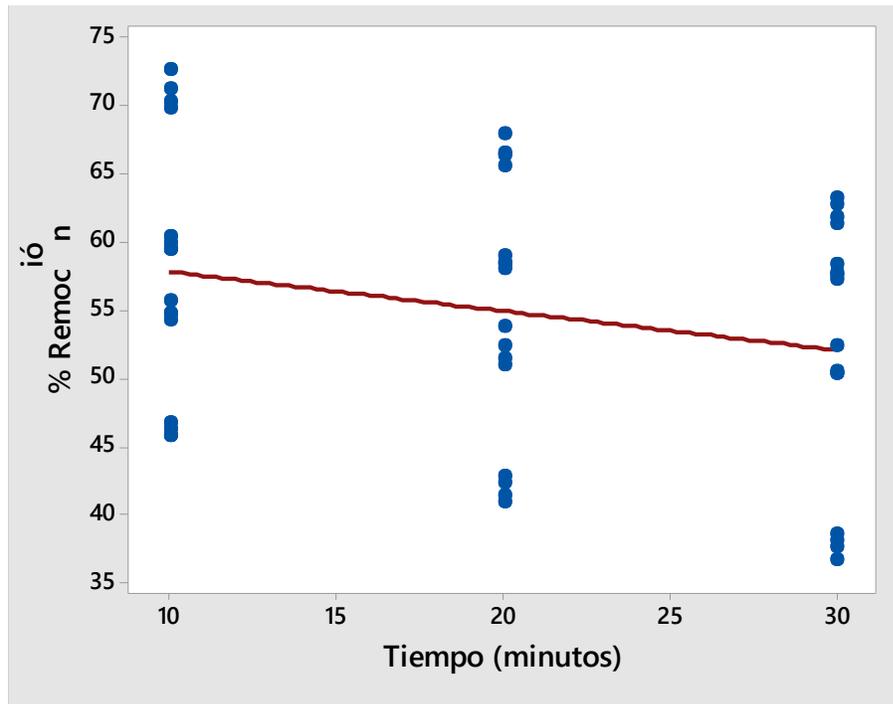
Figura 9. **Gráfica de valores atípicos de residuos, prueba de Grubbs para el porcentaje de remoción, tamaño de partícula**



H₀	Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal						
H₁	El valor más pequeño o grande de los datos es un valor atípico						
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$						
Variable	N₁	M	S	Mín.	Máx.	G	P
RESID1	48	-0,00	3,78	-4,76	9,45	2,57	0,38

Fuente: elaboración propia, empleando MiniTab.

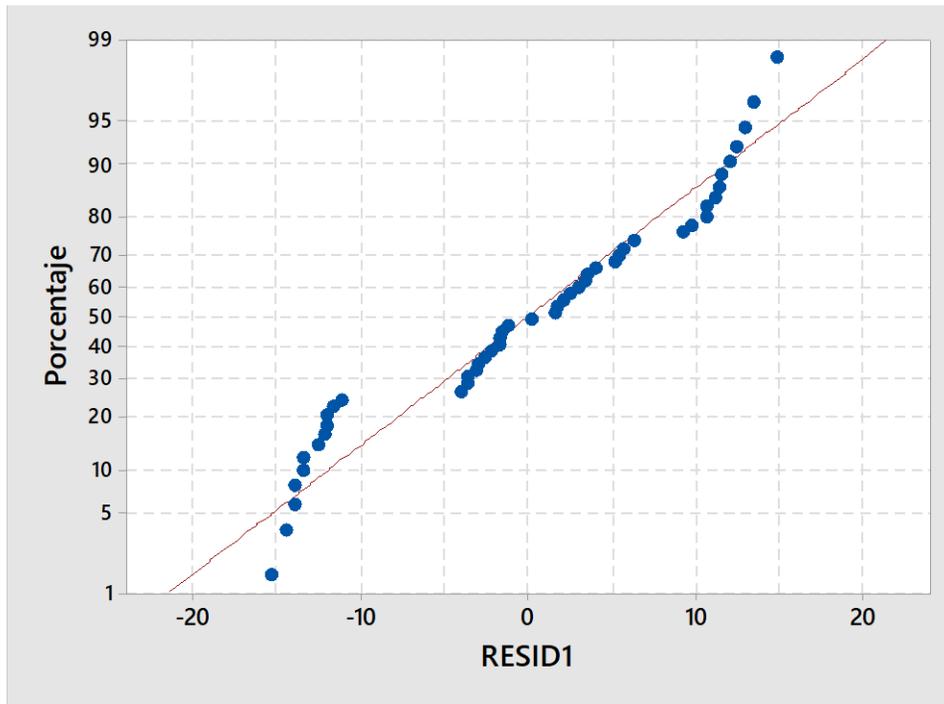
Figura 10. **Gráfica de línea ajustada para el porcentaje de remoción de $Cr_{(VI)}$ en función del tiempo de contacto (min)**



S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	Ecuación de regresión
9,30745	6,24%	4,20%	% R= 60,67 – 0,2879 t
Fuente	GL	SC	P
Regresión	1	265,22	0,087
Error	46	3984,92	
Total	47	4250,13	

Fuente: elaboración propia, empleando MiniTab.

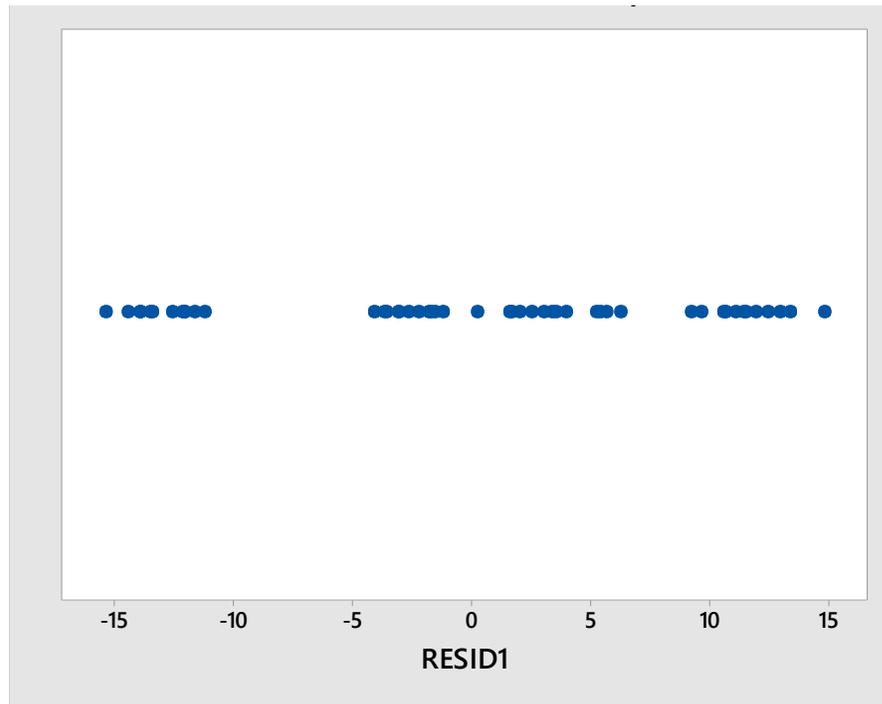
Figura 11. **Gráfica de probabilidad de residuos para el tiempo de remoción, tiempo de contacto**



M	S	N	P
-7,4014E-16	9,208	48	0,012

Fuente: elaboración propia, empleando MiniTab.

Figura 12. **Gráfica de valores atípicos de residuos, prueba de Grubbs para el porcentaje de remoción, tiempo de contacto**



H₀	Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal						
H₁	El valor más pequeño o grande de los datos es un valor atípico						
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$						
Variable	N	M	S	Mín.	Máx.	G	P
RESID1	48	-0,00	9,21	-15,34	14,81	1,67	1,00

Fuente: elaboración propia, empleando MiniTab.

4.4. Área de contacto

Se presenta a continuación una tabla con los valores del área de adsorción y los porcentajes máximos de remoción.

Tabla XIV. **Valores del área de adsorción y porcentaje de remoción de $Cr_{(VI)}$ para un tiempo de contacto de 10 min**

A_{ad} (cm²)	%R
0,000089	46,036
0,000159	54,800
0,000248	59,749
0,000571	70,945

Fuente: elaboración propia, empleando MiniTab.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El siguiente trabajo de investigación consistió en la evaluación del aprovechamiento de los residuos sólidos de cáscara de aguacate (*persea americana*) variedad Hass para la remoción del cromo hexavalente en medio acuoso, a escala laboratorio mediante el análisis de espectrofotometría visible.

