



Facultad de Ingeniería

Departamento de Química – Laboratorio de Fisicoquímica

Seminario de investigación para obtener el título de:

PROFESOR EN QUÍMICA

**“Estudio de adsorción de azul de metileno utilizando adsorbentes
de bajo costo”**

Autor: Jonathan David Barreras

Directora: Dra. Alejandra Mariano

Codirectora: Mg. Ana Beatriz Prieto

Neuquén

Junio, 2026

Resumen

El azul de metileno es un colorante ampliamente utilizado en diversas industrias, principalmente en la industria textil. Su liberación a través de aguas residuales produce la contaminación de aguas subterráneas y superficiales, lo cual afecta directamente al medioambiente y a la salud humana. Por sus características químicas, este colorante tiene una alta persistencia en el ambiente, dificultando su degradación y su eliminación durante los tratamientos de remediación de aguas. Frente a esta problemática, la adsorción aparece como un fenómeno eficaz y económico para la remoción de azul de metileno en solución acuosa.

En este trabajo se estudió la adsorción de azul de metileno sobre bioadsorbentes elaborados a partir de materiales de bajo costo: cáscaras de manzana y hojas de álamo. El uso de adsorbentes de origen natural proporciona ventajas económicas frente a la implementación de la adsorción en la remediación de aguas, ya que se presentan como una alternativa viable al adsorbente de uso más común, el carbón activado, ampliamente utilizado en procesos de adsorción pero con la desventaja de tener un alto costo de producción y de regeneración.

Para evaluar la adsorción de azul de metileno sobre cáscaras de manzana disecadas (CMD) y hojas de álamo disecadas (HAD) se estudió el efecto de la cantidad de adsorbente, la cinética del proceso, las isothermas de adsorción y el efecto del pH. Los experimentos se realizaron a temperatura constante y se empleó espectrofotometría UV-visible para la cuantificación del colorante en solución acuosa. Los resultados obtenidos permiten presentar las CMD y las HAD como alternativas viables, económicas y renovables para la remoción de azul de metileno en solución.

El trabajo finaliza con una propuesta didáctica dirigida a estudiantes de tercer año de la asignatura Química del Enlace Pedagógico Interciclo siguiendo los lineamientos del nuevo diseño curricular de la Provincia del Neuquén. La propuesta se enmarca en el enfoque STEM (del acrónimo en inglés Science, Technology, Engineering, Mathematics) y en la metodología del Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP). El eje estructurante de la secuencia didáctica es la contaminación de aguas por colorantes como problemática ambiental, vinculando conocimientos y saberes de soluciones y pH con el fenómeno de adsorción como estrategia de remoción de colorantes en solución acuosa.

Palabras clave: azul de metileno, bioadsorbentes, STEM.

Agradecimientos

A mis directoras, Alejandra y Ana, por guiarme y acompañarme a lo largo de la realización del seminario con tanta predisposición, amabilidad, paciencia y dedicación desde el primer momento.

A todo el equipo del Laboratorio de Fisicoquímica por abrirme las puertas y permitirme estudiar y trabajar tan cómodamente.

A la Universidad Nacional del Comahue por el acceso a una educación pública, libre y gratuita de calidad que me permitió formarme como profesional y como persona. Deseo que las generaciones futuras tengan la posibilidad de continuar accediendo a los altos estudios a través de la universidad pública. Es trabajo de todos los argentinos defender su continuidad.

A la Secretaría de Bienestar Universitario por el apoyo a lo largo de mi trayectoria por la universidad a través de la beca de ayuda económica.

Al Laboratorio de Arcillas por brindarnos el polvo de azul de metileno para la curva de calibración.

Al Laboratorio de Operaciones del Grupo PYQ por facilitarnos los tamices para la separación por tamaño de las partículas de adsorbente.

A la Dra. María Eugenia Roca Jalil por acompañarme y ayudarme en tantos momentos de la carrera.

Al equipo del Instituto de Investigación en Tecnologías y Ciencias de la Ingeniería (IITCI, CONICET-UNCo) por su colaboración con las fotografías tomadas con el microscopio electrónico de barrido.

A todo el equipo de la cátedra de Química Orgánica por estar presentes en el final de mi carrera y por enseñarme tanto de lo que es la docencia universitaria.

A todos los docentes que han sido parte de mi formación, por entregar todo su conocimiento con pasión, dedicación y paciencia.

A mis amigas de tantos años, Karla y Ori, por su amistad incondicional.

A mis hermanos, Marina y Luis, por estar presentes en cada momento de mi vida, siempre dispuestos a aconsejarme, acompañarme o hacerme reír cuando lo he necesitado. Los amo. Siempre juntos.

A mi mamá, por formarme como persona, por enseñarme tanto todos los días, por apoyarme en cada decisión que he tomado desde el principio, por estar siempre a mi lado y por brindarme tu amor incondicional. Estas palabras no son suficientes para agradecer todo lo que has hecho por mí. Te amo.

Índice

Capítulo 1: introducción y objetivos.....	1
1.1. Introducción	2
1.2. Objetivos	3
Capítulo 2: marco teórico.....	5
2.1. Colorantes	6
2.2. Espectroscopia de absorción molecular	8
2.3. Clasificación de colorantes	9
2.4. Azul de metileno	9
2.4.1. Usos del azul de metileno. Efectos en el ambiente y en la salud humana.	12
2.5. Adsorción.....	14
2.5.1. Efecto del pH en procesos de adsorción	18
2.5.2. Isotermas de adsorción.....	18
2.5.2.1. Isoterma de Langmuir	20
2.5.2.2. Isoterma de Freundlich	21
2.5.2.3. Isoterma de Temkin	21
2.6. Adsorción de azul de metileno en adsorbentes de bajo costo	21
Capítulo 3: materiales y metodología	24
3.1. Determinación de la longitud de onda máxima de absorción del azul de metileno.....	25
3.2. Curva de calibración	27
3.3. Preparación de los bioadsorbentes	27
3.3.1. Cáscaras de manzana	27
3.3.2. Hojas de álamo.....	30
3.4. Morfología de los bioadsorbentes	30
3.5. Estudio del efecto de la cantidad de adsorbente en la adsorción de azul de metileno ..	31
3.6. Cinética de adsorción.....	34
3.6.1. Modelo de pseudo primer orden	34
3.6.2. Modelo de pseudo segundo orden.....	35
3.7. Isotermas de adsorción.....	35
3.8. Efecto del pH en la adsorción	35
3.9. Tratamiento de residuos.....	36
Capítulo 4: resultados y discusión	37

