

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA QUIMICA

ADSORCIÓN DE COLORANTES TEXTILES ANIÓNICOS Y
CATIONICOS EN SOLUCIONES ACUOSAS USANDO
CARBÓN PROVENIENTE DE LA CÁSCARA DE AGUACATE

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE
LICENCIATURA EN INGENIERIA QUIMICA

Presenta:

Mara Elena Mendoza Román.

Asesor de tesis:

Dr. Rafael Huirache Acuña.

Coasesor de tesis:

Q.F.B. Ana Gabriela Rodríguez Calderón.

Morelia, Michoacán, Agosto 2018.

DEDICATORIA

A mis papas por su esfuerzo, dedicación, amor y comprensión que me dieron durante todos estos años.

A mis hermanos por su paciencia y por estar durante todos estos años a mi lado.

A mis abuelitos por demostrarme su cariño ante todo por sus consejos que han sido de mucha utilidad.

A mis tíos por su apoyo, consejos y cariño todo este tiempo.

A mis amigos que han demostrado estar a mi lado en los momentos buenos y malos sobre todo me han demostrado su cariño.

A Luis Gerardo Campos que ha estado durante estos años a mi lado apoyándome en todo momento por su paciencia y amor que me ha dado a lo largo de estos cinco años.

Al Ing. José Luis Tapia Huerta por su apoyo tanto a nivel profesional como personal, por la paciencia y conocimiento.

A la Q.F.B Ana Gabriela Rodríguez Calderón por su apoyo, dedicación y paciencia durante la experimentación y desarrollo de este proyecto de tesis.

A el Dr. Rafael Huirache Acuña por su apoyo y dedicación en la elaboración de este proyecto de tesis.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por la formación integral que me otorgó durante estos años en la carrera de ingeniería química.

Al laboratorio de Química por las facilidades para el desarrollo de este proyecto de tesis.

Al Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales y al Dr. Víctor Hugo López Morelos por facilitarme sus instalaciones para la realización de este proyecto de tesis.

A la Q.F.B Ana Gabriela Rodríguez Calderón y al Dr. Rafael Huirache Acuña por los conocimientos brindados durante la realización de este proyecto de tesis.

A el Dr. Raúl Cortés Martínez y la Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva por el apoyo para la realización de este proyecto.

Mi agradecimiento y respeto a todos mis profesores que he tenido durante mi formación profesional.

ÍNDICE

DEDICATORIAS.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ABREVIATURAS.....	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
1 INTRODUCCIÓN.....	12
2 JUSTIFICACIÓN	13
3 HIPÓTESIS.....	14
4 OBJETIVOS	15
4.1 OBJETIVO GENERAL	15
4.2 OBJETIVOS PARTICULARES	15
5 MARCO TEÓRICO	16
5.1 Contaminación del agua	16
5.2 Industria textil.....	16
5.3 Tratamiento de aguas residuales	17
5.4 Colorantes.....	17
5.5 Clasificación de los colorantes.....	18
5.5.1 Los colorantes se pueden clasificar según su origen natural o sintético	18
5.5.2 Clasificación de los colorantes de acuerdo a la aplicación en la tinción de las fibras textiles desde el punto de vista industrial	19
5.5.3 La clasificación desde el punto de vista de la constitución.....	20

5.6 Verde Básico 4.....21

5.7 Azul Directo 71.....21

5.8 Aminas aromáticas.....22

5.9 Tratamiento de aguas residuales.....22

5.10 Procesos de adsorción.....24

5.11 Factores que influyen en la adsorción.....25

5.12 Carbón activado.....25

5.13 Aguacate Hass.....27

5.14 Problemas ambientales.....27

5.15 Normas ambientales.....27

6 METODOLOGÍA.....28

6.1 Materia Prima.....28

6.2 Obtención de carbón activado.....28

6.3 Método de Bohem (contenido de grupos ácidos superficiales).....28

6.4 Método de prueba estándar para determinar la humedad ASTM-D2867.....29

6.5 Método de prueba estándar para el contenido de cenizas de carbón activado ASTM 2866-94.....29

6.6 Método de prueba estándar para materia volátil de carbón activado ASTM 5832-98...30

6.7 Método de prueba estándar para pH de carbón activado ASTM-03838-80.....31

6.8 Método de prueba estándar para solubles de agua de carbón activado ASTM D-5029. 31

6.9 Método de prueba para determinar el contenido de ácido de Carbón activado ASTM D 6385-99.....32

6.10 Cinética.....33

6.11 Dosis.....33

6.12 Comportamiento del pH.....34

6.13 Comportamiento de la Temperatura.....34

6.14 Isotermas.....34

6.14.1 Isotermas de Langmuir.....35

6.14.2 Isotherma de Freundlich.....35

6.14.3	Isotermas de Langmuir- Freundlich.....	36
6.14.4	Koble-Corrigan	36
6.15	Microscopia electrónica de barrido MEB.....	37
6.16	Brunauer Emmett Teller (BET).....	37
7	RESULTADOS Y DISCUSIONES	39
7.1	Método de Bohem	39
7.2	Características Químicas de acuerdo a la ASTM.....	39
7.3	Cinética	43
7.4	Dosis	44
7.5	Comportamiento del pH.....	45
7.6	Comportamiento de la temperatura.....	46
7.7	Isotermas.....	47
7.8	Microscopia electrónica de barrido MEB	49
7.9	Brunauer Emmett Teller BET	50
8	CONCLUSIONES.....	51
9	RECOMENDACIONES.....	52
10	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	53
11	ANEXOS.....	56
11.1	Curva de calibración	56

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. VERDE BÁSICO 4.	21
FIGURA 2. AZUL DIRECTO 71.....	21
FIGURA 3 TIEMPO DE EQUILIBRIO AZUL DIRECTO 71.....	43
FIGURA 4 TIEMPO DE EQUILIBRIO VERDE BÁSICO 4.	43
FIGURA 5 DOSIS DEL AZUL DIRECTO 71.	44
FIGURA 6 DOSIS DE VERDE BÁSICO 4.	44
FIGURA 7 COMPORTAMIENTO DEL PH DEL AZUL DIRECTO 71.	45
FIGURA 8 COMPORTAMIENTO DEL PH DEL VERDE BÁSICO 4.....	45
FIGURA 9 COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DEL AZUL DIRECTO 71.....	46
FIGURA 10 COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DEL VERDE BÁSICO 4.	46
FIGURA 11 CAPACIDAD DE ADSORCIÓN AD71.....	47
FIGURA 12 CAPACIDAD DE ADSORCIÓN VB4.....	47
FIGURA 13 MEB CÁSCARA DE AGUACATE, 10,000X.	49
FIGURA 14 MEB CARBÓN ACTIVADO DE CÁSCARA DE AGUACATE, 10,000X.	49
FIGURA 15. CURVA DE CALIBRACIÓN AD71.	57
FIGURA 16. CURVA DE CALIBRACIÓN VB4.....	57

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. GRUPOS CROMÓFOROS.	18
TABLA 2. GRUPOS AUXOCROMOS.....	18
TABLA 3. CLASIFICACIÓN SEGÚN SU ORIGEN.	18
TABLA 4. CLASIFICACIÓN DE ACUERDO A SU TINCIÓN.	19
TABLA 5. CLASIFICACIÓN DE ACUERDO A LA CONSTITUCIÓN.....	20
TABLA 6. MÉTODOS FÍSICOS	22
TABLA 7. MÉTODOS QUÍMICOS	22
TABLA 8. MÉTODOS BIOLÓGICOS	23
TABLA 9. TAMAÑO DE PORO.	26
TABLA 10. GRUPOS ÁCIDOS	39
TABLA 11. CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL CARBÓN ACTIVADO DE CÁSCARA DE AGUACATE.....	39
TABLA 12.CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL CARBÓN ACTIVADO DE CÁSCARA DE AGUACATE.....	40
TABLA 13.CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL CARBÓN ACTIVADO DE CÁSCARA DE AGUACATE.	41
TABLA 14.CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL CARBÓN ACTIVADO DE CÁSCARA DE AGUACATE.	41
TABLA 15. SOLUBILIDAD ÁCIDO-AGUA.....	42
TABLA 16.MODELO MATEMÁTICO AZUL DIRECTO 71.....	47
TABLA 17.MODELO MATEMÁTICO VERDE BÁSICO 4.	48
TABLA 18. LONGITUD DE ONDA.	56
TABLA 19. CURVA DE CALIBRACIÓN.....	57

ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
AD71	Azul Directo 71.
VB4	Verde Básico 4.
MEB	Microscopia electrónica de barrido.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
BET	Brunauer Emmett Teller.
CAA	Carbón activado de cáscara de aguacate.
CA	Carbón activado.
Ce	Concentración final.
Co	Concentración inicial.
qe	Capacidad de adsorción.
S	Área de la superficie del adsorbente.
Rpm	Revoluciones por minuto.
pH	Potencial de hidrogeno.
UV/Vis	Ultravioleta visible.
atm	Unidad de presión (atmósfera).
g	Gramos.
mL	Mililitros.
h	Horas.
L	Litros.
nm	Nanometros.
min	Minutos.
°C	Grados Celsius.
°K	Grados Kelvin.
mm	Milímetros.
m	Metros.
mmol	Milimol.
As	Solubles en agua.
Hs	Solubles en ácido.
mg/L	Miligramos por litro.
m ² /g	Metro cuadrado por gramo.
m ³ /g	Metros cúbicos por gramo.
pHpzc	Punto de carga cero.

RESUMEN

En este trabajo de investigación se evaluó la capacidad de adsorción en un sistema por lotes de los colorantes Azul Directo 71 (aniónico) y Verde Básico 4 (catiónico) con un carbón activado obtenido de la cáscara de aguacate. El carbón fue obtenido por medio de un tratamiento térmico en atmósfera de N_2 , posteriormente se caracterizó por medio de microscopía electrónica de barrido (MEB), análisis de área superficial por fisorción de nitrógeno, análisis fisicoquímico por medio de las normas ASTM y una cuantificación de los sitios ácidos superficiales por medio del método de Bohem. Las micrografías revelan un material con una superficie rugosa y porosa, mientras que muestra un área superficial de $328.96 \text{ m}^2/\text{g}$ y microporos. De acuerdo con el análisis químico se obtuvo un pH de 9.88, solubilidad en ácido y agua de 1.73 y 2.16% respectivamente. Los experimentos de adsorción demuestran una capacidad de remoción de 90.73% en condiciones de 50 min, una dosis de 0.5 g, pH 7 y temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ para el colorante Azul Directo 71, mientras que para el colorante Verde Básico 4 obtuvo una remoción del 100% en un tiempo de 5 min, 0.02 g de dosis, pH 7 y $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Los isothermas de adsorción de ambos colorantes se ajustaron al modelo de Koble-Corrigan, donde la adsorción tiene lugar en el adsorbente de manera superficial y con un tipo heterogéneo. El carbón activado de cáscara de aguacate presenta características fisicoquímicas y texturales para aplicarse como adsorbente en un proceso operativo debido al bajo costo y fácil disponibilidad del precursor.

Palabras Clave: Adsorción, carbón activado de cáscara de aguacate, Azul Directo 71, Verde Básico 4.

ABSTRACT

In this research work, the adsorption capacity in a batch system of the Direct Blue 71 (anionic) and Basic Green 4 (cationic) dyes was evaluated with an activated carbon obtained from the avocado peel. The coal was obtained by means of a thermal treatment in atmosphere of N_2 , later it was characterized by scanning electron microscopy (SEM), while surface area analysis by nitrogen adsorption, physicochemical analysis by means of the ASTM norms and a quantification of surface acid sites by means of the Boehm method. The micrographs reveal a material with a rough and porous surface, while showing a surface area of $328.96 \text{ m}^2/\text{g}$ and micropores. According to the physicochemical analysis a pH of 9.88 was obtained, solubility in acid and water of 1.73 and 2.16% respectively. The adsorption experiments demonstrate a removal capacity of 90.73% under conditions of 50 min, a dose of 0.5 g, pH 7 and temperature of 25°C for the Direct Blue dye 71, while for the Basic Green dye 4 it obtained a removal of 100% in a time of 5 min, 0.02 g of dose, pH 7 and 25°C . The adsorption isotherms of both dyes were adjusted to the Koble-Corrigan model, where the adsorption takes place in the adsorbent in a superficial manner and with a heterogeneous type. avocado shell activated carbon has physicochemical and textural characteristics to be applied as an adsorbent in an operative process due to the low cost and easy availability of the precursor.