Las cáscaras de aguacate (*persea americana*) variedad Hass utilizadas en la experimentación se obtuvieron mediante la recolección de desechos domésticos y la donación de un restaurante.

La siguiente investigación tiene como objetivo el aprovechamiento de los residuos sólidos de la cáscara de aguacate (*persea americana*) variedad Hass como materia orgánica de desecho, lo que constituye una alternativa para su deposición, que a su vez reduce el impacto ambiental.

El método de acondicionamiento de la cáscara de aguacate para utilizarla como material biosorbente en la parte experimental consistió en un lavado para retirar residuos de pulpa. Seguidamente se midió la humedad inicial, la cual fue del 57,82 % (tabla VIII) y, luego, se realizó un secado al sol durante 9 horas a una temperatura aproximada de 45 °C. Cuando se determinó que la cáscara estaba completamente seca se midió el porcentaje de humedad final que contenía y fue del 10,93 % (tabla VIII).

Posterior al secado de la materia prima se procedió a realizar la molienda de la cáscara mediante un molino de muelas. Luego se realizó el tamizaje para

la homogenización del tamaño de partícula. Se utilizaron cuatro tamices con número mesh de 40, 60, 80 y 100, respectivamente.

Esto dio como resultado el 31 % de cáscara de aguacate molida y tamizada con el tamiz número 40 (425 μm), 27 % de cáscara de aguacate molida y tamizada con el tamiz número 60 (250 μm), 22 % de cáscara de aguacate molida y tamizada con el tamiz número 80 (180 μm) y 20 % de cáscara de aguacate molida y tamizada con el tamiz número 100 (150 μm). Ver tabla IX.

Se realizaron pruebas preliminares para observar el comportamiento de la solución de desechos de cromo hexavalente mezclados con el biosorbente de cáscara de aguacate; mediante estas pruebas se observó la problemática de coloración de los desechos de cromo, de un color amarillo a un color café oscuro. (anexo 8). El cambio de color era desfavorable para el método espectrofotométrico propuesto, ya que el cambio en la coloración incide de manera significativa en la medición de absorbancias de las muestras.

“El cambio de coloración en las soluciones pudo haber sido provocado por un compuesto fenólico que contiene la cáscara de aguacate. Cuando los fenoles son oxidados, dan lugar a las quinonas que dan un color marrón que muchas veces es indeseable para la investigación”¹². Descrito en el anexo 9.

Se resalta que el objetivo de esta investigación está enfocado a la evaluación del porcentaje de remoción sobre cromo hexavalente que posee la cáscara de aguacate y no pretende determinar la razón exacta del desprendimiento de color de esta.

¹² ZARITZKY, Noemi. *Biosorbentes biodegradables, caracterización y aplicaciones*. p. 25.

Para contrarrestar el efecto de coloración se decidió realizar la curva de calibración con agua filtrada que estuvo en contacto con el mismo sustrato que, en este caso, es cáscara de aguacate.

Para la elaboración de la curva de calibración del método espectrofotométrico propuesto, se prepararon soluciones de dicromato de potasio y agua filtrada de la cáscara de aguacate 0,1 M. De esta solución madre, se procedió a hacer seis diluciones para la obtención de la curva.

“Posteriormente se llevó a cabo el barrido de la muestra para identificar la longitud de onda a la cual se debía trabajar, y dio como resultado 351 nm. Este valor se encuentra entre el rango UV-visible para el espectrofotómetro. Corresponde a que, para que una sustancia sea coloreada, debe absorber luz visible, provocando así una transición de electrones”¹³.

Se utilizó un blanco de 1 mL de agua filtrada de la cáscara de aguacate. Posteriormente se procedió a la medición mediante el espectrofotómetro de las absorbancias de las distintas diluciones.

Después de realizar las mediciones correspondientes, se procedió a graficar los datos de absorbancia obtenidos en función de la concentración de cromo hexavalente (Cr VI). La curva de calibración se encuentra en el apéndice 1, en donde se observa una tendencia relativamente lineal con un coeficiente $R^2=0,9302$.

Este es un valor aceptable cercano a 1, lo cual demuestra que el modelo obtenido para modelar el comportamiento de los datos es confiable y era

¹³ DÍAZ, Nieves; RUÍZ, Antonio; REYES, Emilio; GALVÁN, Aurora; JORRÍN, Jesús; PEINADO, José; MELÉNDEZ, Fermín; TÚNEZ, Isaac. *Espectrofotometría: Espectros de absorción y cuantificación calorimétrica de biomoléculas*. p. 3.

posible utilizarlo para la medición de la concentración del cromo hexavalente luego del proceso de biosorción con cáscara de aguacate.

Luego de haber llevado a cabo la experimentación descrita en la sección 3.6, se utilizó el modelo matemático obtenido a partir de la curva de calibración del método espectrofotométrico (apéndice 1) para conocer la concentración final de cada una de las soluciones. Posteriormente, se utilizó la relación del porcentaje de remoción en función de las variables tiempo de contacto y tamaño de partícula para visualizar el comportamiento mediante gráficas.

La figura 2 relaciona el porcentaje de remoción de cromo hexavalente en función del tiempo de contacto para los tamaños de partícula de 150, 180, 250 y 425 μm , respectivamente; la cantidad de biosorbente utilizado fue de 1 gramo y se trabajó a una temperatura de 25 °C.

La tendencia observada muestra que al iniciar el proceso de biosorción, el porcentaje de remoción sobre el cromo hexavalente aumenta en función del tiempo hasta llegar a un valor máximo del 70,945 % transcurridos 10 minutos. Luego de esto el porcentaje de remoción va disminuyendo y alcanza un valor casi constante en un tiempo de 30 minutos, comportamiento que se aplica para los 4 diferentes tamaños de partículas. Se determina también que el biosorbente con tamaño de partícula de 150 μm posee un área de absorción mayor y, por lo tanto, un porcentaje de remoción mayor.

De la misma manera, la figura 3 relaciona el porcentaje de remoción de cromo hexavalente en función del tamaño de partícula para los tiempos de contacto de 10, 20 y 30 minutos, respectivamente; la cantidad de biosorbente a utilizar fue de 1 gramo y se trabajó a una temperatura de 25 °C.

Se puede observar que la tendencia muestra que al iniciar el proceso de biosorción, el porcentaje de remoción sobre cromo hexavalente va en aumento conforme el tamaño de partícula disminuye. Se tiene un valor máximo del porcentaje de remoción al tiempo de 10 minutos y a un tamaño de partícula de 150 μm , como se observó también en la figura 2.

En las figuras 2 y 3 se llega a la conclusión de que se obtiene un mayor porcentaje de remoción a un tiempo de contacto de 10 minutos al utilizar un biosorbente con tamaño de partícula de 150 μm . El término remoción de cromo hexavalente se refiere a la disminución de la concentración del cromo hexavalente presente en la solución acuosa. Esta remoción se pudo haber dado por dos mecanismos que son la transformación (reducción química) de cromo hexavalente a cromo trivalente y la biosorción (en el cual pueden estar implicados fenómenos físicos como la adsorción).

Por lo tanto, la disminución de la concentración de cromo hexavalente indica que parte del cromo se biosorbió en la cáscara de aguacate y otra parte se redujo a cromo trivalente y fue adsorbido por la cáscara. El porcentaje máximo de remoción que se logró fue del 70,94 %.

Para la validación estadística de los resultados sobre si el tiempo de contacto o el tamaño de partícula inciden directamente en el porcentaje de remoción de cromo hexavalente, se realizaron las pruebas estadísticas descritas en la sección 3.8.

En la tabla X se presenta el análisis de varianza para el tamaño de partícula, tiempo de contacto y la relación entre las variables tamaño de partícula por tiempo. Según el criterio de rechazo de hipótesis presentado en la tabla VII de la sección 3.8, se rechaza la hipótesis nula, ya que en los tres

análisis realizados se presenta una probabilidad menor a la del nivel de significancia de 0,05 y también se tienen valores de F mayores al F de Fisher crítico. Se concluye así en la aceptación de las hipótesis alternativas que indican la existencia de una diferencia significativa en el porcentaje de remoción de cromo hexavalente al variar el tamaño de partícula y el tiempo de contacto.