4.1. Determinación de la longitud de onda máxima de absorción del azul de metileno y barrido espectral.....	38
4.2. Curva de calibración	39
4.3. Morfología de los bioadsorbentes	40
4.4. Efecto de la cantidad de adsorbente en la adsorción de azul de metileno	42
4.4.1. Adsorbente: cáscaras de manzana disecadas	42
4.4.2. Adsorbente: hojas de álamo disecadas.....	45
4.5. Cinética de adsorción.....	46
4.5.1. Resultados en CMD	46
4.5.1.1. Modelo de pseudo primer orden	48
4.5.1.2. Modelo de pseudo segundo orden.....	49
4.5.2. Resultados en HAD.....	50
4.5.2.1. Modelo de pseudo primer orden	52
4.5.2.2. Modelo de pseudo segundo orden.....	52
4.6. Isotermas de adsorción.....	54
4.6.1. Resultados en CMD	54
4.6.1.1. Isotherma de Langmuir	54
4.6.1.2. Isotherma de Freundlich	55
4.6.1.3. Isotherma de Temkin	55
4.6.1.4. Parámetros de las isotermas	56
4.6.2. Resultados en HAD.....	57
4.6.2.1. Isotherma de Langmuir	57
4.6.2.2. Isotherma de Freundlich	58
4.6.2.3. Isotherma de Temkin	58
4.6.2.4. Parámetros de las isotermas	59
4.7. Efecto del pH	60
Capítulo 5: conclusiones	63
5. Conclusiones	64
Capítulo 6: propuesta didáctica.....	65
6.1. Educación STEM	66
6.2. Estrategias de enseñanza STEM: aprendizaje basado en proyectos	67
6.3. Perspectiva ambiental	70
6.4. Grupo clase objetivo de la propuesta	71

6.5. Objetivos	71
6.6. Metodología	72
6.7. Propuesta didáctica	73
Capítulo 7: referencias	87
7. Referencias.....	88

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1. Introducción

El azul de metileno, sintetizado por primera vez en 1876, es un colorante ampliamente utilizado en diferentes industrias, principalmente en la textil y en la farmacéutica. Esta sustancia posee múltiples aplicaciones, desde la medicina humana y veterinaria en el diagnóstico y tratamiento de diversas enfermedades, hasta la industria alimentaria (Khan, 2022). De todas las industrias, la textil es la que más colorantes consume, siendo el azul de metileno el de uso más común, utilizado en la coloración de materiales como seda, lana, algodón y cuero (Kishor et al., 2021). Como resultado de su extendido uso en la tinción de fibras textiles, grandes cantidades del colorante son liberadas al medioambiente a través de aguas residuales, contaminando aguas superficiales y subterráneas y generando una verdadera amenaza para el medioambiente, la biodiversidad y la salud humana (Hamad e Idrus, 2022). Esto resulta problemático ya que se trata de una sustancia con una alta persistencia en el ambiente producto de su aromaticidad, lo cual le confiere una alta estabilidad frente a la temperatura, la luz, el agua y otras sustancias incluyendo jabones y detergentes. En consecuencia, es difícil de degradar, y usualmente no es eliminado durante los tratamientos convencionales de aguas residuales. Frente a esta situación, es necesario desarrollar tecnologías amigables con el medio ambiente que permitan remover azul de metileno.

Numerosas investigaciones se están llevando a cabo con el objetivo de remediar aguas contaminadas por esta sustancia, particularmente a través de procesos de adsorción (Bollinger et al., 2025). La adsorción es uno de los métodos físicos más empleados para la remoción de colorantes y, en particular, se ha demostrado que es efectiva para la eliminación de azul de metileno presente en aguas residuales (Kannan & Sundaram, 2001). Son muchas las ventajas de la adsorción como método de remoción de colorantes en aguas, principalmente su efectividad, flexibilidad, rapidez, su sencilla operación y su relativo bajo costo al comparar con otras técnicas. Si bien el método de adsorción es relativamente barato en comparación a otras técnicas, su aplicación a gran escala se ve limitada por los altos costos de producción y de regeneración del adsorbente de uso más común, el carbón activado (Meili et al., 2018). Por este motivo muchas investigaciones en este campo se han dirigido al estudio y desarrollo de adsorbentes de bajo costo producidos a partir de, por ejemplo, biomasa, arcillas y residuos agroindustriales, ya que se presentan como una alternativa económica y renovable al uso de carbón activado (Rafatullah et al., 2009). El uso de este tipo de adsorbentes ofrece una alternativa económica, amigable con el medio ambiente, efectiva y de fácil acceso. Entre la amplia variedad de adsorbentes de bajo costo que se han estudiado en la adsorción de azul de

metileno se encuentra que se han obtenido buenos resultados utilizando carbón activado obtenido a partir de cáscaras de naranja (Gupta et al., 2021), cáscaras de manzana disecadas (Enniya & Jourani, 2017), cáscaras de maní disecadas (Özer et al., 2006), hojas de pino (Yagub et al., 2012) y desechos de té (Uddin et al., 2008). En todos estos casos se han hallado buenos resultados en la adsorción de azul de metileno.

A partir de lo expuesto anteriormente, es posible pensar en formas de trasladar este tipo de problemáticas ambientales al ámbito educativo a través de propuestas de enseñanza contextualizadas. La presente propuesta didáctica se inscribe en el enfoque STEM (del acrónimo en inglés Science, Technology, Engineering, Mathematics), entendido como una perspectiva pedagógica que promueve la integración de los conocimientos y saberes de cada disciplina para abordar problemas complejos de relevancia social (Kelley & Knowles, 2016; Kennedy & Odell, 2014). Desde este enfoque, la enseñanza de las ciencias trasciende la transmisión de contenidos aislados y se orienta a la resolución de problemáticas contextualizadas mediante la innovación, el diseño y el trabajo colaborativo (Bryan et al., 2015; UNESCO, 2019). El enfoque STEM puede ser aplicado bajo distintas metodologías de trabajo, siendo una de ellas el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP). Esta metodología favorece la implicación activa de los estudiantes en procesos de investigación y en la producción de soluciones al problema en estudio (Bell, 2010; Zambrano Briones et al., 2022). En este marco, la secuencia se centra en la problemática de la contaminación del agua por colorantes, tomando como caso de estudio el azul de metileno, para integrar contenidos curriculares como soluciones acuosas, pH y métodos de separación. Dirigida a estudiantes de tercer año de la asignatura Química del Enlace Pedagógico Interciclo, la propuesta articula experimentación, análisis de datos y reflexión ambiental, siguiendo los lineamientos del nuevo diseño curricular de la Provincia del Neuquén (Ministerio de Educación de la Provincia del Neuquén, 2018), promoviendo una alfabetización científica orientada a la formación de ciudadanos críticos y comprometidos con su entorno (Acevedo-Díaz, 2004).