Palabras Clave: Adsorption, avocado peel activated carbon, Direct Blue 71, Basic Green 4.

1 INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua por colorantes es uno de los problemas actuales a nivel mundial, debido a la alta demanda del agua en la industria textil, farmacéutica, cosmética, alimenticia y del papel. Los colorantes azoicos, son compuestos orgánicos sintéticos difíciles de biodegradar que se presentan en la industria textil, y son un problema debido su baja fijación en las telas y la reducción del grupo azo que conduce a la formación de aminas aromáticas las cuales han demostrado ser cancerígenas, tóxicos y mutagénicos, que afectan la vida acuática y ocasionan reacciones de sensibilidad para los seres humanos (Castañeda, 2009 ; Moncayo, 2010).

Los métodos para el tratamiento de efluentes que contienen colorantes, son procesos físicos, químicos y biológicos (Ensuncho, Milanés, & Robles, 2015). Entre los medios tradicionales para tratar estas aguas se encuentran la adsorción con carbón activado, el cual se considera un método sencillo y de bajo costo por su precursor lignocelulósico. El carbón activado es un adsorbente que presenta un elevado y variado grado de porosidad, una considerable superficie interna, un cierto contenido de grupos químicos superficiales y una cierta distribución de poros y por eso los átomos en la superficie de un sólido, atraen y retienen moléculas de otros compuestos causando la remoción de colorantes a tal grado que no se pueden detectar (Sevilla, 2002).

2 JUSTIFICACIÓN

Las aguas residuales contienen colorantes, especialmente las provenientes de la industria textil generando importantes impactos ambientales afectando la actividad biológica de los cuerpos receptores del agua. Por lo tanto, es importante mencionar que las industrias generadoras de descarga de agua contaminada, en la mayoría de los casos no les proporcionan tratamiento alguno debido a los altos costos en el uso de productos químicos en los sistemas de depuración convencionales, o porque no cuentan con sistemas adecuados para la reducción de colorantes (Aguilar, 2015).

Los procesos de adsorción son importantes para la eliminación de colorantes textiles, que se encuentran en aguas residuales y presentan importancia en el desarrollo de operaciones y procesos en la industria química con adsorbentes de origen natural como la cáscara de aguacate, coco y cacao entre otros, porque a partir de este tipo de desechos se beneficia al campo agrícola al aprovechar un producto de origen orgánico que es considerado como residuo, y ser utilizado para obtener materiales adsorbentes (Carriazo, Saavedra, & Molina, 2010).

3 HIPÓTESIS

El carbón activado obtenido de la cáscara de aguacate presentará propiedades fisicoquímicas que permitirán la adsorción de los colorantes Azul Directo 71 y Verde Básico 4 en soluciones acuosas en un sistema por lotes.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Evaluar la adsorción de colorantes Azul Directo 71 y Verde Básico 4 mediante carbón activado proveniente de la cáscara de aguacate en un sistema por lotes.

4.2 Objetivos particulares

1. Caracterizar el carbón activado para evaluar el comportamiento de adsorción de los colorantes Azul Directo 71 y Verde Básico 4.
2. Evaluar los parámetros de cinética y equilibrio de adsorción de los colorantes Azul Directo 71 y Verde Básico 4 con carbón activado de cáscara de aguacate.

5 MARCO TEÓRICO

5.1 Contaminación del agua

El agua se considera contaminada cuando su composición o estado no reúne las condiciones requeridas para los usos a los que se hubiera destinado en su estado natural. El crecimiento de la población y la industrialización incrementa los problemas de contaminación, el suministro de agua potable y el tratamiento de las aguas residuales (Castañeda, 2009).

5.2 Industria textil

La industria textil representa un importante sector económico a nivel mundial. Con el gran incremento de la demanda de productos textiles, la industria textil ha tomado un papel importante incrementando los volúmenes de descarga de aguas residuales, siendo este uno de los principales problemas de contaminación en el mundo (Aguilar, 2015). En general, estos efluentes de descarga textil se caracterizan por su alta alcalinidad, temperatura mayor a la ambiental, olor desagradable y color intenso (En et al., 2015).

La cantidad de agua empleada en los procesos textiles varía en forma considerable, dependiendo del proceso específico y del equipamiento utilizado por la planta. Por ejemplo, en el teñido con colorantes dispersos, se utilizan entre 100 y 150 litros de agua por kilogramo de producto. En la tinción con colorantes reactivos, las cifras varían entre 125 y 170 litros por kilogramo de producto (Lizama, 2008).

Las concentraciones de colorantes en las aguas residuales pueden alcanzar rangos entre 10 a 200 mg/L, principalmente de colorantes reactivos, los cuales son utilizados en un 60% en la industria y son también los que menor porcentaje de fijación a la tela tienen 50%. Significa entonces, que el 50% del colorante reactivo empleado para la tintura se perderá en el agua residual (Moncayo, 2010).

En la industria textil, los residuos de colorantes son los más difíciles de tratar. Esto es debido a que la gran mayoría son de origen sintético y poseen estructuras moleculares aromáticas complejas, lo cual los hace más difíciles de ser biodegradados (Castañeda, 2009).

Una gran proporción de los colorantes no son directamente tóxicos para los organismos vivos; sin embargo, la fuerte coloración que imparten a los medios de descarga puede llegar a suprimir los procesos fotosintéticos en la vida acuática a causa de la penetración de la luz disminuida y también pueden ser tóxicos por la presencia de metales, compuestos aromáticos, entre otros, por lo que su presencia debe ser controlada (Lizama, 2008).

Aparte de generar oscurecimiento en las aguas, algunos colorantes azo durante su transformación pueden ser tóxicos. Las aminas aromáticas que se generan de la ruptura del enlace azo son comúnmente conocidas por su potencial carcinogénico mutagénicos o teratogénicos en diversas especies microbiológicas, para la vida acuática (Aguilar, 2015).

5.3 Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de efluentes contaminados consiste en el conjunto de subtratamientos primarios, secundarios y terciarios aplicados para retirar contaminantes presentes en el agua residual. Los tratamientos primarios son de carácter fisicoquímico y tienen como objetivo retirar sólidos en suspensión, coloides, metales pesados, aceites y grasas. Los tratamientos secundarios son utilizados para retirar materia orgánica del agua. Finalmente, los tratamientos terciarios son aplicados para remover sales disueltas, microcontaminantes y para alcanzar una depuración fina del líquido. Todos estos tratamientos son aplicados en las aguas residuales de tipo textil (Moncayo, 2010).

5.4 Colorantes

Los colorantes son sustancias orgánicas solubles en medio ácido, neutro o básico, que poseen una estructura molecular insaturada conteniendo ciertos grupos conocidos como cromóforos y auxocromos. Los cromóforos son átomos responsables de producir el color y los auxocromos complementan el cromóforo y hace que la moléculas sean solubles en agua (Aguilar, 2015) los cuales son los responsables de la fijación de la molécula del colorante en el teñido e incluso intensificar la función de los grupos cromóforos. Son electrónicamente inestables y por eso absorben energía a determinada longitud de onda (Pérez, 2009).

En las tablas se mencionan los grupos cromóforos y auxocromos más comunes (Aguilar, 2015).

Tabla 1. Grupos cromóforos.

Grupo	Estructura
Azo	-N=N-
Carbonilo	-C=O
Nitro	-NO ₂
Quinona	O=CC=O

Fuente: Aguilar, 2015.

Tabla 2. Grupos auxocromos.

Grupo	Estructura
Amino	-NH ₂
Carboxilo	-COOH
Sufonato	-SO ₃ H
Hidroxilo	-OH

Fuente: Aguilar, 2015.

5.5 Clasificación de los colorantes

La clasificación de los colorantes y pigmentos, puede realizarse utilizando como criterios: la constitución molecular o estructura química, el grado de solubilidad en un medio o solvente específico y, la forma de aplicación sobre un tipo de fibra objetivo o material de soporte (Barrios-ziolo & Cardonagallo, 2018).

5.5.1 Los colorantes se pueden clasificar según su origen natural o sintético

Tabla 3. Clasificación según su origen.

Clasificación	Definición
Colorantes naturales	Estos a su vez se pueden dividir en colorantes naturales de origen animal, vegetal y mineral dentro de esta clasificación también se

	encuentran los colorantes orgánicos, procedentes de plantas y animales tales como la clorofila, carotenos, etc (Solis, 2013).
Colorantes sintéticos	Son pigmentos obtenidos por síntesis química. Pueden ser de dos clases: Síntesis de moléculas nuevas o síntesis de moléculas iguales a las que se encuentran en el medio natural (Solis, 2013).

5.5.2 Clasificación de los colorantes de acuerdo a la aplicación en la tinción de las fibras textiles desde el punto de vista industrial

Tabla 4. Clasificación de acuerdo a su tinción.

Clasificación	Definición
Directos o sustantivos	Se fijan directamente sobre la fibra, aunque también los hay para el algodón (Solis, 2013).
Indirectos o adjetivos	Requieren una preparación de la fibra mediante el empleo de un mordiente (Solis, 2013).
Ácidos	Son compuestos orgánicos, altamente solubles en agua, que se fijan a las fibras debido a la presencia de grupos ácido, principalmente grupos carboxílicos o sulfónicos. Forman interacciones iónicas entre los grupos funcionales cargados positivamente de las fibras y la carga negativa de los colorantes. Así mismo, se forman puentes de hidrógeno (Solis, 2013).
Básicos	Estos colorantes también denominados aniónicos, funcionan correctamente en acrílicos debido a su fuerte interacción iónica entre los grupos funcionales del colorante, los cuales principalmente son grupos aminos, con cargas negativas de copolímeros. Estos grupos aminos cuentan con una carga positiva neta en el grupo cromóforo de la molécula, que los hace particularmente activos frente a sustratos textiles con cargas negativas (Solis, 2013).
Neutros	Son sales alcalinas que se fijan directamente sobre las fibras vegetales (Solis, 2013).

Sobremordiente	Tiñen las fibras mordentadas con hidróxidos metálicos, formando lacas. Insolubles o pigmentos a la cuba o tina y de desarrollo sobre la fibra o al hielo (Solis, 2013).
----------------	---

5.5.3 La clasificación desde el punto de vista de la constitución

Tabla 5. Clasificación de acuerdo a la constitución.

Clasificación	Definición
Nitrocolorantes	Son derivados nitrados o polinitrados de fenoles, uno de cuyos grupos nitro por lo menos está en posición orto o para con el fenólico. Son colorantes ácidos, de los que se preparan sus sales sódica o amónica (Solis, 2013).
Azocolorantes	Es uno de los grupos más importantes. Contienen el cromóforo azo y el auxocromo puede ser básico. Su estructura se conoce por los productos de su reducción energética con estaño y ácido clorhídrico, que da dos aminas y se preparan por diazoación y copulación (Solis, 2013).
Colorantes de trifenilmetano	Son hidroxi- o aminoderivados del trifenilmetano (Solis, 2013).
Colorantes del índigo	El índigo o añil es el colorante más antiguamente conocido. Se obtiene de las hojas de ciertas especies de indigofera (Solis, 2013).
Colorantes Antraquinónicos	Son derivados hidroxi o aminoantraquinonas (Solis, 2013).
Colorantes de azufre	Se obtienen por fusión de sulfuro de sodio y una mezcla de este y azufre con diversas sustancias orgánicas (Solis, 2013).
Lacas	Son productos insolubles en agua obtenidos por la acción de hidróxidos metálicos sobre ciertos colorantes como la alizarina. Se utilizan en pintura y para fabricar tintas de imprenta (Solis, 2013).