Seguidamente, en la tabla XI se presentan los criterios de la prueba de igualdad de varianzas mediante el método de Levine, del porcentaje de remoción de cromo hexavalente en función del tamaño de partícula y el tiempo de contacto. La prueba de Levine tiene como objetivo evaluar la igualdad de las varianzas para una variable calculada entre dos o más grupos; esto dice que a pesar de que las muestras provengan de poblaciones con medias diferentes, tienen la misma varianza.

Como se observa según el criterio de esta prueba, si la P de Levene es mayor al valor P se rechazará la hipótesis nula y se aceptará la alterna, validando así que por lo menos una varianza es diferente.

La figura 4 presenta gráficamente el resumen de la prueba de igualdad de varianzas del porcentaje de remoción de cromo hexavalente en función del tamaño de partícula y el tiempo de contacto. Se puede observar que, al comparar los intervalos del tamaño de partícula, no se sobreponen entre sí; por lo tanto, las desviaciones estándar correspondientes son significativamente diferentes. Por el otro lado, al comparar los intervalos de la variable tiempo de contacto, se observa que para un tamaño de partícula de 180 μm las desviaciones estándar de los tiempos son estadísticamente iguales, por lo que no se tendría una diferencia significativa en el porcentaje de remoción a cualquiera de los tres tiempos. Sin embargo, si se comparan los intervalos del tiempo de contacto para un tamaño de partícula de 180 μm y 150 μm , si se

tienen una diferencia significativa; lo que confirma nuevamente el rechazo de la hipótesis nula y la aceptación de la alterna.

La figura 5 y la tabla XII presentan comparaciones por parejas de Tukey para el tamaño de partícula. La prueba de Tukey se utiliza en el análisis de ANOVA para crear intervalos de confianza para todas las diferencias en parejas entre las medias de los niveles de los factores, mientras controla la tasa de error por familia en un nivel especificado; esto quiere decir que usando este método se especifica que todo el conjunto de comparaciones debe tener una tasa de error por familia de 0,05, equivalente a un nivel de confianza simultáneo de 95 %.

Se observa en la figura 5 que las comparaciones de parejas del tamaño de partícula, (425-250), (425-180), (250-180), (425-150), (250-150) y (180-150) presentan intervalos de confianza que no contienen el cero, es decir, que están bastante alejados hacia la izquierda y, por lo tanto, las medias correspondientes son significativamente diferentes. Esto se puede observar de mejor manera en la tabla XII, que indica las agrupaciones de medias citadas como letras (A, B, C y D) ninguna de las letras se repite, por lo que se confirma que las medias son estadísticamente diferentes y se rechaza la hipótesis nula aceptándose la alterna. Esta indica que la variable tamaño de partícula incide significativamente en el porcentaje de remoción.

La figura 6 presenta las comparaciones por parejas de Tukey para el tiempo de contacto. Al igual que en la figura 5 se compararon gráficamente las parejas de (30-20), (30-10) y (20-10) y se pudo observar que ninguna de ellas presenta el cero, gráficamente están alejadas de él hacia la izquierda y, por lo tanto, las medias correspondientes son significativamente diferentes. La tabla XIII presenta las agrupaciones de medias citadas como letras (A, B y C) en

donde ninguna de las letras se repite, por lo que se confirma que las medias son estadísticamente diferentes y se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alterna. Se indica que la variable tiempo de contacto incide significativamente en el porcentaje de remoción del cromo hexavalente.

La figura 7 presenta una gráfica de línea ajustada para el porcentaje de remoción del cromo hexavalente en función del tamaño de partícula. La gráfica con la línea ajustada muestra la respuesta y los datos de los predictores, en ella se incluye la línea de regresión, que representa la ecuación de regresión. Evalúa hasta qué punto el modelo se ajusta a los datos y si el modelo cumple con los criterios de que la muestra contiene un número adecuado de observaciones a lo largo del rango completo de todos los valores predictores.

Se observa en la figura 7 que el modelo de regresión está modelada por la siguiente ecuación: $Y = b_0 + b_1x_1$ siendo Y la variable de respuesta. En este caso, el porcentaje de remoción, b_0 , es la constante o intersección; 75,35, b_1 es el coeficiente estimado para el término lineal, que es de -0,08134 y por último x_1 que es el valor del término, que le corresponde al tamaño de partícula.

El coeficiente del término b_1 representa el cambio en el porcentaje de remoción medio para un cambio de una unidad en ese término. Esto quiere decir que el coeficiente es de -0,08134, lo cual indica que conforme aumente el tamaño de partícula, el porcentaje de remoción medio disminuirá en 0,08134 %.

Además de esto, la figura 7 presenta un R^2 del 85,03 % y un valor de probabilidad igual a cero; es menor que el nivel de significancia del 0,05. Esto indica que la ecuación que describe el modelo se ajusta bastante bien al comportamiento del porcentaje de remoción en función del tamaño de partícula.

La figura 8 muestra la gráfica de probabilidad de residuos para el porcentaje de remoción, tamaño de partícula. Las gráficas de residuos ayudan a determinar si el modelo es adecuado y cumple con los supuestos del análisis de regresión; la gráfica de probabilidad normal de los residuos sirve para verificar el supuesto de que los residuos están distribuidos normalmente, debe seguir el comportamiento aproximado a una línea recta.

Se observa en la figura 8 que los datos de los residuos parecen seguir generalmente una línea recta; el valor de la probabilidad es menor a 0,005, por lo que es menor al nivel de significancia de 0,05 confirmando así la hipótesis de normalidad de los datos y descartando la presencia de valores atípicos que afecten de manera significativa al porcentaje de remoción.

La figura 9 presenta una gráfica de valores atípicos de residuos mediante la prueba de Grubbs para el porcentaje de remoción, tamaño de partícula. La prueba de Grubbs parte del supuesto de la hipótesis nula que indica que todos los valores de los datos provienen de la misma población normal y descarta la presencia de valores atípicos. Se observa que la distribución de los datos en la gráfica es constante y no se ve algún valor atípico; esto se confirma con el valor de la probabilidad de 0,38, siendo este mayor al nivel de significancia de 0,05 y confirma la hipótesis nula de normalidad en los datos.

En la figura 10 se presenta la gráfica de línea ajustada para el porcentaje de remoción de cromo hexavalente en función del tiempo de contacto.

Se observa que el modelo de regresión tiene la forma $Y = b_0 + b_1 X_1$ siendo Y la variable de respuesta. En este caso, el porcentaje de remoción, b_0 , es la constante o intersección, en este caso 60,67, b_1 es el coeficiente estimado para

el término lineal de $-0,2879$ y, por último, x_1 que es el valor del término, que le corresponde al tiempo de contacto.

El coeficiente del término b_1 representa el cambio en el porcentaje de remoción sobre cromo hexavalente medio para un cambio de una unidad en ese término. Esto quiere decir que si el coeficiente es de $-0,2879$ indicaría que conforme aumente el tiempo de contacto, el porcentaje de remoción medio disminuirá en $0,2879$ %.

La gráfica de la figura 10 presenta un R^2 del $6,24$ % y un valor de probabilidad de $0,087$, que es mayor que el nivel de significancia del $0,05$. Esto indica que la ecuación que describe el modelo no se ajusta al comportamiento del porcentaje de remoción en función del tiempo de contacto. Se confirma gráficamente ya que los valores no siguen una tendencia definida. Con el análisis de ANOVA anterior se confirmó que la variable tiempo de contacto si incide significativamente en el porcentaje de remoción de cromo hexavalente.

Se observa en la figura 11 que los datos de los residuos parecen seguir generalmente una línea recta; sin embargo, la gráfica presenta un corte pronunciado. Esto puede deberse a que como se vio anteriormente en el análisis de regresión, ciertos datos no se ajustan bien al modelo; aunque el valor de la probabilidad es $0,012$, por lo que es menor al nivel de significancia de $0,05$ se confirma así la hipótesis de normalidad de los datos y se descarta la presencia de valores atípicos.

Se concluye también que la asociación entre la variable tiempo de contacto y el porcentaje de remoción es estadísticamente significativa, aunque se tenga que buscar un modelo de regresión que se ajuste al comportamiento de los datos.