1.2. Objetivos

Los objetivos del seminario de investigación son:

- Estudiar la adsorción de azul de metileno sobre cáscaras de manzana disecadas y hojas de álamo disecadas.
- Construir y analizar las isotermas de adsorción para cada adsorbente.

- Comparar la adsorción del colorante sobre cáscaras de manzana desecadas y hojas de álamo desecadas a diferentes valores de pH.
- Diseñar una secuencia didáctica dirigida a estudiantes de tercer año de la asignatura Química del Enlace Pedagógico Interciclo para el nivel medio según el nuevo diseño curricular de la Provincia del Neuquén, abordando conocimientos y saberes de soluciones y sus características como sistemas homogéneos, el concepto de pH, la identificación de sustancias ácidas, básicas y neutras, y la introducción al fenómeno de adsorción en el marco de problemáticas ambientales.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Colorantes

Los colorantes son compuestos orgánicos aromáticos capaces de absorber la luz e impartir color en la región visible del espectro electromagnético, pero además poseen la capacidad de transferir su color al medio sobre el cual se aplican. El color se ha descrito como la región del espectro electromagnético comprendida entre los 400 y 700 nanómetros de longitud de onda. Esta región constituye el rango del espectro visible por los humanos (figura 1).

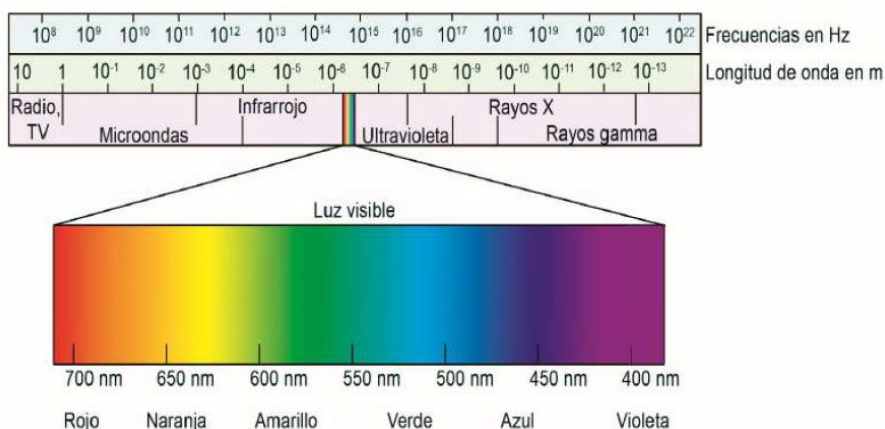


Figura 1. Rango visible del espectro electromagnético

Para poder observar el color de un objeto este debe estar iluminado por luz visible. Cuando un haz de luz blanca incide sobre una sustancia, parte de esta luz es absorbida y parte reflejada de manera selectiva. El color percibido por nuestra visión resulta del estímulo provocado por aquella porción de luz reflejada por la superficie del material. Luego, nuestra visión interpreta la radiación electromagnética que el objeto devuelve al entorno como un color. La tabla 1 posee el tinte de una sustancia, es decir el color que se percibe, en función de la longitud de onda absorbida por el material.

Tabla 1. Tinte de una sustancia en función de la longitud de onda absorbida. Reproducida de Marcano (1990)

<i>nm</i>	<i>Absorbe en el</i>	<i>Tinte visible</i>
400-435	violeta	amarillo-verde
-480	azul	amarillo
-490	azul-verde	naranja
-500	verde-azul	rojo
-560	verde	púrpura
-580	verde-amarillo	violeta
-595	amarillo	azul
-605	naranja	azul-verde
-650	rojo	verde-azul
-750	púrpura	verde

El color de cada sustancia depende de las moléculas que la componen. Según su composición y estructura molecular, cada sustancia se comportará de forma diferente frente a la incidencia de la radiación electromagnética. La región de una molécula responsable del color, es decir, de la absorción de determinadas longitudes de onda del espectro visible, se denomina cromóforo. El cromóforo es cualquier grupo funcional de una molécula orgánica que es responsable de la absorción, generalmente debido a la presencia de enlaces múltiples conjugados. Parte de la energía proveniente de la incidencia de la radiación electromagnética sobre el cromóforo se absorbe para producir la transición electrónica de los electrones presentes en el grupo funcional. Los enlaces π poseen electrones que pueden ser excitados más fácilmente que, por ejemplo, los electrones de un enlace σ . La conjugación de enlaces π disminuye la energía necesaria para producir la transición electrónica de los electrones presentes en la región responsable del tinte de una sustancia. Pero la presencia de un cromóforo no es todo lo que explica el color de una sustancia. Estas regiones están acompañadas de grupos auxócromos. Un auxócromo es un grupo sustituyente que no es un cromóforo en sí mismo pero que puede modificar la longitud de onda de absorción cuando está conjugado a un cromóforo (Wade y Simek, 2017). El desplazamiento a valores mayores de longitud de onda en la absorción por efecto de un auxócromo sobre un cromóforo se denomina desplazamiento o efecto batocrómico. A medida que un compuesto contenga mayor cantidad de dobles enlaces conjugados, debido a la conjugación de auxócromos al cromóforo, la absorción de luz se producirá a mayor longitud de onda.

Algunos cromóforos y grupos auxócromos comunes son:

- Cromóforos: N=O (nitroso), O-N=O (nitro), C=S (tiocarbonilo), C=O (carbonilo), N=N (azo), C≡N (ciano), C=N (imino).

- Auxóchromos: C=C, OH (hidroxi), NHMe (metilamino), NMe₂ (dimetilamino), OR (alcoxi), halógenos.

Los cromóforos y auxóchromos más eficientes son aquellos que tienen heteroátomos ya que esto permite las transiciones de menor energía $n-\pi^*$ lo cual, junto con la conjugación, aumenta el número de las posibles transiciones electrónicas.