Los colorantes también se pueden dividir en: Hidrosolubles, Liposolubles, Insolubles (Solis, 2013).

5.6 Verde Básico 4

El Verde Básico 4 o Verde de Malaquita N, N, N', N'-tetrametil-4,4'-metilado diaminotrifenílcarbenio cloruro $C_{23}H_{25}N_2Cl$ (PM: 364.91g/mol). Es un colorante catiónico es generalmente usado para teñir algodón, madera, seda, papel, cuero y también en destilerías. También es usado como agente terapéutico o como antiséptico en acuicultura y otras industrias. Es conocido por ser altamente tóxico a células de mamífero y por actuar como promotor de tumores de hígado (Castillo, 2010).

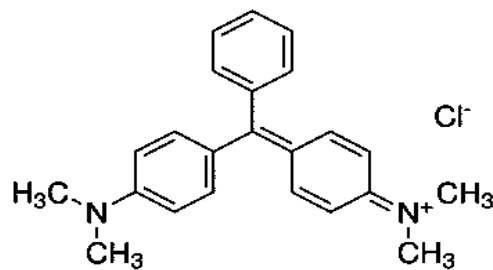


Figura 1. Verde Básico 4.

5.7 Azul Directo 71

El colorante Azul Directo 71 $C_{40}H_{28}N_7NaO_{13}S$ (P.M: 965.94 g/mol) es un colorante triazoico, aniónico, soluble en agua, ligeramente soluble en etanol e insoluble en otros solventes orgánicos. En su estructura presenta cuatro grupos sulfonatos SO_3 , tres enlaces azo $N=N$, un grupo hidroxilo OH - y una amina primaria NH_2 (Zhang et al., 2011). Este colorante aniónico es generalmente usado para teñir ropa.

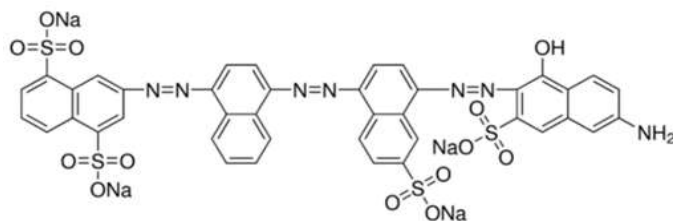


Figura 2. Azul Directo 71.

5.8 Aminas aromáticas

Las aminas aromáticas generan problemas al ambiente debido a su toxicidad y persistencia. Las aminas aromáticas son poco solubles en agua y su basicidad se modifica dependiendo de los sustituyentes (CH₃, Cl, NO₂, etc.) (Huerta, 2011).

Las aminas se dividen en: aminas alifáticas y aminas aromáticas; estos dos grupos pueden clasificarse en aminas primarias, secundarias y terciarias según el grado de sustitución (Aguilar, 2015). La toxicidad de amina aromáticas depende de la localización del grupo amino.

5.9 Tratamiento de aguas residuales

Tabla 6. Métodos Físicos

Métodos Físicos	
Adsorción	El carbón activado es un excelente adsorbente que se produce de tal forma que presenta una alta superficie específica y elevada porosidad. Estas características, junto con la naturaleza química de su superficie le permiten atraer y retener superficialmente ciertos compuestos (Aguilar, 2015).
Filtración por membrana	El método tiene la habilidad para clarificar, concentrar y principalmente, para separar continuamente el colorante del efluente (Castañeda, 2009).

Tabla 7. Métodos Químicos

Métodos Químicos	
Proceso electroquímico	El tratamiento de agua con procesos electroquímicos se realiza en celdas electroquímicas donde se inducen reacciones de óxido-reducción en la disolución a tratar hasta obtener su degradación (Uriostegui, 2014).
Procesos Fotoquímicos	El radical hidroxilo tiene la capacidad de oxidar compuestos orgánicos y por tanto la iniciativa de explorar su generación fotoquímica. Los métodos fotoquímicos para la degradación de

	contaminantes disueltos en agua se basan en proporcionar energía a los compuestos químicos en forma de radiación, que es absorbida por las distintas moléculas para alcanzar estados excitados el tiempo necesario para experimentar reacciones (Uriostegui, 2014).
Proceso no fotoquímico	Estos procesos originan especies reactivas potentes, principalmente el radical hidroxilo, a través de la transformación de especies químicas o mediante la utilización de distintas formas de energía, con excepción de la irradiación luminosa (Uriostegui, 2014).
Proceso de Oxidación avanzada	Algunos PAO, como la fotocatalisis heterogénea, la radiólisis y otras técnicas avanzadas, recurren además a reductores químicos que permiten realizar transformaciones en contaminantes tóxicos poco susceptibles a la oxidación, como iones metálicos o compuestos halogenados (Uriostegui, 2014).
Coagulación-Precipitación	En el tratamiento de aguas residuales, la eliminación de un gran número de impurezas se lleva a cabo por medio de la sedimentación, De otra manera, debido a que muchas de las impurezas son demasiado pequeñas para obtener un proceso de eliminación eficiente por sedimentación basado solo por gravedad, es necesario la agregación de estas partículas en agregados de mayor tamaño y de tal manera obtener una separación satisfactoria. (Aguilar, 2015).

Tabla 8. Métodos Biológicos

Métodos Biológicos	
La biodegradación	Conduce a la oxidación del colorante, y requiere nutrientes y condiciones ambientales adecuadas para el crecimiento del microorganismo (Puentes, 2010).

La biosorción	Puede ser aplicada utilizando microorganismos vivos muertos o inmovilizados en diferentes tipos de matrices poliméricas, con la posibilidad de recuperar el colorante y reutilizar la biomasa (Puentes, 2010).
Métodos enzimáticos	Esta decoloración puede ser resultado de la retención física del colorante en la biomasa o de la transformación bioquímica del colorante a través del metabolismo (Castañeda, 2009).
Tratamiento anaerobio	Sin embargo, bajo condiciones anaerobias muchos tipos de bacterias pueden reducir esta clase de colorantes, eliminando la ligadura azo y formando aminas aromáticas (Aguilar, 2015).
Tratamiento aerobio	En lo particular el tratamiento aerobio que son basados en consorcios de bacterias en sistemas convencionales no son capaces de degradar tintes procedentes de efluentes textiles (Aguilar, 2015).
Tratamiento anaerobio-aerobio	Por lo general el tratamiento anaerobio presenta mayor reducción de tintes azo que la degradación aerobia, sin embargo los productos generados tales como aminas aromáticas presentan mayor toxicidad y deben ser degradados (Aguilar, 2015).

5.10 Procesos de adsorción

Se le llama adsorción al proceso mediante el cual ciertos sólidos porosos ligan una gran cantidad de moléculas provenientes de un fluido a sus superficies que alcanza un punto de equilibrio entre la adsorción y desorción y que sigue una determinada trayectoria cinética para alcanzarlo (Solis, 2013 ; Leonardo, 2014).

Se ha determinado que la adsorción es un método de remoción de compuestos orgánicos que causan olor, color y sabor indeseable en el agua y es una de las técnicas más favorables de tratamiento de aguas residuales con colorantes en términos de costo, sencillez de diseño y facilidad de manejo,

además de ser independiente de la toxicidad de los contaminantes (Pérez, 2009).

La adsorción física también conocida como fisisorción se debe a las moléculas que son atraídas por superficies como resultado de dos tipos de fuerzas: fuerzas de dispersión-repulsión, también llamadas fuerzas de London o de Van der Waals, y fuerzas electrostáticas, las cuales existen gracias a que alguna molécula o grupo de superficie tenga un momento eléctrico dipolo o cuadrupolo permanente o una carga eléctrica neta se encuentran muy cercanos entre sí, las moléculas adsorbidas pueden interactuar entre ellas, sin embargo, si estos sitios están muy dispersos, las moléculas adsorbidas pueden interactuar solo en estos espacios (Solis, 2013).

La fisisorción se representa por isothermas de adsorción que tienden a presentar pendiente creciente, a medida que se aumenta la presión o la concentración de equilibrio. La fisisorción es un proceso reversible, siendo posible la recuperación o “desorción” (Castañeda, 2009).

En la quimisorción las fuerzas entre las moléculas del adsorbente y las del adsorbato son de naturaleza química, pudiéndose formar compuestos químicos y, en general, es irreversible. El calor liberado durante la quimisorción suele ser elevado, parecido al de una reacción química, al contrario de lo que ocurre en la fisisorción (Castañeda, 2009).

5.11 Factores que influyen en la adsorción

La remoción de colorantes mediante la adsorción es afectada por diferentes factores, tales como pH, temperatura y concentración de la masa.

El pH influye sobre los grupos funcionales de la pared que participan en la unión de los contaminantes, además afecta la estructura química del colorante, facilitando o dificultando su remoción.

5.12 Carbón activado

La adsorción sobre carbón activo, es un método de tratamiento avanzado de agua residual que se emplea para la eliminación tanto de compuestos orgánicos refractarios, como de las concentraciones

residuales de compuestos inorgánicos como nitrógenos, sulfuros y metales pesados (Sevilla, 2002). La diferencia fundamental entre uno y otro tipo de carbón radica en la estructura, o arreglo de sus átomos. En el caso del carbón activo, éstos se encuentran combinados en forma de placas granítica (Sevilla, 2002).

Un carbón activado es un material microcristalino, carbonoso, y no grafitico, lo componen estructuras bidimensionales de planos hexagonales estos planos se encuentran desplazados unos respecto a otros y solapando entre sí, por lo que muestra una estructura altamente desordenada, es por eso que se les denomina carbones no grafiticos. El proceso de activación puede ser mediante gases oxidantes, o adición de productos químicos, con la finalidad de ampliar su porosidad y desarrollar su superficie interna, lo que le confiere una alta capacidad adsorbente (Martínez de Yuso, 2012).

Entre los microcristales que constituyen el carbón, existen huecos o espacios vacíos los cuales se denominan poros. El área superficial total de estos poros, incluida el área de sus paredes, es muy amplia, siendo ésta la principal razón de su gran capacidad de adsorción. El volumen de los microporos es en general mayor de 0.2 cm³/g pudiendo alcanzar elevados valores de área de superficie específica interna (Sevilla, 2002). De acuerdo con la terminología de la IUPAC los poros se clasifican de acuerdo a su tamaño:

Tabla 9. Tamaño de poro.

Tamaño de poro	
Microporos	≤ 2 nm.
Macroporos	> 50 nm.
Mesoporos	2-50 nm.

Los poros de adsorción consisten en espacios entre placas graníticas. En éstos, las placas de carbón están cerca y ejercen atracción sobre el adsorbato con mayor fuerza. Los poros de transporte son de tamaño mayor, y tienen un rango amplio que corresponde a 0.1 mm. En esta clase de poros, sólo una placa ejerce atracción sobre el adsorbato y entonces lo hace con una fuerza menor. Actúan como caminos de difusión por los que circula la molécula hacia los poros de adsorción en los que hay una

atracción mayor (Sevilla, 2002 ; Castañeda, 2009).

Las condiciones en las que un carbón tenga una carga neta negativa serán preferibles para adsorber cationes y aquellas en las que presente una carga neta positiva lo serán para adsorber aniones. La composición química del carbón activo es aproximadamente un 75-80% en carbono, 5–10% en cenizas, 60% en oxígeno y 0.5% en hidrógeno (Sevilla, 2002).

5.13 Aguacate Hass

En Michoacán, México, se encuentra la región productora de aguacate más grande del mundo, con una superficie superior a 103 mil hectáreas, distribuidas en 45 municipios y en altitudes que varían de 1,000 a más de 2,600 m. (Rocha-Arroyo, Salazar-Garcia, Barcenas-Ortega, Gonzalez-Duran, & Cossio-Vargas, 2011).

5.14 Problemas ambientales

La Comisión Nacional del Agua a través del Comité Técnico de Normalización Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales, tiene a su cargo las Normas Mexicanas en materia de análisis de agua, para aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas y las Normas Mexicanas de productos químicos utilizados en la potabilización de agua para uso y consumo humano, lo anterior para fomentar el uso sustentable del agua y la calidad de los servicios de agua potable alcantarillado y saneamiento (Uriostegui, 2014).