La figura 12 presenta una gráfica de valores atípicos de residuos mediante la prueba de Grubbs para el porcentaje de remoción, tiempo de contacto. Al igual que en el análisis de la figura 9, la prueba de Grubbs parte del supuesto de la hipótesis nula que indica que todos los valores de los datos provienen de la misma población normal y descarta la presencia de valores atípicos. Se observa que la distribución de los datos en la gráfica es constante y no se ve algún valor atípico, esto se confirma con el valor de la probabilidad de 1 que es mayor al nivel de significancia de 0,05 y confirma la hipótesis nula de normalidad en los datos.

Finalmente, en la tabla XIV se presentan los valores del área de adsorción y el mayor porcentaje de remoción de cromo hexavalente obtenido a un tiempo de contacto de 10 minutos a un área de adsorción de $0,000089 \text{ cm}^2$, ya que a este tiempo se obtuvieron los mayores porcentajes.

CONCLUSIONES

1. Fue posible aprovechar los residuos sólidos del aguacate (cáscara) (persea americana) variedad Hass para la remoción del Cr (VI)ac.
2. Es posible acondicionar la cáscara de aguacate en estudio para que tenga las características de un biosorbente secándola a una temperatura de 30 °C durante 9 horas, llevándola a un porcentaje de humedad del 10,93 %, moliéndola y clasificándola en los tamaños de partícula requeridos para la investigación.
3. Se determinó mediante el análisis de ANOVA y prueba de Tukey que el efecto tiempo de contacto incide significativamente en el porcentaje de remoción de cromo hexavalente. A medida que el tiempo de contacto aumenta, el porcentaje de remoción también lo hace.
4. Se determinó mediante el análisis de ANOVA y prueba de Tukey que el efecto tamaño de partícula incide significativamente en el porcentaje de remoción de cromo hexavalente. A medida que el tamaño de partícula se reduce, el porcentaje de remoción aumenta.
5. Se definió que el área de contacto que presenta el mayor porcentaje de remoción de cromo hexavalente es de 0,000089 cm² y un tiempo de contacto de 10 minutos.
6. Mediante la prueba de Levene se aceptan las hipótesis alternativas que indican que si existe una diferencia significativa en el porcentaje de

remoción de cromo hexavalente al variar el tamaño de partícula y el tiempo de contacto.

7. El análisis de regresión para la variable tamaño de partícula presenta un R^2 del 85,03 % y un valor de probabilidad igual a cero, siendo menor que el nivel de significancia del 0,05. Esto indica que la ecuación que describe el modelo representa el comportamiento del porcentaje de remoción en función del tamaño de partícula.
8. La gráfica de residuos y la prueba de Grubbs para la variable tamaño de partícula, confirman la hipótesis de normalidad de los datos y descartan la presencia de valores atípicos que afecten de manera significativa al porcentaje de remoción.
9. El análisis de regresión para la variable tiempo de contacto, presenta un R^2 del 6,24 % y un valor de probabilidad de 0,087, siendo mayor que el nivel de significancia del 0,05. Esto indica que la ecuación que describe el modelo no representa el comportamiento del porcentaje de remoción en función del tiempo de contacto.

RECOMENDACIONES

1. Promover una investigación, con los mismos procedimientos, para la evaluación de rendimiento de remoción de otros metales que afectan la calidad del agua.
2. Investigar y evaluar la remoción de otras propiedades de muestras acuosas mediante la utilización de cáscara de aguacate como principal agente de remoción, realizando un análisis más profundo para la total utilización de este biosorbente en la calidad del agua.
3. Realizar estudios de remoción de colorantes utilizando la cáscara de aguacate.
4. Ajustar los rangos de la variable tiempo de contacto para mejorar la ecuación que se ajusta al modelo de tendencia del análisis de regresión.

BIBLIOGRAFÍA

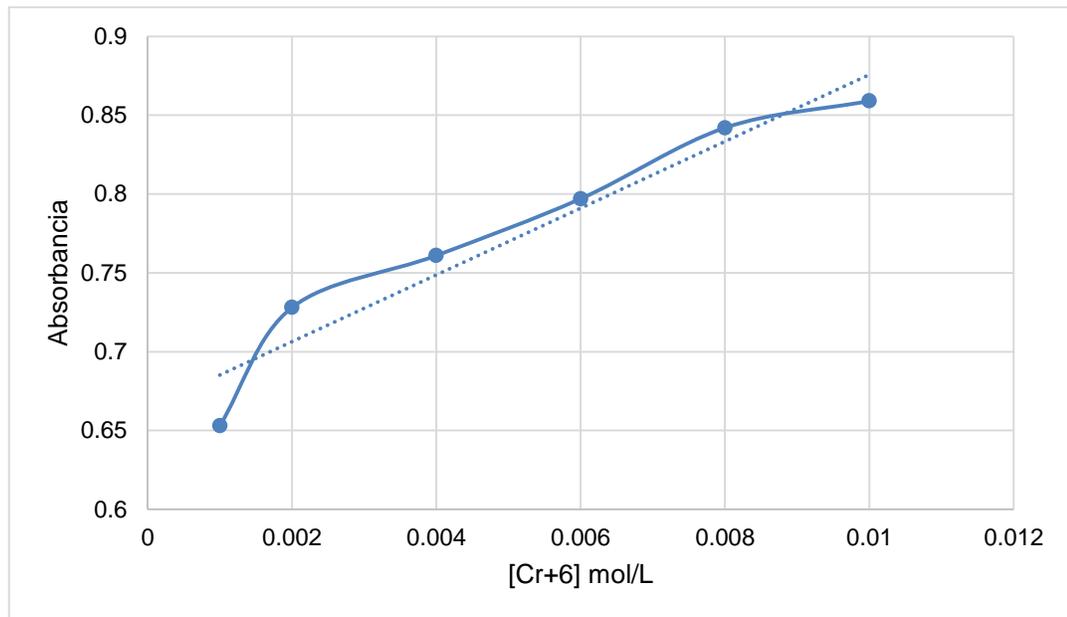
1. ACEITUNO, Álvaro; VENTURA, Marta. *Manual de Educación Ambiental sobre el recurso hídrico*. [en línea]. <<http://www.marn.gob.gt/Multimedios/7419.pdf>>. [Consulta: 5 de febrero de 2018].
2. BAES, Elias. *Étude du processus de coagulation-floculation du système dans l'élimination de métaux de transition*. Canadá: Universidad de Quebec en Montreal, 2006. 182 p.
3. BERGER, Charles. *The hydrolysis of cations*. Wiley-Interscience. [en línea]. <<http://www.a.co/7pGHQk>>. [Consulta: 10 de febrero de 2018].
4. CORTUELO, Mario; MARQUÉZ, Dolores. *Los metales pesados en las aguas (I), su origen y acción de agentes biológicos*. New York, USA: Ingeniería Química, 1999. 643 p.
5. DÍAZ, Nieves; RUÍZ, Antonio; REYES, Emilio; GALVÁN, Aurora; JORRÍN, Jesús; PEINADO, José; MELÉNDEZ, Fermín; TÚNEZ, Isaac. *Espectrofotometría: Espectros de absorción y cuantificación calorimétrica de biomoléculas*. Departamento de Bioquímica y Biología Molecular, España: URMO S.A., 2017. 100 p.
6. LAPEÑA, Miguel. *Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales*. Barcelona, España: Editorial Illustrated, 1999. 137 p.

7. MCKAY, Gordon. *Application of two resistance mass transfer models for the adsorption of dyes on peat*. Qatar: Journal of Separation Process Technology, 2000. 9 p.
8. MENDOZA, Carlos. *Evaluación de la capacidad biosortiva de la cáscara de banano en la eliminación de cobre divalente (Cu⁺²) de una solución de sulfato de cobre pentahidratado, a escala laboratorio, mediante espectrofotometría visible*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2012. 109 p.
9. NETZAHUALT, Alma; PINEDA, Gabriela; BARRAGÁN, Blanca; CRISTIANI, Eliseo. *Evaluación de la cáscara de aguacate para la remoción de cromo hexavalente y cromo total de soluciones acuosas*. La Habana, Cuba: Revista CENIC, 2010. 71 p.
10. Norma NMX-AA-044-1981. *Análisis de aguas – determinación de cromo hexavalente en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas – método de prueba*. [en línea]. <<http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa044-01.pdf>>. [Consulta: 5 de febrero de 2018].
11. REPETTO, Manuel; SANZ, P. *Toxicología de los metales*. 1a ed. Sevilla, España: Ilustre Colegio oficial de Químicos, 2012. 192 p.
12. UCUN, Handan; BAYHAN, Kemal; KAYA, Yusuf; CAKICI, Avni; ALGUR, Faruk. *Biosorption of chromium (VI) from aqueous solution by cone biomass of Pinus sylvestris*. USA: Bioresource Technology, 2002. 4 p.