En función del cromóforo y de los auxóchromos presentes en una sustancia, las moléculas absorberán radiación electromagnética a valores de longitud de onda característicos dentro del espectro. Esto es de utilidad ya que conociendo los valores característicos de absorbancia de una sustancia se pueden identificar compuestos, por ejemplo, o realizar cuantificaciones utilizando métodos espectroscópicos de análisis. Tal es el caso de la espectroscopía de absorción molecular.

2.2. Espectroscopia de absorción molecular

Cada sustancia posee un espectro de absorción propio según sus características moleculares. Al incidir una muestra con un haz de radiación electromagnética se puede obtener el espectro de absorción de dicha sustancia, el cual relaciona la cantidad de luz absorbida en función de la longitud de onda de la radiación incidente (Skoog et al., 2014). Durante el proceso de absorción se transfiere energía a la molécula en estudio y, como resultado, se da una disminución en la intensidad de la radiación incidente.

La ley de Beer-Lambert, o simplemente ley de Beer, indica cuantitativamente cómo la atenuación de la luz incidente depende de la concentración del analito y de la longitud de la trayectoria en donde ocurre la absorción. Conforme la luz atraviesa el medio con el analito, la intensidad disminuye a medida que este es excitado. De acuerdo con esta ley, la absorbancia es directamente proporcional a la concentración de la especie absorbente, c , expresada en unidades de molaridad, y a la longitud de la trayectoria del medio absorbente, b , expresada en cm, como se muestra en la ecuación 1:

$$A = \epsilon bc \quad (1)$$

Donde ϵ es una constante de proporcional llamada absorptividad molar con unidades de $L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$. La absorptividad molar de una especie en su máximo de absorción es característica de esa especie. Su valor depende de la longitud de onda de la radiación incidente, pero es independiente de la concentración del analito. Al momento de realizar análisis cuantitativos se

busca trabajar a valores altos de absorptividad molar ya que permiten una alta sensibilidad analítica y permiten disminuir errores de medición. Para alcanzar la máxima sensibilidad, las mediciones de absorbancia espectrofotométrica normalmente se realizan a la longitud de onda de máxima absorción de la especie ya que el cambio en la absorbancia por unidad de concentración es menor en ese punto.

2.3. Clasificación de colorantes

Según Marcano (1990), existen muchas clasificaciones de sustancias cromogénicas, es decir, de aquellas preparaciones que contienen el compuesto que aporta el color junto con sustancias auxiliares que ayudan a transferir el color sobre el medio a teñir. Los principales enfoques de esta clasificación son:

1. El uso y/o los materiales a los cuales están destinados.
2. Los métodos en que se aplican en el teñido de fibras (clasificación tintórea).
3. La composición química del colorante (clasificación química).

Dentro de cada clasificación encontramos subclases de colorantes. Dentro de la clasificación tintórea encontramos, a su vez, una clasificación de las sustancias cromogénicas en función de las propiedades ácido-base del compuesto:

- Colorantes ácidos: poseen grupos ácidos como: SO_3H , COOH , NO_2 . En su forma aniónica son capaces de formar sales, lo cual les confiere una alta solubilidad en agua.
- Colorantes básicos: poseen grupos funcionales básicos como NHMe_2 , NH_2Me , NMe_2 (siendo Me un grupo metileno), NH_2 . En su forma catiónica forman sales al igual que los colorantes ácidos, siendo también solubles en agua.

En cuanto a sus usos, los colorantes pueden ser empleados en la tinción de cerámicas y vidrios; alimentos, drogas y cosméticos; plásticos; textiles y otras fibras; fotografía; etc. Una misma sustancia puede ser utilizada como colorante de distintos productos, sin embargo, las características finales de la sustancia dependerán del producto sobre el que se vaya a aplicar: propiedades físicas, pureza, formulación comercial, entre otras.

2.4. Azul de metileno

Dentro de la amplia variedad de colorantes que existen en la industria, el azul de metileno (MB por su nombre en inglés, methylene blue) es uno de los más populares por su amplio uso en textiles (Khan et al., 2022) (figura 2). Se trata de colorante básico o catiónico de fórmula molecular $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S}$ y masa molecular de 319,85 g/mol (Yagub et al., 2012). Posee

dos estructuras de resonancia dado su carácter aromático (figura 3). Su naturaleza iónica le confiere una alta solubilidad en agua, por lo que forma soluciones estables a temperatura ambiente y, por consiguiente, una baja lipofilidad. Pertenece a la familia de las azinas, ya que el cromóforo es un anillo heterocíclico nitrogenado conjugado y, en particular, pertenece a la subclase de las tiazinas por la presencia de azufre en su estructura.

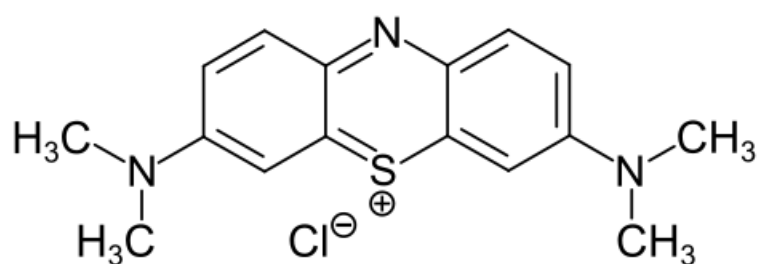


Figura 2: estructura molecular del azul de metileno

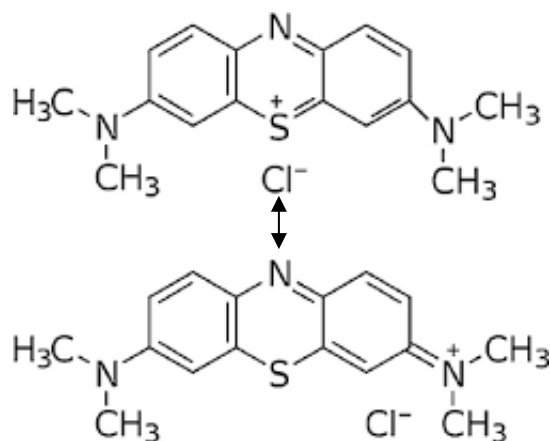


Figura 3. Formas resonantes del azul de metileno

En su forma oxidada, el azul de metileno forma soluciones de color azul oscuro (Khan et al., 2022). Su forma reducida, llamada también leuco MB, forma soluciones incoloras (figura 4).