5.15 Normas ambientales

NORMA Oficial Mexicana NOM-CCA-014-ECOL/1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria textil.

NORMA Oficial Mexicana NOM-CCA-015-ECOL/1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria de la celulosa y el papel.

6 METODOLOGÍA

6.1 Materia Prima

Cáscara aguacate Hass (*Persea americana* MILL) pretratada de acuerdo a la metodología de Rodríguez (2017).

6.2 Obtención de carbón activado

El carbón activado se obtuvo por un tratamiento térmico en un horno tubular horizontal Carbolite de atmósfera controlada con un flujo de gas de N₂. Las condiciones utilizadas fueron de acuerdo a la metodología de Palma et al. (2016). El carbón obtenido se lavó con agua desionizada durante 5 minutos para eliminar impurezas, posteriormente se secó en un crisol durante 24 h a 60°C y se tamizó para tener un tamaño de partícula de 35 micras (µm) (Rodríguez, 2017).

6.3 Método de Bohem (contenido de grupos ácidos superficiales)

Se llevó a cabo la determinación de grupos ácidos y básicos totales siguiendo la metodología de Boehm (Garcés, Hernández, Peñuela, Rodríguez, & Salazar, 2004).

Se adicionó 0.5 g de carbón y 50 mL de soluciones de hidrógeno carbonato de sodio (NaHCO₃), carbonato de sodio (Na₂CO₃) e hidróxido de sodio (NaOH) de 0.05 mol/L cada una en un matraz diferente.

Luego de 10 días en agitación de vaivén hasta llegar al punto de equilibrio se filtra con una membrana del número 40 se tomó una alícuota de 10 mL de muestra y se tituló con HCl de 0.05 mol/L.

Los grupos superficiales ácidos por gramo de adsorbente se determinaron mediante la ecuación utilizada por (Garcés et al., 2004):

$$n_{G/M} = \frac{n_{iB} - n_{rB}}{m} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

$n_{G/M}$: Contenido de grupos superficiales, mmol/g.

n_{iB} : Cantidad de sustancia inicial de la base, mmol.

n_{rB} : Cantidad de sustancial residual de la base, mmol.

m : Masa de carbón, g.

6.4 Método de prueba estándar para determinar la humedad ASTM-D2867.

Este método de prueba describe el procedimiento para que determino el porcentaje de humedad existente en el carbón activado.

1. En un crisol pesar 1 g de cada muestra.
2. Llevar a una estufa precalentada a 145 – 150 °C.
3. Secar durante un tiempo de 3 h.
4. Llevar a un desecador.
5. Pesar.

El contenido de humedad en base seca se determinó a partir de la ecuación:

$$H = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

H : Contenido de humedad, %.

m_h : Masa de la muestra húmeda, g.

m_s : Masa de la muestra seca, g.

6.5 Método de prueba estándar para el contenido de cenizas de carbón activado ASTM 2866-94

Este método de prueba describe el procedimiento que determino el contenido total de ceniza y carbono fijo de carbón activado.

1. Pesar en un crisol 0.1 g de muestra seca.
2. Llevar la mufla a 650 °C de 3 a 16 horas.
3. Retirar muestra y llevar a un desecador.

4. Pesar.

El contenido de cenizas y carbono fijo se determinó a partir de las ecuaciones:

$$c_e = \frac{m_{ce}}{m_s} \times 100 \quad (\text{Ec. 3})$$

$$c_f = \frac{m_{nv} - m_{ce}}{m_s} \times 10 \quad (\text{Ec.4})$$

Donde:

c_e : Contenido de cenizas, %.

c_f : Contenido de carbono fijo, %.

m_{ce} : Masa de cenizas, g.

m_{nv} : Masa de compuestos no volátiles, g.

m_s : Masa la muestra seca, g.

6.6 Método de prueba estándar para materia volátil de carbón activado ASTM 5832-98.

Se determino el contenido de materia volátil en el carbón activado.

1. En un crisol pesar 1 g de muestra seca.
2. Llevar a una mufla a 950 °C durante un tiempo de 7 min (950°C ± 25°C, 7 min ± 105 min).
3. Retirar muestra y llevar a un desecador.
4. Pesar.

$$V = \frac{m_s - m_{nv}}{m_s} \times 100 \quad (\text{Ec.5})$$

Donde:

m_{nv} : Masa de compuestos no volátiles, g.

m_s : Masa la muestra seca, g.

V : Materia volátil.

6.7 Método de prueba estándar para pH de carbón activado ASTM-03838-80.

Este método de prueba determino el pH de un extracto de agua de carbón activado que tenga un tamaño de partícula menor a 50 micras.

1. Pesar 10.00 ± 0.01 g de carbón base seca. Retirar el matraz bolo y adicionar el carbón pesado.
2. Medir 100 ± 0.1 mL de agua caliente en un cilindro graduado inmediatamente agregar esta agua al carbón en el matraz. Agregar 110 mL de agua desionizada al refrigerante. Reconectar el sistema.
3. Hervir suavemente por 900 ± 10 s.
4. Quitar matraz de la parrilla y filtrar a una temperatura de $50 \pm 5^\circ\text{C}$ en un filtro del número 40.
5. Determinar el pH como esta descrito en los métodos de prueba ASTM-D1293.

Se realizaron las pruebas con un potenciómetro de Mesa Phs-25cw con una precisión ± 0.05 pH y resolución 0.01pH.

6.8 Método de prueba estándar para solubles de agua de carbón activado ASTM D-5029.

De acuerdo a la ASTM D-5029 se determinó el porcentaje de solubilidad en agua que se encuentra en el carbón activado (Garcés et al., 2004).

1. Pesar 10 g de carbón pulverizado a un matraz florentino.
2. Agregar 100 mL de agua desionizada y mezclar.
3. Conectar el frasco al condensador, hervir en reflujo durante 1 hora.
4. Retirar el matraz florentino y filtrar con tres porciones de 25 mL de agua desionizada con un filtro del número 40.
5. Dejar enfriar a temperatura ambiente.
6. Transferirlo a un frasco volumétrico de 250 mL
7. Pesar un platillo seco y limpio a peso constante.
8. Pipetear 50 mL en el platillo y evaporar durante 3 horas.
9. Llevar a un desecador durante 15 minutos y después pesar.
10. Pesar nuevamente después de 1 hora.

$$As = \frac{B-G}{m} \times 100 \quad (\text{Ec.6})$$

Donde:

As: Solubles en agua, %.

B: Masa de plato más solubles en agua, g.

G: Masa de plato vacío, g.

m: Masa de carbón, g.

6.9 Método de prueba para determinar el contenido de ácido de carbón activado ASTM D 6385-99.

Este método de prueba determino el porcentaje de solubilidad de ácido que se encuentra en el carbón activado (Garcés et al., 2004).

1. Pesar 10 g de carbón pulverizado a un matraz florentino.
2. Agregar 100 mL de agua desionizada y 10 mL de ácido clorhídrico concentrado y mezclar.
3. Conectar el frasco al condensador, hervir en reflujo durante 1 hora.
4. Retirar el matraz florentino y filtrar con tres porciones de 25 mL de agua desionizada con un filtro del número 40.
5. Dejar enfriar a temperatura ambiente.
6. Transferirlo a un frasco volumétrico de 250 mL.
7. Pesar un platillo seco y limpio a peso constante.
8. Pipetear 50 mL en el platillo y evaporar durante 3 horas.
9. Llevar a un desecador durante 15 minutos y después pesar.
10. Pesar nuevamente después de 1 hora.

$$Hs = \frac{C-G}{m} \times 100 \quad (\text{Ec.7})$$

Donde:

Hs: Solubles en acido, %.

C: Masa de plato más solubles en acido, g.

G: Masa de plato vacío, g.

m: Masa de carbón, g.

6.10 Cinética

Se realizó la determinación por triplicado del tiempo, dosis, pH y temperatura en un sistema por lotes entre el carbón activado de cáscara de aguacate en una solución a 10 mg/L de cada colorante. Para determinar las condiciones óptimas de adsorción con carbón activado de cáscara de aguacate, se realiza la siguiente metodología: Se pesó 0.1 g carbón activado de cáscara de aguacate, posteriormente poner en contacto 10 mL de las soluciones a una concentración de 10 mg/L de los colorantes AD71 en un tiempo máximo de 180 min y VB4 por un tiempo máximo de 30 min, se agito en un termobañó de agitación a 85 rpm a temperatura ambiente luego se tomó una alícuota cada cierto tiempo de 10 mL y se filtró con una membrana del número 40, por último, se lee en un espectrofotómetro UV/Visible.

El porcentaje de remoción se calculó usando la siguiente ecuación:

$$\% R = \frac{C_o - C_e}{C_i} \times 100 \quad (\text{Ec.8})$$

Donde:

% R: Remoción, %.

C_o: Concentración inicial de la muestra, mg/L.

C_e: Concentración final de la muestra, mg/L.

6.11 Dosis

Se determino la dosis de carbón activado de cáscara de aguacate en un sistema por lotes variando la cantidad de carbón activado de cáscara de aguacate adicionada en cada muestra. Para el AD71 de 0.1 a 1 g en un tiempo de 50 min y para el VB4 de 0.01 a 0.1 g, en un tiempo de 5 min determinado.

6.12 Comportamiento del pH

Se evaluó un rango de pH entre 4 y 10 con un potenciómetro de Mesa Phs-25cw con una precisión ± 0.05 pH y resolución 0.01pH. El pH inicial de la solución de colorante fue modificado con NaOH y HCl 1M. Se mantiene constante la concentración inicial de colorante en cuanto a la dosis de adsorbente y el tiempo se modificaron de acuerdo a los datos obtenidos.

6.13 Comportamiento de la Temperatura

Obteniendo el tiempo, dosis, y pH se evaluó el comportamiento de temperatura de 20°C a 40°C modificando la temperatura en el termobañó con una concentración de 10 mg/L.

6.14 Isotermas

Se construyeron isotermas de adsorción en un intervalo de concentraciones de 10 mg/L a 600 mg/L para el colorante AD71 y de 10 mg/L a 120 mg/L para el colorante VB4, los ensayos se realizaron con las condiciones de tiempo, masa, pH y temperatura en un sistema por lotes para obtener los porcentajes de remoción.

La capacidad total de remoción es un parámetro en el análisis de cualquier sistema de adsorción, ya que la misma caracteriza a los adsorbentes y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) * V}{m} \times 100 \quad (\text{Ec.9})$$

Donde:

q_e: Capacidad de adsorción en un tiempo determinado, mg/g.

C_o: Concentración inicial de colorante en disolución, mg/L.

C_e: Concentración final de colorante en disolución, mg/L.

V: Volumen de la solución con colorante L.

m: Cantidad de masa, g.

La isoterma de adsorción es la función matemática que relaciona en el equilibrio, la cantidad de una sustancia adsorbida con la presión, si el adsorbato es un gas, o con la concentración, si el adsorbato se encuentra disuelto a temperatura constante.

6.14.1 Isotermas de Langmuir

Esta isoterma describe cuantitativamente la formación de monocapa de colorante, en la superficie del adsorbente considerando que todos los sitios del sólido tienen la misma actividad para la adsorción y que no existe una interacción entre las moléculas adsorbidas (Leonardo, 2014). La ecuación de Langmuir se representa por la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{q_m a_L C_e}{1 + a_L C_e} = \frac{K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (\text{Ec.10})$$

Donde:

q_e : Es la cantidad de soluto por unidad de peso de adsorbente en el equilibrio, mg/g.

C_e : es la concentración de soluto en la solución mg/L.

q_m : Es la cantidad de soluto retenido por unidad de peso del adsorbente en la formación de una monocapa completa en la superficie mg/g.

K_L : Es la constante de Langmuir L/mg.

a_L : Es la constante relacionada con la energía o entalpía neta de adsorción.