13. VAUGHAN, Ronald; REED, Brian; JENSEN, James; MATSUMOTO, Mark. *Procesos Fisicoquímicos*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2019. 94 p.
14. VOLESKY, Kratochvil. *Biominet Proceedings*. Ottawa, Canadá: Natural Resources, 1997, 390 p.
15. ZARITZKY, Noemi. *Biosorbentes biodegradables, caracterización y aplicaciones*. Argentina: Universidad Nacional de La Plata, s.f., 138 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Curva de calibración



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Descripción curva de calibración

Color	Modelo matemático	R^2
	$A = 21,167[Cr^{+6}] + 0,664$	0,9302

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Datos originales de la concentración de cromo hexavalente de la muestra a partir de la utilización del biosorbente para un tamaño de partícula de 425 μm

Tamaño de partícula (μm)	425		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4
Solución con metales pesados (mL)	Cantidad de biosorbente (g)	Tiempo (min)	[Cr+6] Mol/L	[Cr+6] Mol/L	[Cr+6] Mol/L	[Cr+6] Mol/L
30	1	10	0,005	0,005	0,005	0,005
		20	0,006	0,006	0,006	0,006
		30	0,006	0,006	0,006	0,006

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Datos originales de la concentración de cromo hexavalente de la muestra a partir de la utilización del biosorbente para un tamaño de partícula de 250 μm

Tamaño de partícula (μm)	250		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4
Solución con metales pesados (mL)	Cantidad de biosorbente (g)	Tiempo (min)	[Cr+6] Mol/L	[Cr+6] Mol/L	[Cr+6] Mol/L	[Cr+6] Mol/L
30	1	10	0,004	0,005	0,005	0,005
		20	0,005	0,005	0,005	0,005
		30	0,005	0,005	0,005	0,005

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Datos originales de la concentración de cromo hexavalente de la muestra a partir de la utilización del biosorbente para un tamaño de partícula de 180 μm

Tamaño de partícula (μm)	180		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4
Solución con metales pesados (mL)	Cantidad de biosorbente (g)	Tiempo (min)	[Cr+6] Mol/L	[Cr+6] Mol/L	[Cr+6] Mol/L	[Cr+6] Mol/L
30	1	10	0,004	0,004	0,004	0,004
		20	0,004	0,004	0,004	0,004
		30	0,004	0,004	0,004	0,004

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Datos originales de la concentración de cromo hexavalente de la muestra a partir de la utilización del biosorbente para un tamaño de partícula de 150 μm

Tamaño de partícula (μm)	150		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4
Solución con metales pesados (mL)	Cantidad de biosorbente (g)	Tiempo (min)	[Cr+6] Mol/L	[Cr+6] Mol/L	[Cr+6] Mol/L	[Cr+6] Mol/L
30	1	10	0,003	0,003	0,003	0,003
		20	0,003	0,003	0,003	0,003
		30	0,004	0,004	0,004	0,004

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Datos originales de la capacidad de remoción de cromo hexavalente de la muestra a partir de la utilización del biosorbente para un tamaño de partícula de 425 μm

Tamaño de partícula (μm)	425		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4
Solución con metales pesados (mL)	Cantidad de biosorbente (g)	Tiempo (min)	Capacidad de remoción $\Delta []$			
30	1	10	0,461	0,466	0,457	0,457
		20	0,428	0,424	0,414	0,409
		30	0,386	0,381	0,376	0,367

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. Datos originales de la capacidad de remoción de cromo hexavalente de la muestra a partir de la utilización del biosorbente para un tamaño de partícula de 250 μm

Tamaño de partícula (μm)	250		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4
Solución con metales pesados (mL)	Cantidad de biosorbente (g)	Tiempo (min)	Capacidad de remoción $\Delta []$			
30	1	10	0,556	0,547	0,542	0,547
		20	0,537	0,523	0,513	0,509
		30	0,505	0,503	0,503	0,523

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. Datos originales de la capacidad de remoción de cromo hexavalente de la muestra a partir de la utilización del biosorbente para un tamaño de partícula de 180 μm

Tamaño de partícula (μm)	180		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4
Solución con metales pesados (mL)	Cantidad de biosorbente (g)	Tiempo (min)	Capacidad de remoción $\Delta []$			
30	1	10	0,603	0,594	0,598	0,595
		20	0,589	0,580	0,584	0,583
		30	0,583	0,577	0,575	0,572

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. Datos originales de la capacidad de remoción de cromo hexavalente de la muestra a partir de la utilización del biosorbente para un tamaño de partícula de 150 μm

Tamaño de partícula (μm)	150		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4
Solución con metales pesados (mL)	Cantidad de biosorbente (g)	Tiempo (min)	Capacidad de remoción $\Delta []$			
30	1	10	0,71,2	0,726	0,702	0,698
		20	0,679	0,665	0,664	0,655
		30	0,632	0,617	0,627	0,613

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. Datos originales del porcentaje de remoción de cromo hexavalente de la muestra a partir de la utilización del biosorbente para un tamaño de partícula de 425 μm

Tamaño de partícula (μm)	425		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4	Promedio
Solución con metales pesados (mL)	Cantidad de biosorbente (g)	Tiempo (min)	%Remoción	%Remoción	%Remoción	%Remoción	%Remoción
30	1	10	46,143	46,615	45,670	45,717	46,036
		20	42,836	42,363	41,418	40,946	41,891
		30	38,584	38,111	37,639	36,694	37,757

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. Datos originales del porcentaje de remoción de cromo hexavalente de la muestra a partir de la utilización del biosorbente para un tamaño de partícula de 250 μm

Tamaño de partícula (μm)	250		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4	Promedio
Solución con metales pesados (mL)	Cantidad de biosorbente (g)	Tiempo (min)	%Remoción	%Remoción	%Remoción	%Remoción	%Remoción
30	1	10	55,591	54,694	54,174	54,741	54,800
		20	53,702	52,284	51,339	50,867	52,048
		30	50,489	50,347	50,253	52,284	50,843

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. Datos originales del porcentaje de remoción de cromo hexavalente de la muestra a partir de la utilización del biosorbente para un tamaño de partícula de 180 μm

Tamaño de partícula (μm)	180		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4	Promedio
Solución con metales pesados (mL)	Cantidad de biosorbente (g)	Tiempo (min)	%Remoción	%Remoción	%Remoción	%Remoción	%Remoción
30	1	10	60,316	59,371	59,843	59,465	59,749
		20	58,898	57,953	58,426	58,284	58,390
		30	58,331	57,717	57,481	57,245	57,694

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. Datos originales del porcentaje de remoción de cromo hexavalente de la muestra a partir de la utilización del biosorbente para un tamaño de partícula de 150 μm

Tamaño de partícula (μm)	150		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4	Promedio
Solución con metales pesados (mL)	Cantidad de biosorbente (g)	Tiempo (min)	%Remoción	%Remoción	%Remoción	%Remoción	%Remoción
30	1	10	71,182	72,599	70,237	69,764	70,945
		20	67,875	66,457	66,358	65,512	66,551
		30	63,150	61,733	62,678	61,260	62,205

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Datos originales del porcentaje de remoción de cromo hexavalente de la muestra a partir de la utilización del biosorbente para su análisis en MiniTab**