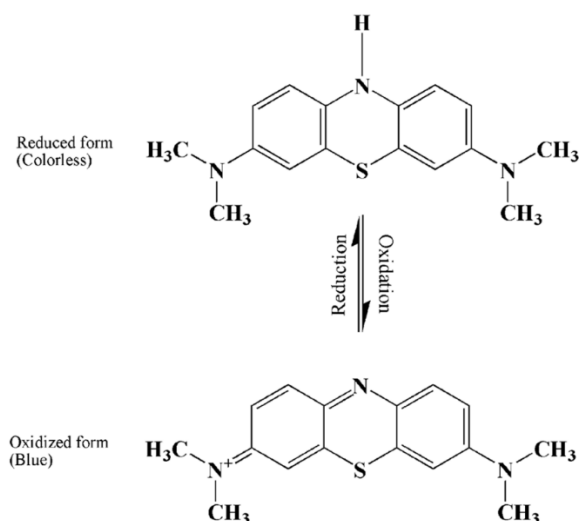


Figura 4. Forma oxidada y reducida del azul de metileno. Reproducida de Khan et al. (2022)

La concentración de azul de metileno puede ser determinada mediante espectrofotometría UV-visible (Bollinger et al., 2025). Existen diferencias en cuanto a la longitud de onda máxima de absorción del azul de metileno al momento de su cuantificación. Bollinger et al. (2025) indica un máximo a 665 nm aunque refiere que, en la práctica, se recomienda un rango de entre 660 a 668 nm, con un rango óptimo más estrecho de entre 663 y 667 nm. Autores como Khan et al. (2022), Fernández-Pérez et al. (2018), Oladoye et al. (2022), Shahinyan et al. (2019), Hulupi et al. (2023) y Enniya y Jourani (2017) indican un máximo de absorción correspondiente a la especie monomérica del colorante en solución acuosa de 664 nm.

En cuanto a las propiedades ácido-base del azul de metileno, autores como Bayomie et al. (2020) y Sousa et al. (2019) reportan un pK_a de 3,8. La especie neutra predomina a valores inferiores al pK_a , mientras que para valores de pH superiores al pK_a la especie predominante será la catiónica. En Bollinger et al. (2025) se pueden encontrar las formas protonadas del azul de metileno en función del pH (figura 5). Los autores indican que los valores de pK_a indicados surgen de cálculos teóricos realizados a través de métodos computacionales, coincidiendo con los autores previamente citados en que la especie 1 (figura 5) predomina a valores superiores a $pH=3,8$.

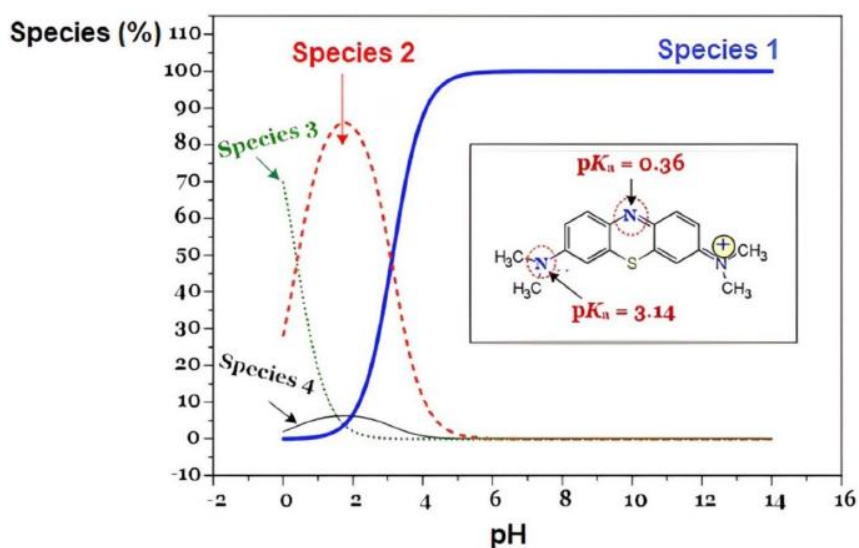
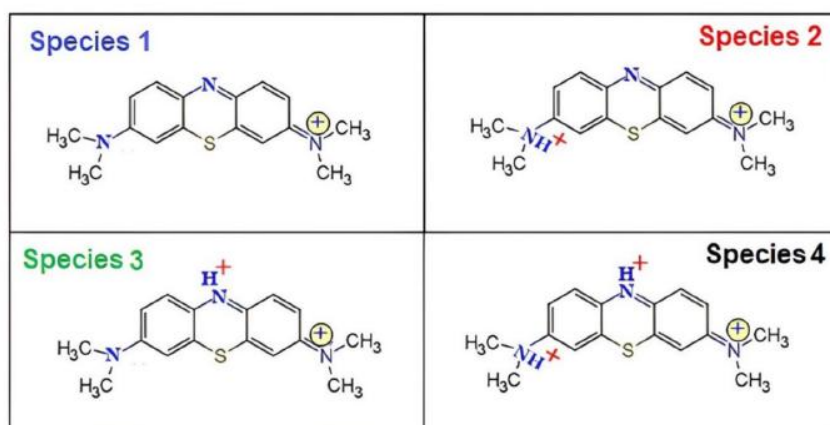


Figura 5. Especies predominantes del azul de metileno en función del pH. Reproducida de Bollinger et al. (2025)

2.4.1. Usos del azul de metileno. Efectos en el ambiente y en la salud humana.

El azul de metileno posee múltiples aplicaciones, desde la medicina humana y veterinaria en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades como la malaria y la anemia en humanos, hasta la industria alimentaria (Khan, 2022). Sin embargo, de todas las industrias, la textil es la que más colorantes consume, siendo el azul de metileno el de uso más común para la coloración de materiales como el algodón y cuero, dada la afinidad del colorante por fibras con grupos ácidos como las de la lana y la seda (Kishor et al., 2021).

Si bien posee propiedades medicinales beneficiosas para la salud cuando es clínicamente prescrito, como por ejemplo en tratamientos contra el cáncer o contra la malaria (Bollinger et al., 2025; Oladoye et al., 2022), cuando no se lo maneja adecuadamente puede generar problemas tanto en la salud de la población como en el medio ambiente. Según Khan

(2022), se trata de una sustancia tóxica para los humanos ya que ha sido clasificada como una sustancia carcinogénica, teratogénica y embriotóxica que puede causar daños a la salud como dificultad respiratoria, trastornos abdominales, digestivos y mentales, ceguera, náuseas, diarrea, vómitos, entre otros efectos adversos.