Los parámetros de la isoterma de adsorción de Langmuir fueron determinados transformando la ecuación en su forma lineal, obteniendo:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{q_m K_L C_e} \quad (\text{Ec.11})$$

6.14.2 Isoterma de Freundlich

En esta isoterma se asume que la superficie del adsorbente es energéticamente heterogénea, conformada por grupos de sitios de adsorción de energías características. La isoterma de Freundlich

se puede obtener teóricamente suponiendo que la distribución de la energía de adsorción en los sitios activos del adsorbente es esencialmente de tipo exponencial. Así, se considera que no existen interacciones laterales entre las moléculas adsorbidas y que sólo se adsorbe una monocapa (Puentes, 2010).

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n_F}} \quad (\text{Ec.12})$$

Donde:

q_e : Es la cantidad de soluto por unidad de peso de adsorbente en el equilibrio, mg/g.

K_F : Es la constante de la isoterma que indica capacidad de adsorción, mg/g.

C_e : Es la intensidad de adsorción, es la concentración en el equilibrio del adsorbato mg/L.

n_F : Es la constante de equilibrio.

Linealizando la ecuación de Freundlich:

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (\text{Ec.13})$$

6.14.3 Isotermas de Langmuir- Freundlich

$$q_e = \frac{K_{LF} C_e^{\frac{1}{n}}}{1 + a_{LF} C_e^{\frac{1}{n}}} \quad (\text{Ec.14})$$

Donde:

q_e : Es la cantidad de soluto por unidad de peso del adsorbente, mg/g.

C_e : Es la concentración de soluto en la solución en el equilibrio, mg/L.

K_{LF} , a_{LF} : Son constantes empíricas.

6.14.4 Koble-Corrigan

El modelo de Koble-Corrigan es otra isoterma de tres parámetros y consiste en la combinación de los

modelos de isothermas de Freundlich y Langmuir. Este modelo se aplica generalmente para superficies de adsorbente heterogéneas (Kayranli, 2011).

$$q_e = \frac{K_{LF} C_e^n}{1 + a_{LF} C_e^n} \quad (\text{Ec.15})$$

Donde:

q_e : Es la cantidad de soluto por unidad de peso del adsorbente, mg/g.

C_e : Es la concentración de soluto en la solución en el equilibrio, mg/L.

K_{LF} , a_{LF} : Son constantes empíricas.

6.15 Microscopia electrónica de barrido MEB

La superficie del carbón activado de cáscara de aguacate se analizó por medio de un microscopio electrónico de barrido.

Se cubrió la muestra de carbón activado de cáscara de aguacate con oro y se analizaron las muestras en un microscopio de barrido de emisión de campo JSM-7401F con un cañón de emisión de campo en frío (cold FE) de 30 kV resolución de 1.0 nm (15kV) 1.5 nm (1.0kV) con un voltaje de aceleración de 0.1 a 30 kV, detectores de electrones secundarios y retractable de retrodispersadores, detectores “in-lens” con filtro “r” modo has atenuado (gentle beam). Acoplado a un detector de modo STEM.

6.16 Brunauer Emmett Teller (BET)

Se determinó el área superficial, la distribución, volumen, tamaño de poro, y densidad de la partícula del carbón activado de la cáscara de aguacate, por el método Brunauer Emmett Teller (Primera pedrozo, Colpas castillo, & Meza fuentes, 2011).

Las propiedades de textura del carbón activado de cáscara de aguacate área específica, volumen de los poros y el diámetro promedio de los poros se determinó por la superficie específica BET por medio

de un equipo autostob Q, por medio de la adsorción y desorción de nitrógeno en las muestras previamente secadas y desgasificadas a 300°C durante 58:50 h*min a vacío 0.1 mm Hg.

Los datos de la isoterma de adsorción de N₂ sobre el adsorbente, V vs. P, se interpretan con la ecuación de la isoterma de BET linealizada, que se expresa de la forma siguiente:

$$\frac{P}{V(P_0-P)} = \left(\frac{1}{V_{mc}c}\right) + \left[\left(\frac{c-1}{V_{mc}c}\right)\left(\frac{P}{P_0}\right)\right] \quad (\text{Ec.16})$$

$$c = \exp\left[\left(\frac{E_1-E_2}{RT}\right)\right] \quad (\text{Ec.17})$$

Donde:

P : Presión de N₂ en equilibrio con el gas adsorbido sobre el adsorbente, atm.

P₀: Presión de saturación del N₂ a la temperatura del experimento, atm.

V : Volumen del N₂ adsorbido referido a presión y temperaturas normales, m³.

V_{mc}: Volumen del N₂ adsorbido referido a presión y temperatura normales que se requiere para formar la monocapa sobre la superficie del adsorbente, m³.

E₁: Calor de adsorción de la primera capa de N₂, cal/mol.

E₂ : Calor de licuefacción del N₂, cal/mol.

R: Constante de los gases ideales, cm³ *atm/mol*K.

T: Temperatura absoluta, K.

El área específica del adsorbente, S, se evaluó a partir de V_{mc} y el área ocupada por una molécula de nitrógeno a las condiciones a las cuales se determinó la isoterma de adsorción. El cálculo de S se efectuó con la ecuación siguiente:

$$S = \left(\frac{P_s - V_{mc}}{RT_0}\right) N S N_2 \quad (\text{Ec.18})$$

Donde:

N: Número de Avogadro, 6.023 x 10²³ moléculas/mol.

P_s: Presión estándar, 1 atm.

S: Área específica del adsorbente, m².

S N₂: Área proyectada que ocupa una molécula de N₂, 16.2 nm²/molécula.

T₀: Temperatura estándar, 273.15 K

7 RESULTADOS Y DISCUSIONES

7.1 Método de Bohem

Se relaciono el contenido de grupos ácidos, carboxílicos, lactonas y fenólicos, determinados mediante la titulación de Boehm.

Tabla 10. Grupos ácidos

Carbón	Carboxílicos (mmol/g)	Lactonas (mmol/g)	Fenólicos (mmol/g)	Totales (mmol/g)
CAA	3.6011	2.7409	3.0620	9.404

De acuerdo a (Velázquez, Bolaños-Reynoso, & Pliego-Bravo, 2010) (Hernández, Otero, Falcón, & Yperman III, 2017) se identificaron los grupos funcionales superficiales por medio del método de Bohem donde las sustancias polares se adhieren a la superficie apolar del carbón por la fijación del oxígeno e hidrogeno principalmente que forman grupos carboxílicos, lactonas fenólicos entre otros y estos hacen que se adhieran con mayor facilidad a las superficie del adsorbente debido a los grupos acido-básicos que se encuentran en la molécula.

7.2 Características Químicas de acuerdo a la ASTM

Tabla 11. Características fisicoquímicas del carbón activado de cáscara de aguacate.

Propiedades del carbón activado de cáscara de aguacate (%)	Resultados
Humedad	0.01
Materia volátil	0.39
Cenizas	99.61

Humedad ASTM-D2867

De acuerdo a Hernández et al., (2017) al incrementar la humedad se produce un aumento de los compuestos volátiles en el carbón, el carbón activado de cáscara de aguacate presenta un 0.01% de

humedad y 0.39 % de compuestos volátiles lo cual es una buena característica del material.

Materia volátil ASTM 5832-98

Al tener un porcentaje de 0.39 de materia volátil nos indica que el carbón activado de cáscara de aguacate desarrolla mayor porosidad debido a una adecuada activación, ya que al activarse se van dejando espacios vacíos de volumen disponibles para adsorber moléculas de tamaño menor al de estos poros (Velázquez et al., 2010).

Cenizas ASTM 2866-94

Se encuentra el contenido mineral del carbón activado en el cual se obtuvo un 99.61 %.

Tabla 12. Características fisicoquímicas del carbón activado de cáscara de aguacate.

Propiedades del carbón activado de cáscara de aguacate (%)	Resultados
Carbono fijo	51.82

Carbono fijo ASTM 2866-94

De acuerdo a (Bastidas, Buelvas, Márquez, & Rodríguez, 2010) para un carbono fijo entre 18.40 % a 60.74 % de carbón, son materiales aptos o reúnen las condiciones necesarias para ser activados por lo tanto el CAA se encuentra en 51.82% de carbono fijo que se encuentra entre el rango para reunir las condiciones de un carbón activado.

Carbono fijo y cenizas. ASTM 2866-94

Los resultados obtenidos por (Velázquez et al., 2010) de carbón activado de bambú tiene un 24.65 % de carbono fijo y un 1.46 % de cenizas y el carbón activado de cáscara de aguacate tiene un 51.82 % de carbono fijo y 99.61 % de cenizas porque la estructura lignocelulósica se fracciona produciendo carbón, vapor de agua, bióxido de carbono y otros vapores productos de la pirolisis. Debido a esto el CAA tiene un alto contenido de cenizas por la mayor presencia de lignina.

pH ASTM 03838-80

Tabla 13. Características químicas del carbón activado de cáscara de aguacate.

Propiedades del carbón activado de cáscara de aguacate (%)	Resultados
pH	9.88

El valor del pH de la fase acuosa es un factor importante tanto en la sorción de cationes como de aniones por la disposición de los sitios libres que presenta el adsorbente. En este caso el valor del pH es de 9.88 lo que indica que tiene una afinidad por los cationes como el VB4 sin embargo tiene grupos funcionales como ácidos carboxílicos y lactonas que atraen a la molécula del AD71 (Vera et al., 2016).

De acuerdo a Rodríguez (2017) el punto isoeléctrico para el carbón de cáscara de aguacate es de 7.7 y por lo tanto cuando el pH de una solución es mayor que el valor de pH_{PZC} , la superficie del adsorbente tiene una carga negativa ya que los grupos ácidos están desprotonados y por lo tanto interactúan preferiblemente con cationes. Bajo estas condiciones el material de la cáscara de aguacate puede ser adsorbente de los colorantes básicos en soluciones acuosas. Los carbones orgánicos presentan predominantemente un carácter ácido debido al alto contenido de celulosa y por lo tanto, debido a los átomos de hidrógeno de los grupos hidroxilo que actúan como aceptores de electrones (Palma, Lloret, Puen, Tobar, & Contreras, 2016).

Solubilidad ácido ASTM D-6385-99 y solubilidad agua ASTM D-5029

Tabla 14. Características químicas del carbón activado de cáscara de aguacate.

Propiedades del carbón activado de cáscara de aguacate	Resultados
Solubilidad Agua, %.	1.73
Solubilidad Ácido, %.	2.16

De acuerdo a (Garcés et al., 2004) podemos observar que el carbón de cáscara de aguacate tiene una solubilidad ácido-agua mayor que otros carbones de cáscara de coco.

Tabla 15. Solubilidad ácido-agua.

Adsorbente	A _s (%)	H _s (%)	Referencia
Carbón activado granular de cáscara de coco.	0.16	0.23	(Hernández et al., 2017)
Carbón activado de cáscara de coco tratado con HNO ₃ de 0.1 mol/L.	0.08	0.11	
Carbón activado de cáscara de coco tratado con de HNO ₃ de 0.55 mol/L.	0.08	0.10	
Carbón activado de cáscara de coco tratado con de HNO ₃ de 1 mol/L.	0.04	0.05	
Carbón activado de cáscara de aguacate	1.73	2.16	En este trabajo

A_s=Soluble en agua.

H_s=Soluble en ácido.

7.3 Cinética

Condiciones: pH:9, T:25°C, m:0.1g, Ce:10 mg/L, n=3.

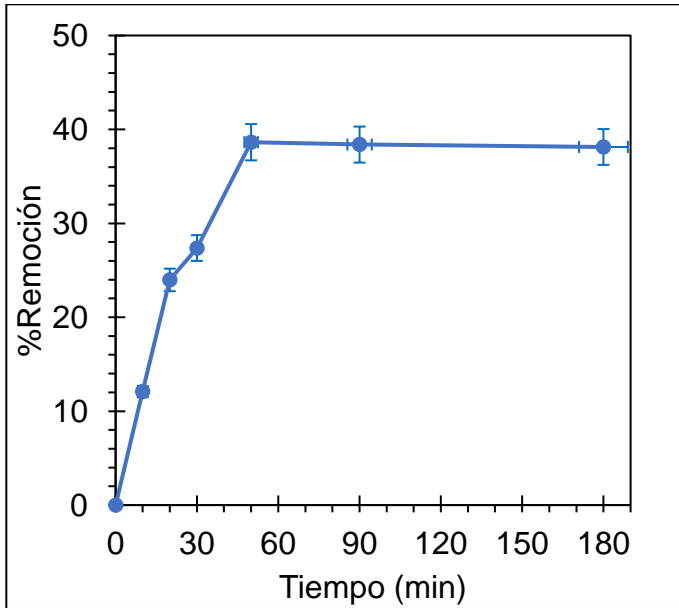


Figura 3 Tiempo de equilibrio Azul Directo 71.