Unidad experimental	Tamaño de partícula (µm)	Cantidad	Tiempo (min)	% Remoción
1	425	1	10	46.1426
2	425	1	10	46.6150
3	425	1	10	45.6701
4	425	1	10	45.7174
5	425	1	20	42.8355
6	425	1	20	42.3631
7	425	1	20	41.4182
8	425	1	20	40.9458
9	425	1	30	38.5836
10	425	1	30	38.1112
11	425	1	30	37.6388
12	425	1	30	36.6939
13	250	1	10	55.5913
14	250	1	10	54.6936
15	250	1	10	54.1740
16	250	1	10	54.7409
17	250	1	20	53.7015
18	250	1	20	52.2842
19	250	1	20	51.3393
20	250	1	20	50.8669
21	250	1	30	50.4890
22	250	1	30	50.3472
23	250	1	30	50.2528
24	250	1	30	52.2842
25	180	1	10	60.3156
26	180	1	10	59.3707
27	180	1	10	59.8432
28	180	1	10	59.4652
29	180	1	20	58.8983
30	180	1	20	57.9534
31	180	1	20	58.4259
32	180	1	20	58.2841
33	180	1	30	58.3314
34	180	1	30	57.7172
35	180	1	30	57.4810
36	180	1	30	57.2448
37	150	1	10	71.1816
38	150	1	10	72.5989
39	150	1	10	70.2367
425	150	1	10	69.7643
41	150	1	20	67.8745
42	150	1	20	66.4572
43	150	1	20	66.3580
44	150	1	20	65.5124
45	150	1	30	63.1502
46	150	1	30	61.7329
47	150	1	30	62.6778
48	150	1	30	61.2605

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Datos para la prueba de igualdad de varianzas del porcentaje de remoción sobre Cr_(VI) en función del tamaño de partícula y el tiempo de contacto**

Prueba de igualdad de varianzas: % Remoción vs. ... Tiempo (minutos)

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales
Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

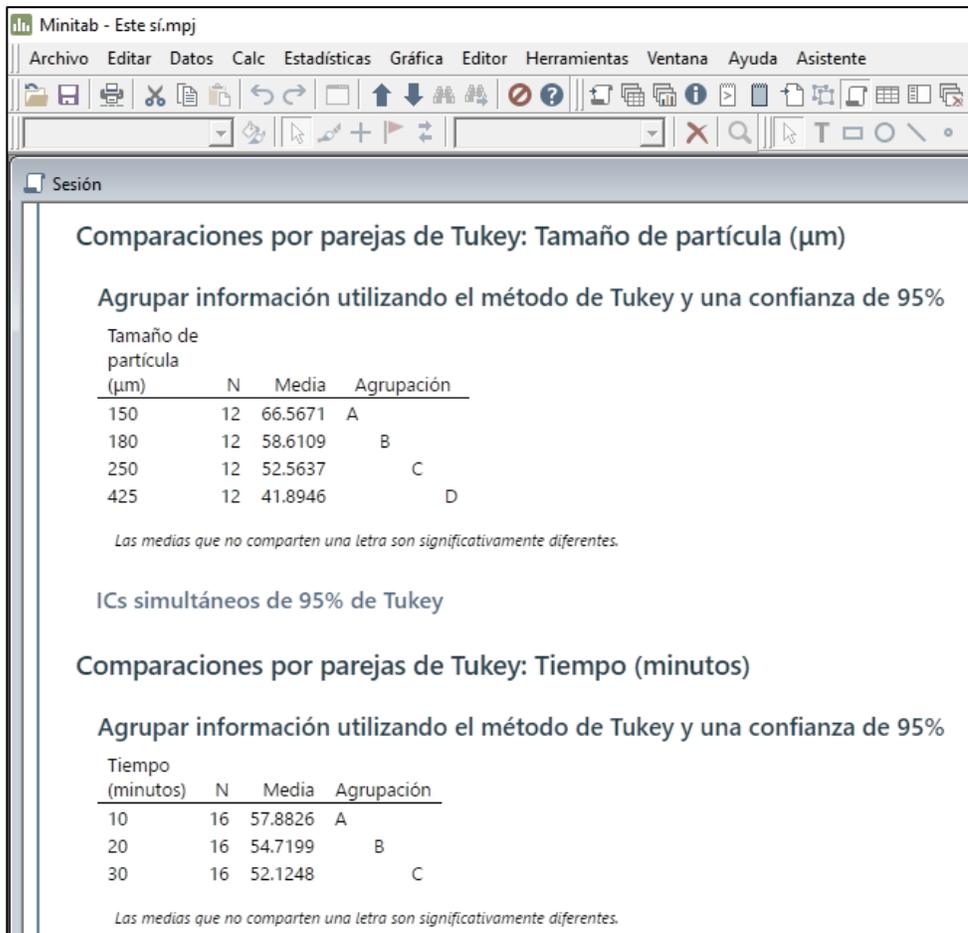
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Tamaño de partícula (µm)	Tiempo (minutos)	N	Desv.Est.	IC
150	10	4	1.24994	(0.0650862, 84.616)
150	20	4	0.97921	(0.0368689, 91.675)
150	30	4	0.86254	(0.0750375, 34.950)
180	10	4	0.42954	(0.0240796, 27.010)
180	20	4	0.39220	(0.0166848, 32.497)
180	30	4	0.46689	(0.0196624, 39.080)
250	10	4	0.58675	(0.0221188, 54.867)
250	20	4	1.24994	(0.0650862, 84.616)
250	30	4	0.96551	(0.0277139, 118.571)
425	10	4	0.44045	(0.0259125, 26.390)
425	20	4	0.86254	(0.0750375, 34.950)
425	30	4	0.80683	(0.0380900, 60.245)

Nivel de confianza individual = 99.5833%

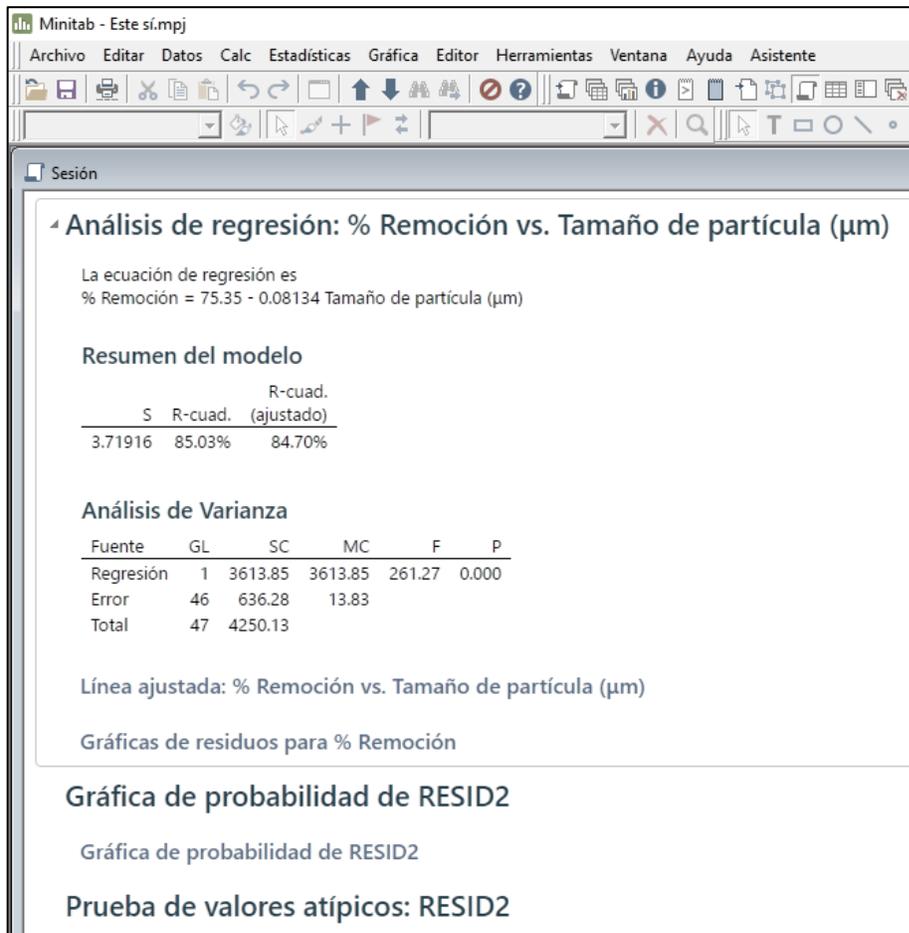
Fuente: elaboración propia, empleando MiniTab.