A su vez, su liberación a través de aguas residuales impacta directamente a los ecosistemas acuáticos: al tratarse de un colorante no solo afecta estéticamente los cuerpos de agua, sino que además reduce la penetración de la luz dada su característica coloración azul, lo cual resulta en una atenuación de la transmitancia de la luz solar en agua. Esto causa efectos negativos en los procesos fotosintéticos, disminuye la solubilidad del oxígeno en el agua, modifica la demanda química de oxígeno y la demanda biológica de oxígeno, afecta las cadenas alimenticias de los organismos, entre otros efectos, por lo que se ven afectados múltiples agentes ambientales.

Las industrias manufactureras como la textil y la farmacéutica que utilizan azul de metileno en su producción pueden liberar una gran cantidad de colorantes al medioambiente a través de aguas residuales (Bollinger et al., 2025). Las industrias textiles utilizan un gran volumen de agua potable a lo largo de sus procesos de producción, generando altas cantidades de desechos que van hacia los recursos acuáticos (Kishor et al., 2021). En muchos países estos efluentes son descargados hacia los ríos que, finalmente, desembocan en el mar. Esto es un problema ya que se trata de un colorante persistente: su aromaticidad le confiere una alta estabilidad frente a la temperatura, la luz, el agua y otras sustancias incluyendo jabones y detergentes. En consecuencia, es difícil de degradar, y usualmente no es eliminado durante los tratamientos convencionales de aguas residuales.

Según Rorissa et al. (2025), dado el impacto del azul de metileno en la salud y en el medio ambiente, incluso en cantidades traza, la Organización Mundial de la Salud recomienda que la concentración de colorantes en agua potable se limite a 1 mg/L. Por este motivo se vuelve necesario y urgente el desarrollo de tecnologías que permitan extraer azul de metileno en solución en aguas residuales.

Según Hamad e Idrus (2022), el tratamiento industrial de aguas residuales consta, en términos generales, de los siguientes procesos: preprimario, primario, secundario y terciario. En el primer paso se remueven partículas y materiales de gran tamaño como papel, plástico, tela, con un mínimo esfuerzo utilizando procesos de trituración y tamizado de estas partículas en suspensión. En el siguiente paso, el tratamiento primario, consiste en procesos de flotación y sedimentación de impurezas orgánicas e inorgánicas. En el proceso secundario intervienen microorganismos en la degradación de coloides y de compuestos orgánicos en solución. El

tercer paso implica el uso de agentes biológicos (anóxicos, aeróbicos y anaeróbicos, facultativos o una combinación de ellos), químicos (ozonización, precipitación química, intercambio iónico, fotocatalisis) o físicos (filtración de membrana, ultrafiltración, nanofiltración, adsorción, coagulación y floculación, ósmosis inversa) para eliminar sustancias que no puedan ser eliminadas durante el segundo paso. Sin embargo, en el tratamiento de aguas residuales que contienen colorantes en solución, pueden quedar sustancias que requieren de un tratamiento posterior a estos pasos.

Los métodos convencionales de remoción de colorantes en agua tienen ventajas y desventajas pero, a gran escala, la mayoría de ellos no son aplicables principalmente por el alto costo económico. De todos ellos, los procesos de adsorción ofrecen un amplio rango de técnicas que son económicamente más rentables, de operación más viable, que no implican un gasto energético tan grande y capaces de remover todo tipo de colorantes en forma eficiente (Hamad e Idrus, 2022).

2.5. Adsorción

La adsorción es uno de los métodos físicos más empleados para la remoción de colorantes y, en particular, se ha demostrado que es efectiva para la eliminación de azul de metileno presente en aguas residuales (Kannan y Sundaram, 2001). Se trata de un fenómeno en el que se produce la acumulación de una sustancia sobre una superficie. Cada sitio sobre la superficie del sólido disponible para adsorber una sustancia se denomina centro o sitio activo. Según Keller y Staudt (2005), es un fenómeno que ocurre a cualquier presión y temperatura para cualquier especie química conocida hasta el momento. No debe confundirse con el fenómeno de absorción (figura 6). Mientras que la adsorción es un fenómeno de superficie, la absorción es un fenómeno de volumen que puede o no ocurrir a cualquier presión y temperatura (Keller y Staudt, 2005). Muchas veces no puede distinguirse un fenómeno del otro y en esos casos se habla de fenómenos de sorción.

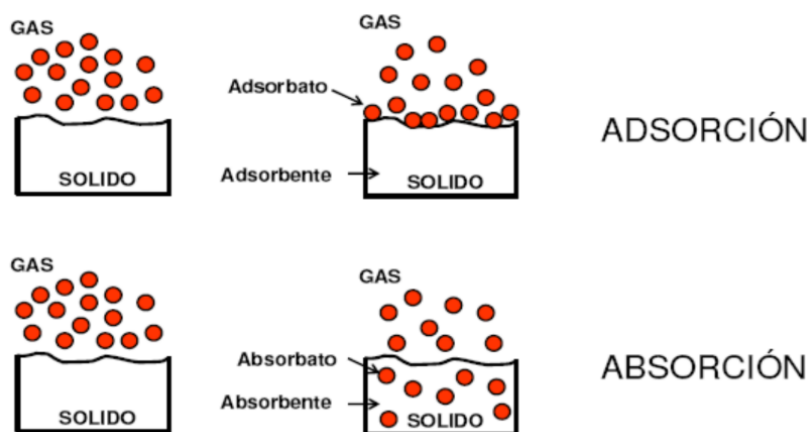


Figura 6. Diferencia entre adsorción y absorción

La sustancia que se adsorbe es el adsorbato y la superficie de base recibe el nombre de adsorbente o sustrato. El adsorbato puede tratarse tanto de un soluto disuelto en una fase líquida como de un gas, mientras que el adsorbente puede ser una superficie sólida o la superficie de otras fases líquidas. El adsorbato puede seguir el proceso inverso a la adsorción llamado desorción, en el que se separan de la fase sólida para volver a la fase fluida. Pasado un determinado intervalo de tiempo, se puede observar que se logra alcanzar un equilibrio dinámico entre el número de moléculas adsorbidas y aquellas desorbidas. Esta situación se conoce como equilibrio de adsorción. Fuera de la situación de equilibrio tenemos entonces un proceso de adsorción o de desorción según corresponda.