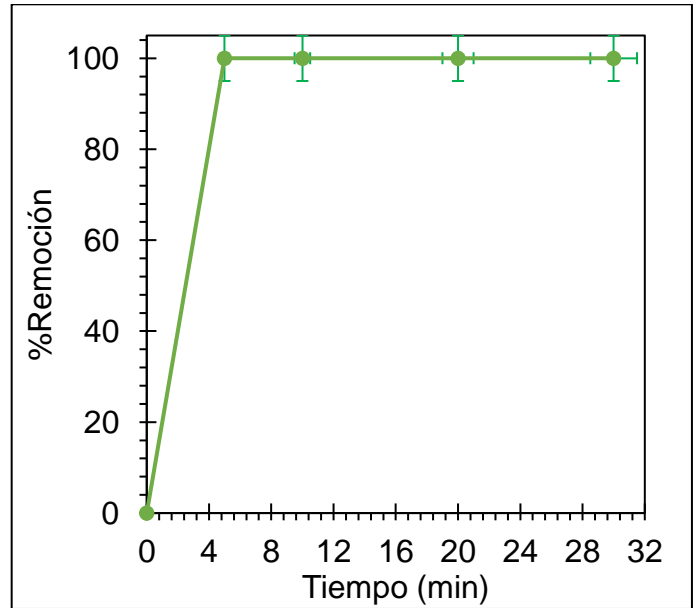


Figura 4 Tiempo de equilibrio Verde Básico 4.

Los resultados mostraron que la remoción máxima del colorante AD71 fue de 38.63% en un tiempo de contacto de 50 min y para el colorante VB4 se llegó al equilibrio del 100% en 5 min. Por lo tanto, el tiempo óptimo para la adsorción de VB4 es mucho menor que para AD71 y así se concluye que el carbón tiene una afinidad mayor con el colorante VB4 debido a que las soluciones básicas atraen a los cationes, sin embargo, el colorante AD71 se adsorbe debido a los grupos funcionales ácidos que se encuentran en la superficie del carbón activado.

7.4 Dosis

Condiciones: pH:9, T:25°C, m:0.1g a 1.0g para el AD71, m: 0.01g a 0.1g para el VB4, t:50 min para el AD71, t:5 min para el VB4, Ce:10 mg/L, n=3.

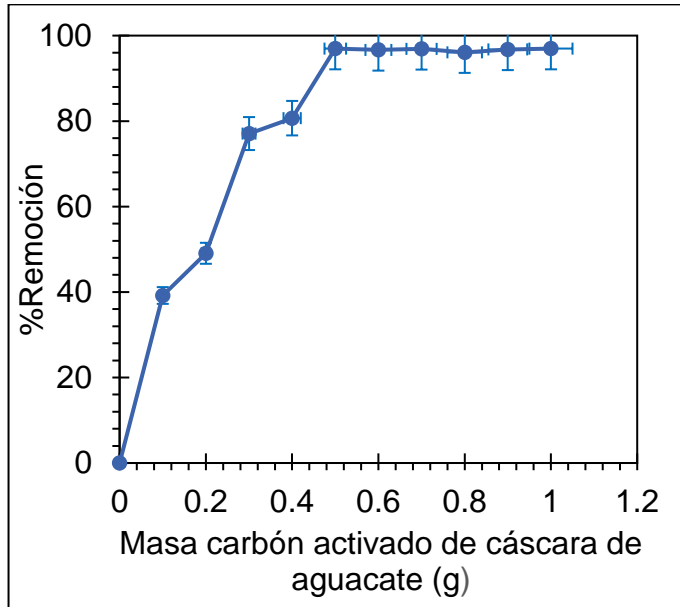


Figura 5 Dosis del Azul Directo 71.

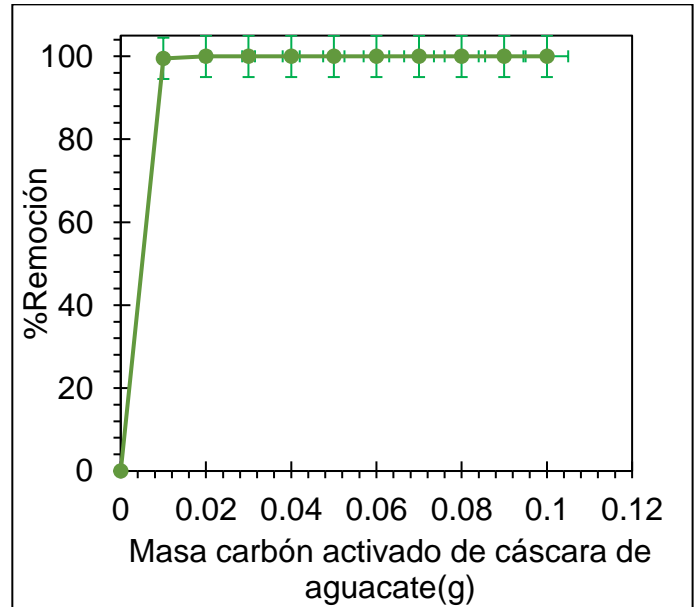


Figura 6 Dosis de Verde Básico 4.

El incremento en la dosis de masa es importante para obtener un porcentaje mayor en la remoción de los colorantes. En Figura 5 se observa que el colorante AD71 tiene la máxima remoción de 96.95 % en 0.5 g de CAA en 50 min, pero podemos observar que a los 0.4 g obtenemos un 80.67 %. En la gráfica de colorante VB4 se muestra 100% en 0.02 g de CAA en un tiempo de 5 min. Así, la dosis óptima del colorante AD71 es 0.5g en cuanto al colorante VB4 es menor de 0.02g. Se observa que el comportamiento sigue favoreciendo al VB4 porque se ocupa una menor cantidad de carbón por que la solución básica acepta a los protones del VB4.

7.5 Comportamiento del pH

Condiciones: pH: 4 a 10, T:25°C, m:0.5g para el AD71, m:0.02 para el VB4, t:50 min para el AD71, t:5 min para el VB4, Ce:10 mg/L, n=3.

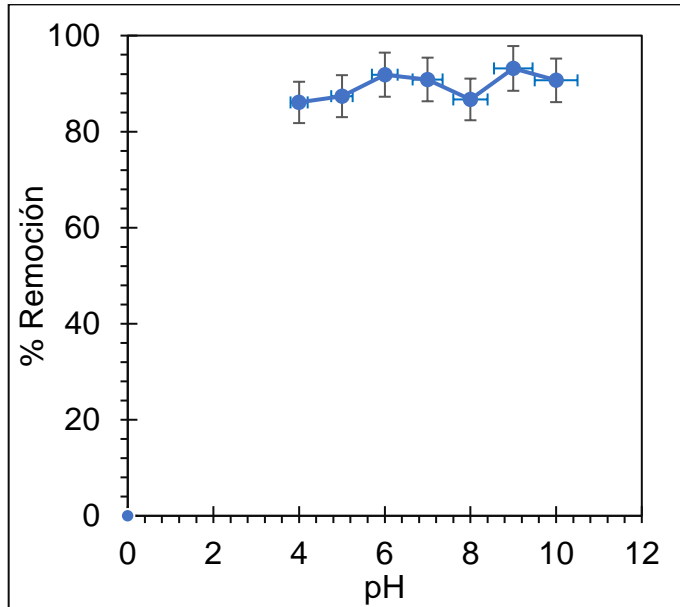


Figura 7 Comportamiento del pH del Azul Directo 71.

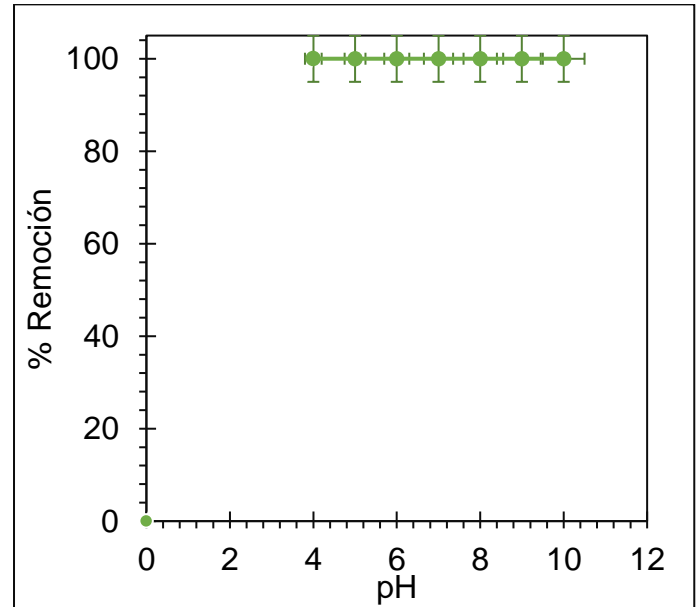


Figura 8 Comportamiento del pH del Verde Básico 4.

El pH es un parámetro importante en los procesos de adsorción esto se debe a la ionización de grupos funcionales superficiales y composición de la solución. El proceso de adsorción para este sistema depende del pH. El efecto del pH en la adsorción de colorantes se muestra en las figuras 7 y 8. Esta figura 7 muestra que la adsorción de los colorantes determino una máxima remoción de 93.16% a pH 7 para el colorante AD71 y se mantiene con una variación de 93.16% a 87.38% en pH de 4 a 10 y en la figura 8 para el VB4 de 100% de remoción en el rango de pH entre 4 y 10. Por lo tanto se determinó que el pH a utilizar es de 7 de acuerdo a las normas de descarga de aguas residuales.

7.6 Comportamiento de la temperatura

Condiciones: pH:7, T:25°C a 40°C, m:0.5g para el AD71, m:0.02g para el VB4, t:50 min para el AD71, t:5 min para el VB4, Ce:10 mg/L, n=3.

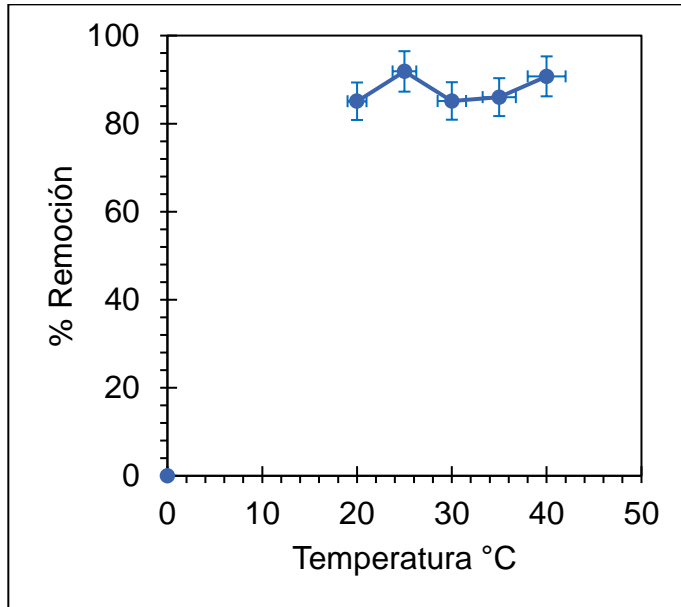


Figura 9 Comportamiento de la temperatura del Azul Directo 71.