Apéndice 17. **Datos para la prueba de comparación de parejas de Tukey para el porcentaje de remoción en función del tamaño de partícula y tiempo de contacto**



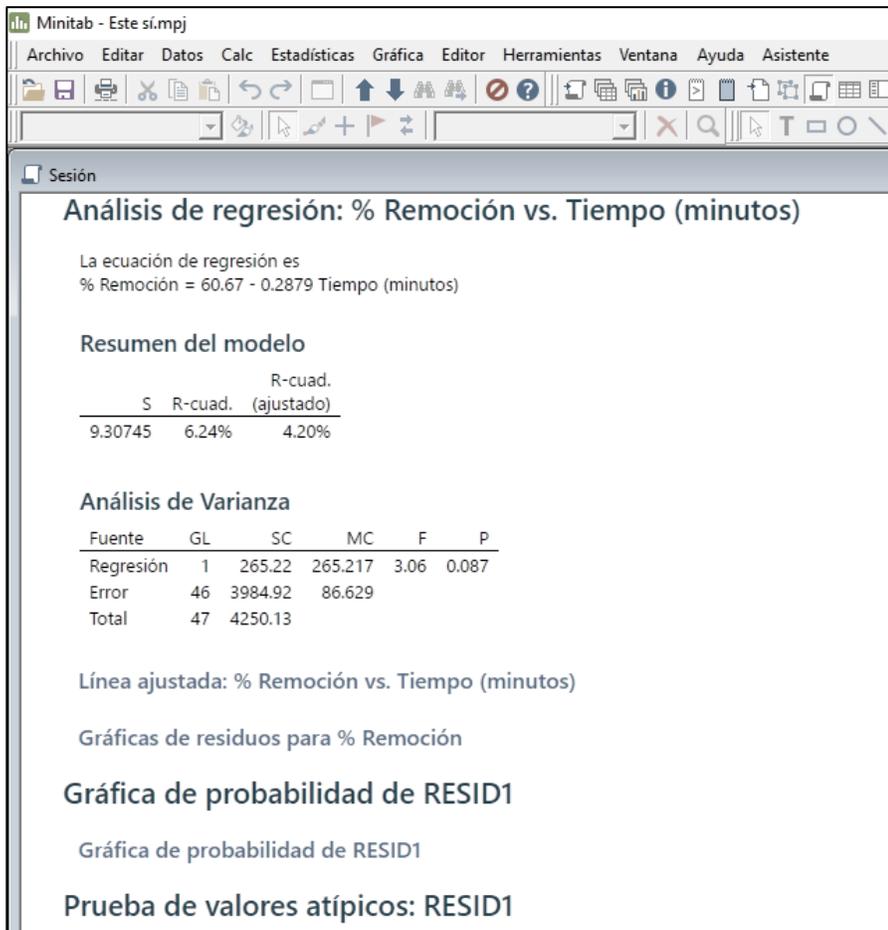
Fuente: elaboración propia, empleando MiniTab.

Apéndice 18. **Datos para la validación del análisis de regresión del porcentaje de remoción en función del tamaño de partícula**



Fuente: elaboración propia, empleando MiniTab.

Apéndice 19. **Datos para la validación del análisis de regresión del porcentaje de remoción en función del tiempo de contacto**



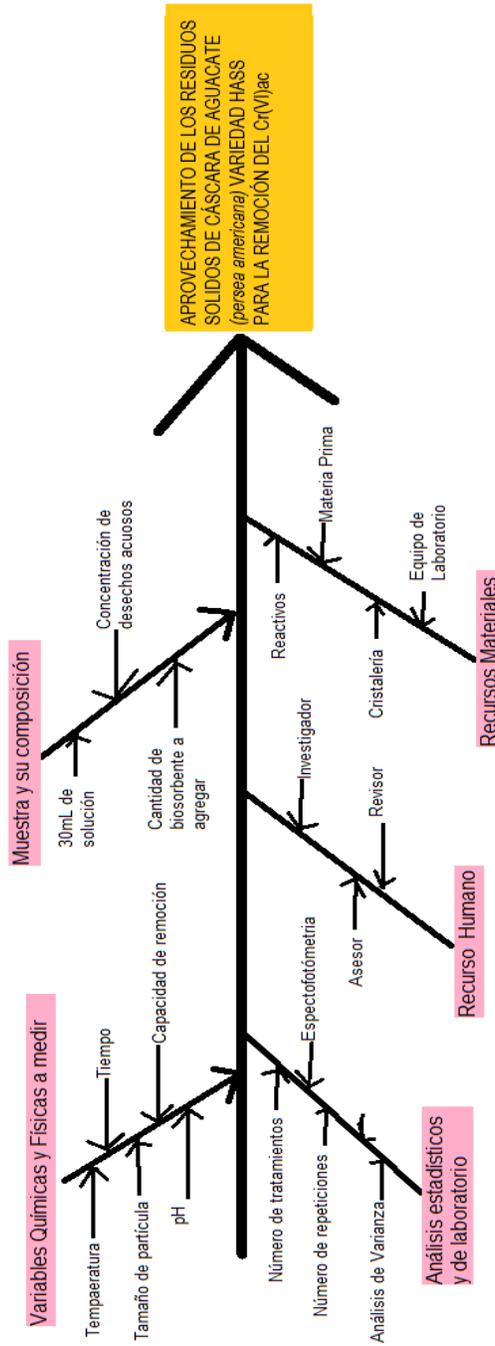
Fuente: elaboración propia, empleando MiniTab.

Apéndice 20. **Tabla de requisitos académicos**

Carrera	Área	Curso	Temática
Ingeniería Química	Área de Química	Química 3	Estequiometría. Reacciones químicas
		Química 4	Expresión de concentraciones. Equilibrio químico.
		Laboratorio de Físicoquímica 1	Diseño experimental de una investigación
		Laboratorio de Físicoquímica 2	Ley de Lambert Beer, uso del espectrofotómetro
	Área de Operaciones Unitarias	Transferencia de masa	Adsorción, Isoterma de Langmuir y Freundlich
	Área de Ciencias Básicas y Complementarias	Estadística 1	Estadística descriptiva
		Seminario de Investigación	Diseño de investigación para trabajo de graduación

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 21. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Secado de la cáscara de aguacate



Fuente: Laboratorio de tecnología de la madera, FIUSAC.

Anexo 2. **Molienda de la cáscara de aguacate**



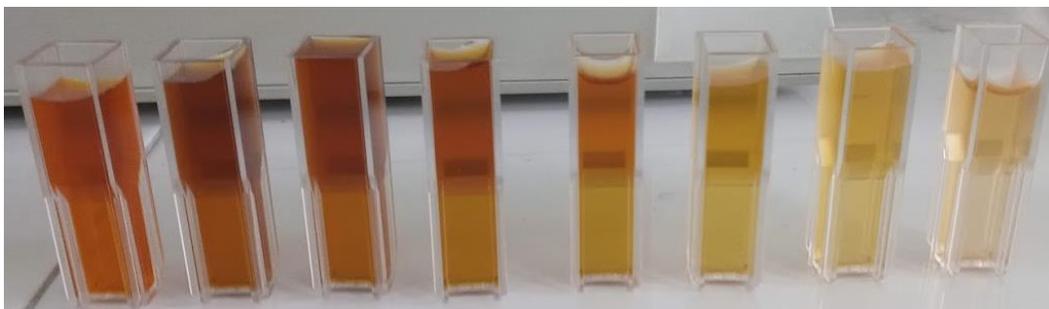
Fuente: Laboratorio de tecnología de la madera, FIUSAC.

Anexo 3. **Tamizaje y acondicionamiento de la cáscara de aguacate para su utilización como biosorbente**



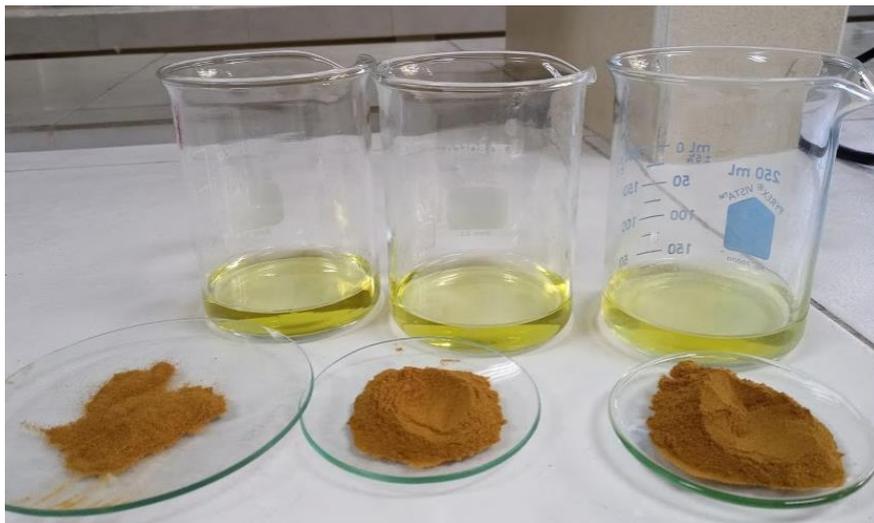
Fuente: Laboratorio de tecnología de la madera, FIUSAC.