Este fenómeno superficial del sólido puede utilizarse en diversos procesos, de los cuales los más importantes son:

1. Procesos de separación de gases.
2. Procesos de secado de gases y de materiales sólidos.
3. Procesos de remoción o de limpieza de aire, agua y suelo.
4. Procesos de almacenamiento de gases.
5. Caracterización de materiales sólidos porosos.

Existen dos tipos de adsorción según la forma en las que los átomos o moléculas de adsorbato se adhieren a la superficie del sustrato (figura 7), aunque la línea divisoria entre las dos no siempre es clara (Atkins y De Paula, 2008). Por un lado, en la fisioadsorción (adsorción física), las moléculas de adsorbato son adsorbidas al interactuar con el adsorbente a través de fuerzas de Van der Waals o fuerzas de dispersión, ya sean de London o de tipo dipolo-dipolo inducido. Cuando la molécula se adsorbe se libera una cantidad de energía del mismo orden de magnitud que la entalpía de condensación. Estas interacciones son de largo alcance pero

producen una débil atracción en el proceso de adsorción, lo cual permite dar procesos reversibles de adsorción-desorción. Se trata de un proceso exotérmico con entalpías de alrededor de -20 kJ/mol en el que la energía disipada puede ser absorbida en forma de vibraciones por el sólido y luego disipada como calor de manera que, al adsorberse, la partícula que va rebotando sobre la superficie pierde gradualmente su energía y finalmente se adsorbe en un proceso denominado acomodación (Atkins y De Paula, 2008). El adsorbato conserva su identidad química durante el proceso, ya que no se produce ruptura ni formación de nuevos enlaces. Este tipo de adsorción es inespecífica y permite la formación de multicapas.

Por otro lado, en la quimioadsorción (adsorción química) las moléculas o átomos de adsorbato se unen a la superficie del sustrato formando un enlace químico (normalmente covalente) a través de una reacción química, por lo que se pierde la identidad del adsorbente, aunque se produce una fuerte unión al sustrato en comparación a la débil atracción de la adsorción física. La disociación de una molécula adsorbida químicamente es una de las razones por las que las superficies sólidas catalizan reacciones químicas. Las entalpías de este tipo de adsorción son mucho mayores que las de fisisorción, estando alrededor de los -200 kJ/mol. La distancia entre la superficie y el átomo más cercano de adsorbato es también mucho menor en la quimioadsorción que en la fisisorción. A su vez, a diferencia de la fisisorción, la adsorción química es específica y se da únicamente en monocapas (figura 8). Al ser esta una adsorción en la que el adsorbato se adhiere más fuertemente al sustrato no pueden ser desorbidas en forma reversible del mismo, lo cual solo es posible a través de procesos irreversibles.

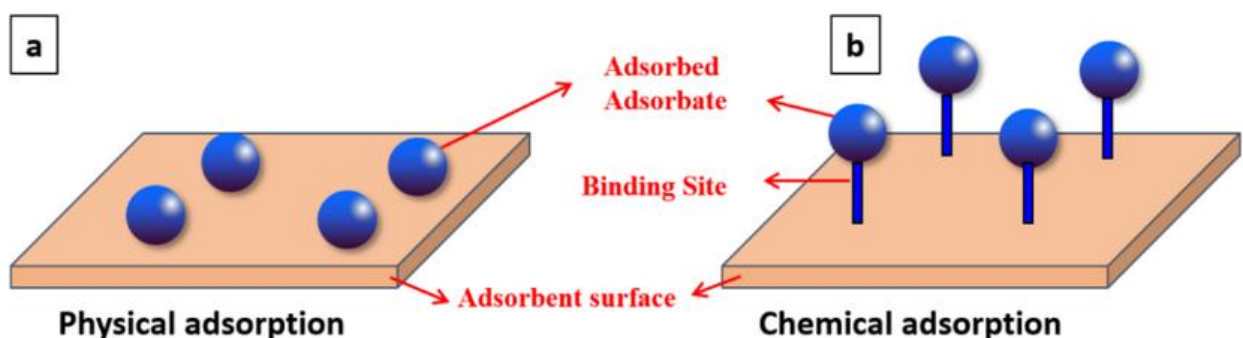


Figura 7. Adsorción física (a) y adsorción química (b). Reproducida de Ho (2022)

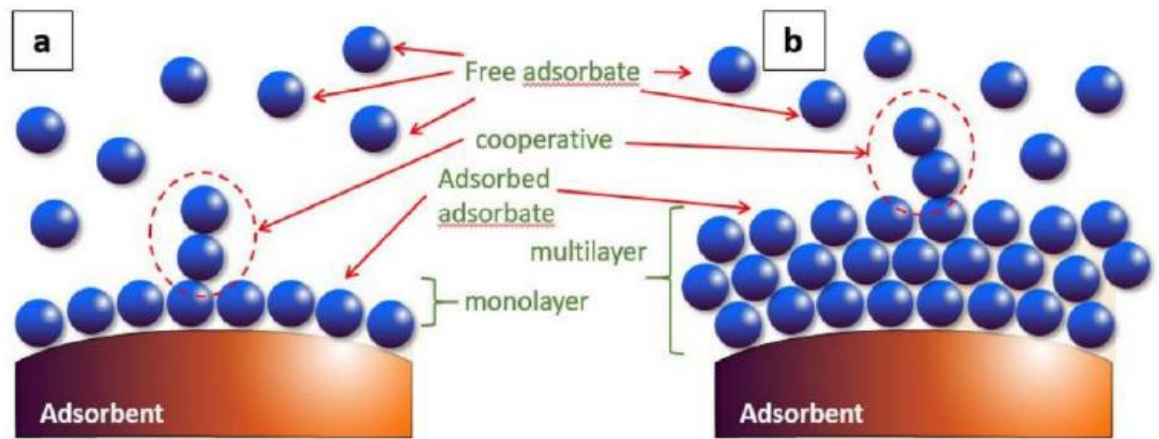


Figura 8. Adsorción en monocapa (a) y adsorción en multicapa (b). Reproducida de Ho (2022)

Se puede dar un tipo de adsorción u otro (o ambos) en función de las características del adsorbato y del adsorbente. Según Gregg y Sing (1982) se pueden dividir los tipos de sustrato en tres clases:

- I. Sin iones ni grupos positivos (por ejemplo, carbono grafitizado).
- II. Concentrados en cargas positivas.
- III. Concentrados en cargas negativas.