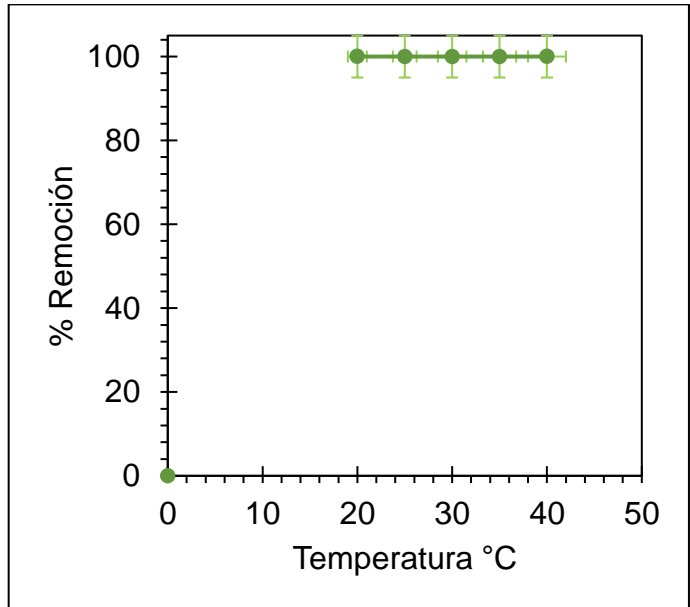


Figura 10 Comportamiento de la temperatura del Verde Básico 4.

De acuerdo a los datos obtenidos en la cinética, las gráficas muestran que la temperatura no tuvo un gran efecto respecto al porcentaje de remoción para los colorantes AD71 es de 85.08% a 90.73% y VB4 de 100% así se observa que la temperatura es una de las variables que influyen en el proceso de adsorción por la interacción entre las moléculas del carbón activado con los colorantes a menores temperaturas existe una menor remoción y en la temperatura de 20°C se observa la menor remoción de 85.08%, se realizó una evaluación en un intervalo de 20°C a 40°C para determinar el comportamiento y de acuerdo con las normas de descarga de aguas residuales se estableció una temperatura de 25°C.

7.7 Isotermas

Condiciones: Ph:7, T:25°C, m:0.5g para el AD71, m:0.02g para el VB4, t:50 min para el AD71, t:5 min para el VB4, Ce:10 mg/L a 600 mg/L para el AD71, Ce:10 mg/L a 120 mg/L, n=3.

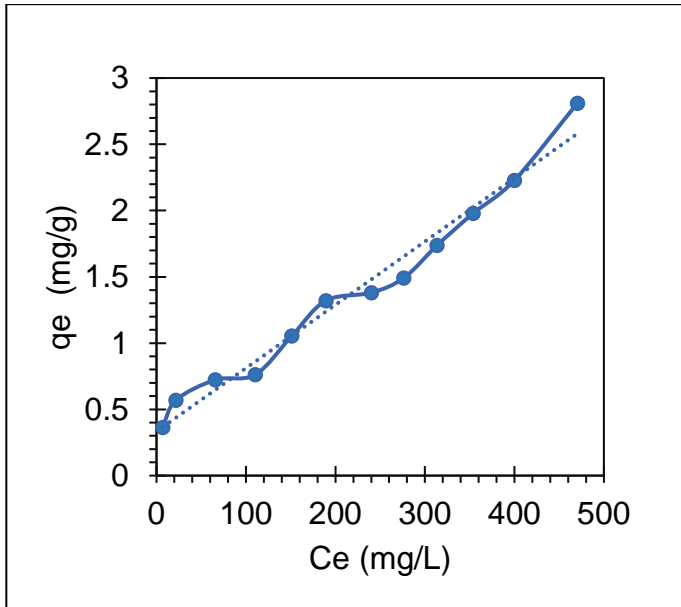


Figura 11 Capacidad de adsorción AD71.

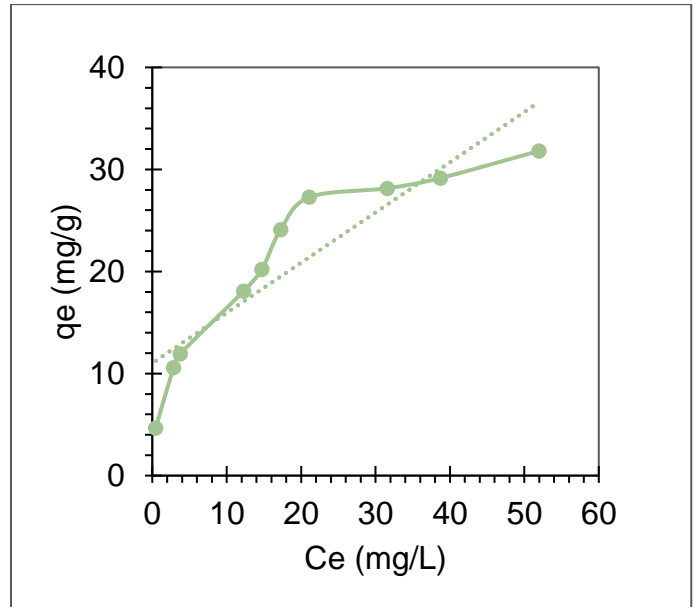


Figura 12 Capacidad de adsorción VB4

Tabla 16. Modelo matemático Azul Directo 71.

Modelo AD71	Parámetros
Freundlich	$K_F = 1.3352$ $n_F = 0.0250$ $R = 0.9687$
Langmuir	$q_0 = 10.3981$ $a_L = 0.0006$ $R = 0.9576$
Freundlich-Langmuir	$K_{LF} = 0.0217$ $n_{LF} = 0.7770$ $a_{LF} = 0.0000$ $R = 0.9680$
Koble-Corrigan	$K_{LF} = 0.0748$ $n_{LF} = 0.0538$ $a_{LF} = -0.0691$ $R = 0.9959$

Tabla 17. Modelo matemático Verde Básico 4.

Modelo VB4	Parámetros
Freundlich	$K_F = 7.5912$ $n_F = 2.6640$ $R = 0.9843$
Langmuir	$q_0 = 0.1137$ $a_L = 35.9954$ $R = 0.9790$
Freundlich-Langmuir	$K_{LF} = 5.2551$ $n_{LF} = 0.7527$ $a_{LF} = 0.0545$ $R = 0.9863$
Koble-Corrigan	$K_{LF} = 6.8873$ $n_{LF} = 0.6006$ $a_{LF} = 0.1203$ $R = 0.9892$

Para obtener el modelo adecuado se consideran los parámetros dependientes de la forma, y tamaño de los poros, del mecanismo procesos de adsorción, las propiedades del adsorbato y su adherencia con el adsorbente. Así, los resultados de los parámetros para las isotermas se ajustan al modelo de adsorción Koble-Corrigan, con base en los coeficientes de correlación R obtenidos a partir de los análisis de regresión no lineal, que varían de 0.9576 a 0.9892, donde la adsorción es en el adsorbente de manera superficial y con un tipo heterogéneo en una monocapa; indicando que la superficie tiene diferentes sitios activos o grupos funcionales. Por lo tanto, el mecanismo de eliminación es una interacción electrostática, intercambio de iones y enlaces de hidrógeno.

7.8 Microscopia electrónica de barrido MEB

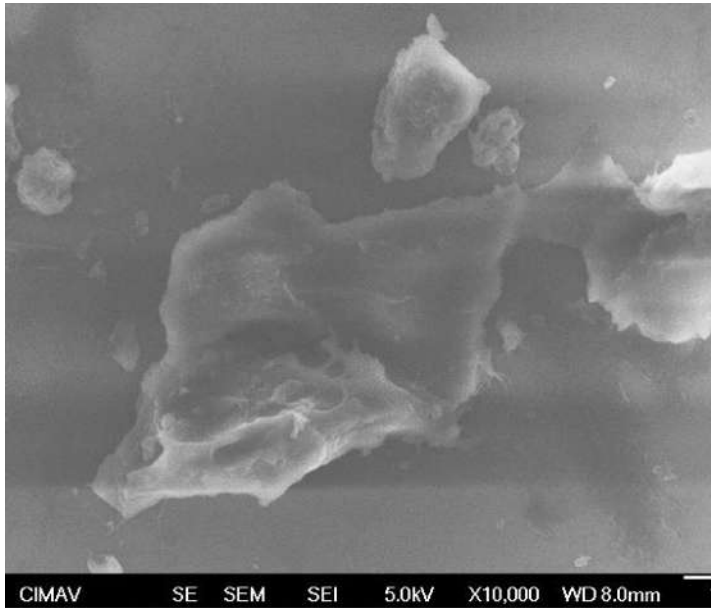


Figura 13 MEB cáscara de aguacate, 10,000x.

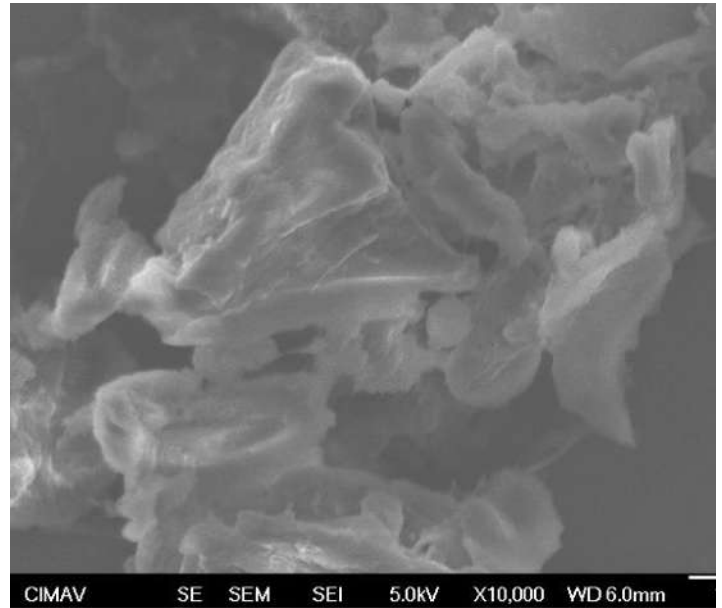


Figura 14 MEB carbón activado de cáscara de aguacate, 10,000x.

Se realizó una caracterización de superficie por SEM para analizar la morfología de cáscara de aguacate y carbón activado de cáscara de aguacate. Estas muestras se analizaron para determinar las diferencias en sus propiedades de superficie y estructuras. Para el caso de cáscara de aguacate tiene una superficie lisa, en los pliegues se observa la presencia de una superficie heterogénea con diferentes áreas lisas y rugosas. Para el caso del carbón activado de cáscara de aguacate la imagen muestra una superficie porosa, estos sitios son importantes porque los poros aumentan el área de superficie y, por lo tanto, la capacidad de adsorción de los colorantes AD71 y VB4.

7.9 Brunauer Emmett Teller BET

Los resultados muestran que el carbón activado de cáscara de aguacate tiene un diámetro de 0.35 nm lo cual indica que se encuentran microporos y se obtiene un área de superficie de 328.96 m²/g. De acuerdo con (Sevilla, 2002) los microporos tienen un tamaño adecuado para retener moléculas pequeñas que aproximadamente corresponden a compuestos más volátiles que el agua, tales como olores, sabores y solventes. Por lo tanto, la capacidad de un carbón activo para retener una determinada sustancia no solo depende de su área superficial, sino también de la proporción de poros internos.

De acuerdo a los resultados obtenidos por Palma (2016) en BET indican que tiene una superficie de 87.52 m²/g y en este trabajo se obtuvo un área superficial mayor de 328.96 m²/g por lo tanto indica que el carbón obtenido en este trabajo tiene mayor área superficial.

El tamaño molecular, indica que la cantidad adsorbida es alta cuando el volumen molecular es pequeño y el adsorbente actuaría como un tamiz molecular, por lo que el colorante penetraría los mesoporos preferentemente en microporos.

8 CONCLUSIONES

El carbón activado de cáscara de aguacate presenta un pH de 9.88 lo cual promueve la adsorción de cationes por su carga negativa y moléculas orgánicas aniónicas como es el caso del AD71.