Anexo 4. **Preparación de las distintas soluciones de dicromato de potasio y agua de cáscara de aguacate filtrada para la realización de la curva de calibración**



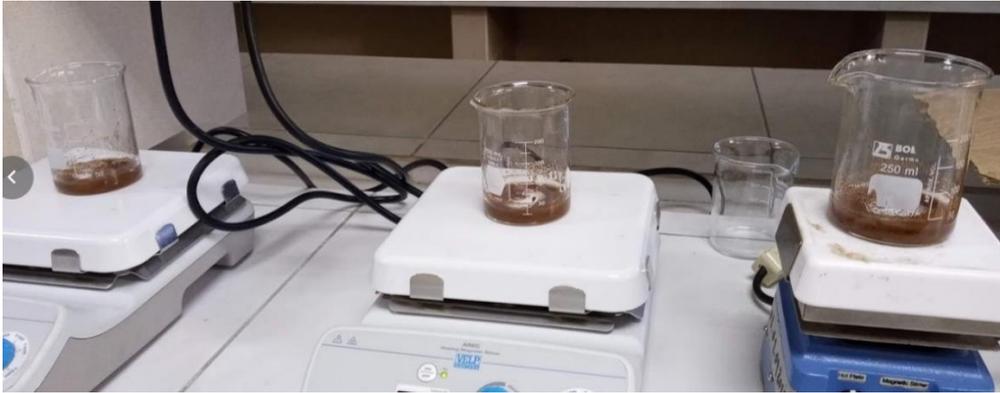
Fuente: Laboratorio 2 Escuela de Ingeniería Química, FIUSAC.

Anexo 5. **Cristalería y cáscara de aguacate separadas, listas para mezclarla con las soluciones**



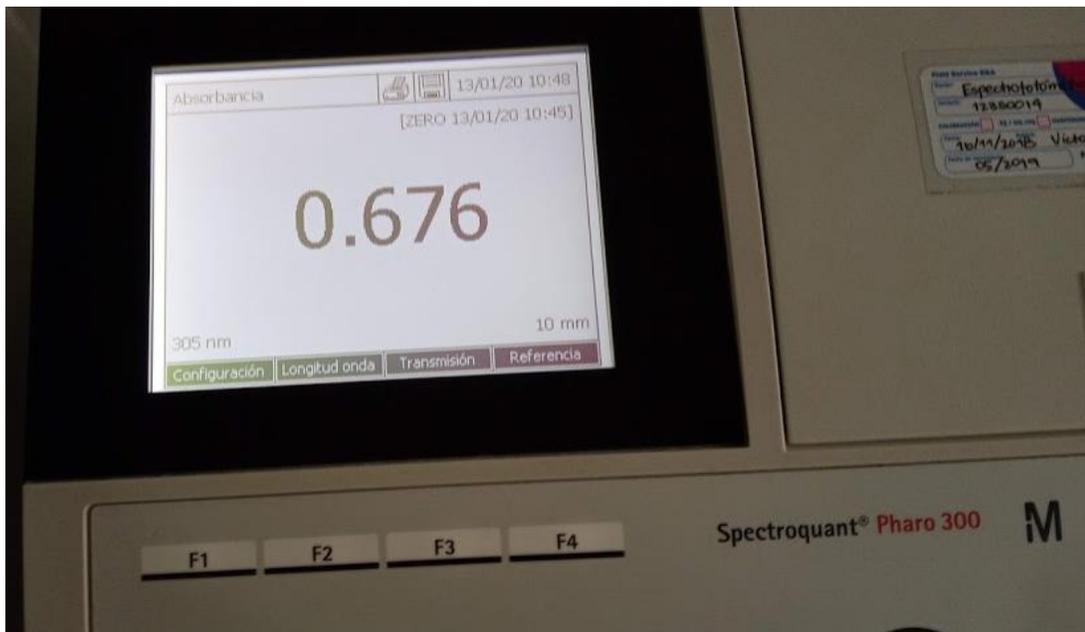
Fuente: Laboratorio 2 Escuela de Ingeniería Química, FIUSAC.

Anexo 6. **Agitación y filtración de las muestras**



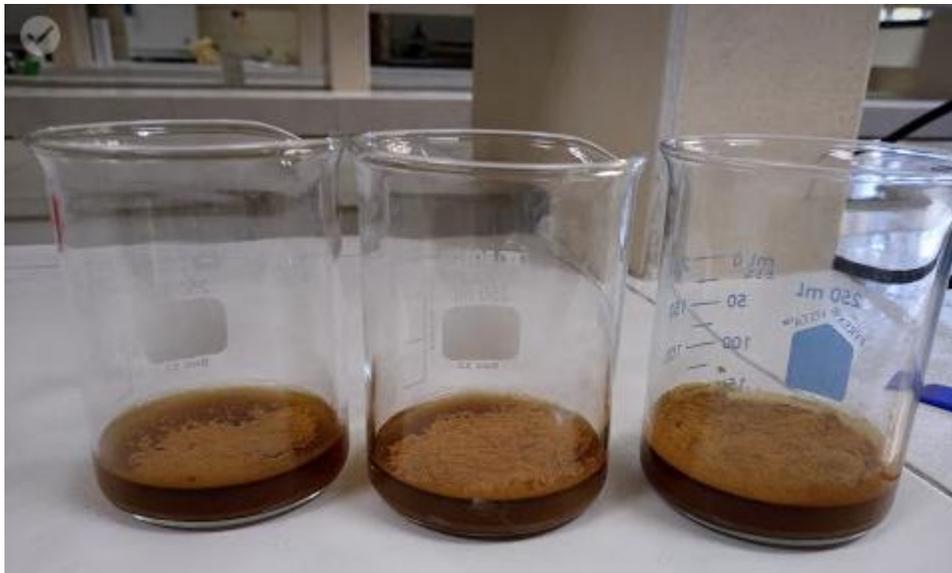
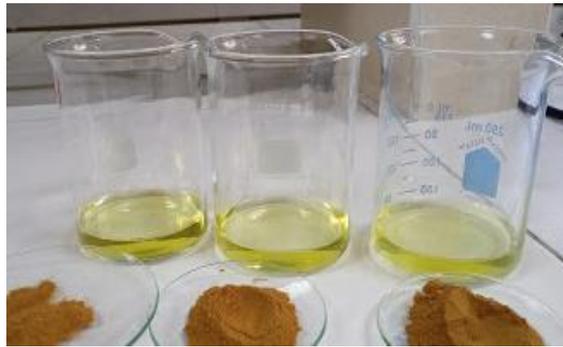
Fuente: Laboratorio 2 Escuela de Ingeniería Química, FIUSAC.

Anexo 7. **Análisis de las muestras mediante el espectrofotómetro**



Fuente: Laboratorio de análisis fisicoquímicos, LAFIQ, FIUSAC.

Anexo 8. **Problemática de coloración de los desechos de cromo**



Fuente: Laboratorio 2 Escuela de Ingeniería Química, FIUSAC.

Anexo 9. **Contenido de compuestos fenólicos y actividad antioxidante determinados a partir de extractos y residuos de cáscara de aguacate variedad Hass.**

Compuestos	Concentración	Actividad antioxidante (μ moles ET/g ps)		
		DPPH	ABTS	FRAP
Fenoles totales (mg EAG/100 g ps)*	5367.27 \pm 115.06	683.19 \pm 9.57	751.54 \pm 59.06	472.85 \pm 13.59
Taninos hidrolizables (mg EAG/100 g ps)	579.88 \pm 4.64	31.19 \pm 0.39	34.62 \pm 1.62	70.24 \pm 0.38
Taninos condensados (mg EC/100 g ps)	163.25 \pm 1.32	n.d.	115.82 \pm 3.29	204.78 \pm 4.62

Valores como la media \pm la desviación estándar (n=3). EAG: Equivalentes de Acido Gálico, EC: Equivalentes de Cianidina, ps: peso seco. ET: Equivalentes Trolox. *Compuestos fenólicos solubles en metanol:agua (80:20, v/v).

Fuente: CHÁVEZ, Ignacio. *Investigación en Alimentación y Desarrollo*. p.98.