Las condiciones de cinética y equilibrio de adsorción para el VB4 son de 0.02g de adsorbente, 5 min de contacto, pH de 7 y temperatura de 25°C con un porcentaje de remoción del 100%, mientras que para el AD71 fueron de 0.5g, 50 min de contacto, pH de 7 y temperatura de 25°C con un porcentaje de remoción del 90.73% por lo cual se puede considerar como un adsorbente de colorantes textiles esto se debe a la presencia de grupos amino e hidroxilo en el carbón los cuales promueven la atracción de cationes pero también contiene grupos hidroxilos los cuales promueven la atracción del colorante AD71.

Ambos colorantes se ajustaron al modelo de adsorción de Koble-Corrigan indicando un comportamiento de adsorción heterogéneo de monocapa.

El carbón activado obtenido de la cáscara de aguacate se puede considerar como un adsorbente de bajo costo por su gran disponibilidad de la materia prima y fácil obtención

9 RECOMENDACIONES

1. Realizar una caracterización del adsorbente para determinar más propiedades físicas y químicas.
2. Evaluar la adsorción con contaminantes como metales pesados, fármacos y algunos iones.
3. Evaluar el ciclo de regeneración de carbón activado de cáscara de aguacate.
4. Estudiar otros métodos de obtención de carbón activado más amigables con el medio ambiente.

10 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Aguilar, M. (2015). “ Adsorción De Colorante Azul Directo 71 Y Aminas Aromáticas Con Quitosano .”
2. Barrios-ziolo, L. F., & Cardona-gallo, S. A. (2018). ESTUDIO DE LA TOXICIDAD ASOCIADA AL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON PRESENCIA DE COLORANTES Y PIGMENTOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ, 61–74.
3. Bastidas, M., Buelvas, L. M., Márquez, M. I., & Rodríguez, K. (2010). Producción de carbón activado a partir de precursores carbonosos del Departamento del Cesar, Colombia. *Informacion Tecnologica*, 21(3), 87–96. <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4289it.09>
4. Carriazo, J. G., Saavedra, M. J., & Molina, M. F. (2010). Propiedades adsortivas de un carbón activado y determinación de la ecuación de Langmuir empleando materiales de bajo costo. *Educación Química*, 21(3), 224–229. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30087-9](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30087-9)
5. Castañeda, J. (2009). Sistema Electrocoagulación- Sorción En Continuo Para Remoción De Colorantes, Verde Malaquita Y Remazol Amarillo En Solución Acuosa. Universidad Autónoma Del Estado De México, 90.
6. Castillo, L. C. (2010). Remoción del colorante trifenilmetánico verde básico 4 por cultivos mixtos microbianos usando agave tequilero (*Agave tequilana weber*) como bioportador., 81.
7. En, I., Fpga, U. N. A., Transformada, D. E. L. A., El, P. O. R., Lifting, M., Base, E. N., ... En, D. E. I. (2015). Escuela politécnica nacional.
8. Ensuncho, A. E., Milanés, N., & Robles, J. R. (2015). Remoción del colorante rojo allura en solución acuosa utilizando carbones activados obtenidos de desechos agrícolas. *Informacion Tecnologica*, 26(2), 69–78. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000200009>
9. Garcés, L., Hernández, M., Peñuela, A., Rodríguez, A., & Salazar, J. (2004). Degradación de aguas residuales de la industria textil por medio de fotocatalisis. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1). Retrieved from <http://www.redalyc.org/html/695/69520103/>
10. Hernández, M., Otero, A., Falcón, J., & Yperman III, Y. (2017). Características fisicoquímicas del carbón activado de conchas de coco modificado con HNO 3 *Physiochemical Characteristic of Activated Carbon of Coconut Shell Modified with HNO 3*, 29(1), 26–38. Retrieved from <http://ojs.uo.edu.cu/index.php/cq>
11. Kayranli, B. (2011). Adsorption of textile dyes onto iron based waterworks sludge from aqueous

- solution; isotherm, kinetic and thermodynamic study. *Chemical Engineering Journal*, 173(3), 782–791. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.08.051>
12. Leonardo, G. T. D. (2014). Universidad Autónoma De San Luis Potosí.
 13. Lizama, C. (2008). Tratamiento de residuos líquidos de la industria de celulosa y textil. Evaluation, (April), 2005–2008. Retrieved from <http://www.cnea.gov.ar/sites/default/files/20cap13.pdf>
 14. Moncayo, I. (2010). Remoción De Los Colorantes Textiles Reactivos Rojo 141 , Amarillo 84 Y Azul Navy 171 Eliminados En El Agua Residual , Utilizando Un Inóculo Compuesto Seleccionado , Bajo Condiciones Anaerobias a Nivel De Laboratorio, 113.
 15. Palma, C., Lloret, L., Puen, A., Tobar, M., & Contreras, E. (2016). Production of carbonaceous material from avocado peel for its application as alternative adsorbent for dyes removal. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 24(4), 521–528. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2015.11.029>
 16. Pérez, A. A. M. (2009). Degradación de los colorantes Negro Reactivo 5 , Rojo Directo 28 y Verde Basico 4 en presencia de aditivos por Ozono, 1–99.
 17. Primera pedrozo, O., Colpas castillo, F., & Meza fuentes, E. (2011). Carbones Activados a Partir De Bagazo De Caña De Azúcar Y Zuro De Maíz Para La Adsorción De Cadmio Y Plomo. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 35(136), 387–396.
 18. Puentes, D. (2010). Determinación de parámetros de un modelo axial y en estado transitorio de la biosorción de azul de metileno mediante biomasa de *Saccharomyces cerevisiae* inmovilizada en alginato de calcio en columna empacada. *FEMS Yeast Research*, 10, 14–27. <https://doi.org/10.1111/j.1567-1364.2009.00560.x>
 19. Rocha-Arroyo, J. L., Salazar-Garcia, S., Barcenas-Ortega, A. E., Gonzalez-Duran, I. J., & Cossio-Vargas, L. E. (2011). Phenology of “hass” avocado in michoacan. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(3), 303–316.
 20. Rodríguez, G. (2017). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo Facultad de Biología Facultad de Ingeniería Química Facultad de Ingeniería Civil Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental “ Obtención de carbón activado a partir de cáscara de aguacate para remoción de fluoruros de soluciones acuosas.
 21. Sevilla, U. de. (2002). Manual Del Carbón Activo. *Aula.Aguapedia.Org*, 1–89. Retrieved from http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/10339/mod_resource/content/1/CARBoN ACTIVO DEFINITIVO tar.pdf

22. Solis, R. (2013). Adsorción de colorante amarillo 5 tartracina en compuestos tipo hidrotalcita Mg/Al y Mg/Al/F, 97.
23. Uriostegui, G. (2014). Eliminación de Colorantes Orgánicos Vía Adsorción Foto-Degradación con Materiales Tipo Hidrotalcita Cu/Al. Retrieved from <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/17139/25-1-16685.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
24. Velázquez, A., Bolaños-Reynoso, E., & Pliego-Bravo, Y. S. (2010). Optimización de la producción de carbón activado a partir de bambú. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 9(3), 359–366.
25. Vera, L., Uguña, M. F., García, N., Flores, M., Vázquez, V., & Aloma, I. (2016). Desarrollo de materiales sorbentes para la eliminación de metales pesados de las aguas residuales mineras. *Afinidad Lxxiii*, 135–139.
26. Zhang, X. F., Ctf, W. I., Guivar, J. A. R., Martínez, A. I., Anaya, A. O., Valladares, L. D. L. S., ... Villegas, A. (2011). Universidad michoacana de san nicolás de hidalgo. *Microscopy Today*, 367(1980), 66–80. <https://doi.org/10.1017/S1551929511000873>

11 ANEXOS

11.1 Curva de calibración

Se prepararon soluciones estándar de los colorantes Azul Directo 71 y Verde Básico 4 a una concentración de 1000 mg/L en agua desionizada. Posteriormente de la solución estándar se prepararon diluciones de diferentes concentraciones de 0.5 mg/L a 20 mg/L para la realización de las curvas de calibración.

Las concentraciones de los colorantes Azul Directo 71 y Verde Básico 4 fueron determinadas a partir de las curvas de calibración, la absorbancia se obtuvo por medio de la longitud de onda de cada colorante:

Tabla 18. Longitud de onda.

Colorante	Longitud de onda (nm)
Azul Directo 71	587
Verde Básico 4	614

Se midieron las absorbancias por triplicado en un espectrofotómetro Jenway modelo 6505 UV/Visible. Las lámparas empleadas son de deuterio y tungsteno para las regiones ultravioleta UV/Visible.

De acuerdo a la ecuación de la línea recta se obtuvieron las concentraciones de los colorantes.

$$y = mx + b \dots\dots(Ec.)$$

Donde:

y: Absorbancia.

x: Concentración final.

m: Es un coeficiente de la pendiente de la recta.

b: Es un coeficiente de la intersección con las ordenadas.

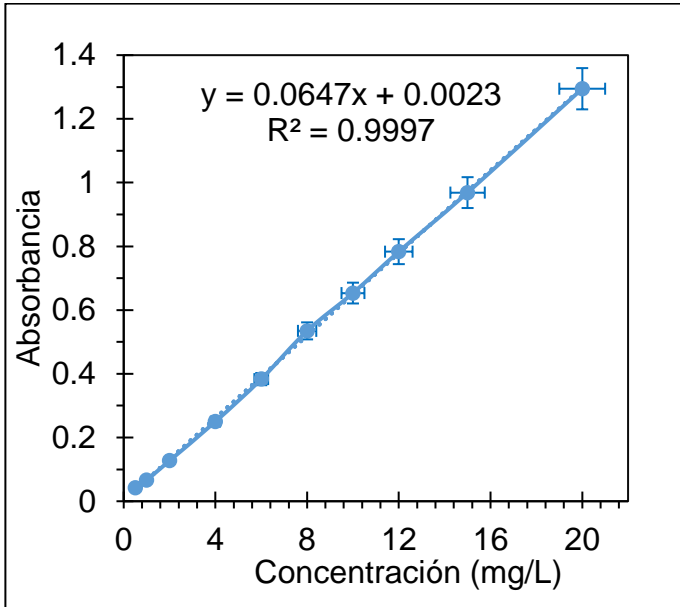


Figura 15. Curva de calibración AD71.

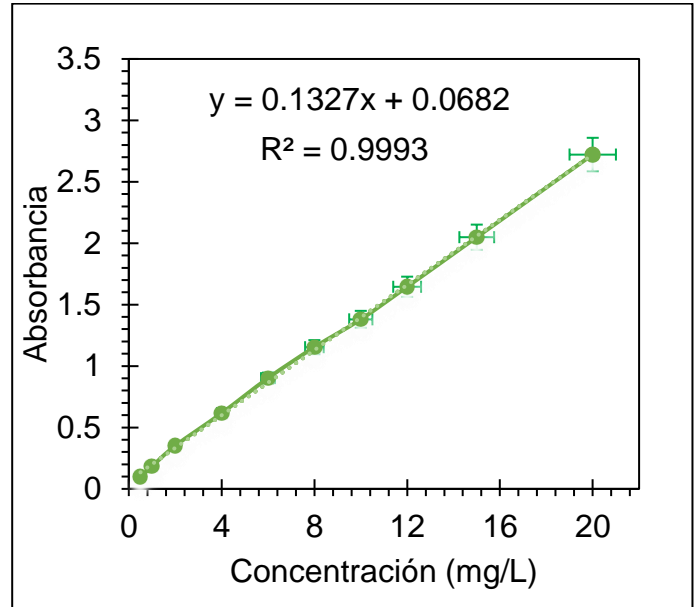


Figura 16. Curva de calibración VB4.

A partir de la absorbancia en un espectro UV/Visible y se obtuvo un factor de correlación para el AD71 0.9997 y para el VB4 0.9993.

El porcentaje de remoción del colorante Azul Directo 71 y Verde Básico 4 se determinó mediante espectroscopia UV/visible, a partir de las ecuaciones lineales.

Tabla 19. Curva de calibración.

Colorante	Curva de calibración
Azul Directo 71	$y = 0.0647x + 0.0023$
Verde Básico 4	$y = 0.1327x + 0.0682$