En cuanto a los adsorbatos se encuentran los siguientes grupos:

- a) Adsorbatos simétricos esféricos o de enlaces σ (por ejemplo, gases nobles e hidrocarburos saturados).
- b) Adsorbatos con enlaces π (por ejemplo, hidrocarburos insaturados o aromáticos) o con pares de electrones aislados (por ejemplo, éteres o aminas terciarias).
- c) Adsorbatos con concentración de carga positiva en la periferia de las moléculas.
- d) Adsorbatos con grupos funcionales con alta densidad electrónica y cargas positivas concentradas (por ejemplo, moléculas con grupos $-OH$ o $=NH$).

Según esta clasificación se pueden dar los tipos de interacción adsorbato-adsorbente que se indican en la tabla 2.

Tabla 2. Tipos de interacción según el adsorbato y el adsorbente. Reproducida de Gregg y Sing (1982)

Specific and non-specific adsorption³³			
Adsorbate group	Class of adsorbent		
	I	II	III
(a)	n	n	n
(b)	n	n + s	n + s
(c)	n	n + s	n + s
(d)	n	n + s	n + s

s = specific adsorption; n = non-specific adsorption.

2.5.1. Efecto del pH en procesos de adsorción

El pH es un factor importante a tener en cuenta en estudios de procesos de adsorción ya que puede afectar al mecanismo del fenómeno. Según Yagub et al. (2012), el pH de la solución del adsorbato es una de las variables más importantes en estudios de adsorción de colorantes. Esto se debe, parcialmente, al hecho de que los iones de hidrógeno influyen en la ionización de los grupos funcionales de la superficie del sustrato. El carácter competitivo de los hidrogeniones, a su vez, puede afectar el comportamiento del adsorbato. Tal es el caso de los colorantes catiónicos como el azul de metileno, en el que la presencia de H⁺ en alta concentración puede competir con las regiones catiónicas del colorante, impidiendo su disponibilidad para la interacción con los sitios de adsorción del sustrato, sin contar con la posible protonación o deprotonación de los grupos ionizables de la molécula. Por esta razón, en la adsorción de cualquier contaminante orgánico, la optimización del pH de la solución es fundamental si se desea maximizar la capacidad de adsorción del proceso.

2.5.2. Isotermas de adsorción

Cuando se alcanza el equilibrio dinámico entre la sustancia libre y la adsorbida se puede estudiar la dependencia entre el recubrimiento de la superficie sólida con el adsorbato situado sobre ella. Según Levine (2014), para realizar estudios de adsorción se mide la cantidad de sustancia adsorbida como función de la presión del gas o de la concentración en equilibrio con el sólido en condiciones de temperatura constante. Los datos de cantidad de sustancia adsorbida frente a la presión o a la concentración a una misma temperatura constituyen una isoterma de

adsorción. El experimento se repite con diferentes concentraciones iniciales de adsorbato y se genera una serie de valores de moles adsorbidos (masa o volumen en caso de adsorbatos en estado gaseoso) contra la concentración de la sustancia en equilibrio, siempre a temperatura fija del adsorbente. Por razones históricas se grafican isothermas de adsorción utilizando datos de cantidad adsorbida por gramo de adsorbente.

Las isothermas de adsorción se pueden clasificar, según recomienda la IUPAC, en seis tipos diferentes I-VI (figura 9).

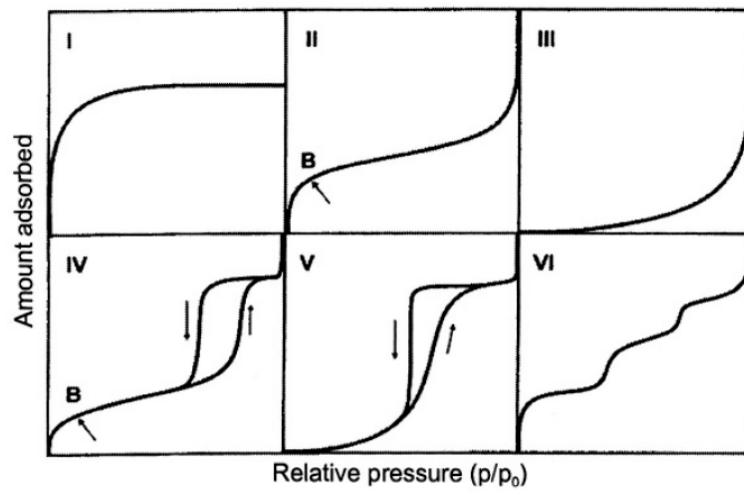


Figura 9. Principales isothermas de adsorción según la IUPAC. Reproducida de Keller y Staudt (2005)

Las isothermas de tipo I se caracterizan por una meseta horizontal. Se trata de un valor asintótico al que se aproxima y se mantiene la cantidad adsorbida incluso a presiones o concentraciones muy elevadas de adsorbato. La interpretación de este tipo de isoterma es que, en el límite de adsorción, la superficie del adsorbente se cubre con una monocapa del adsorbato. Por este motivo es que son características de una adsorción química. Este tipo de isothermas puede ser descrito por la ecuación de Langmuir y son características de sustratos microporosos en los que la adsorción se da sobre los microporos pero sin la formación de multicapas.

Las isothermas de tipo II describen el comportamiento de un proceso de fisiadsorción. En este caso, a bajas concentraciones se observa la formación de una monocapa de adsorbato, lo cual se asocia al rápido ascenso inicial de la curva. Con el aumento de la concentración se favorece la formación de una segunda monocapa de la sustancia adsorbida, es decir, permite describir una adsorción en multicapas. Estas isothermas son características de procesos de adsorción sobre sólidos dispersos, no porosos o únicamente macroporosos (Gregg y Sing, 1982; Keller y Staudt, 2005).

Existen muchos modelos que permiten ajustar datos experimentales obtenidos a través de procesos de adsorción.

2.5.2.1. Isotherma de Langmuir

La isoterma de Langmuir es una de las más sencillas y está basada en los siguientes supuestos:

1. La adsorción no puede tener lugar más allá de la formación de la monocapa sobre el sustrato.
2. Todos los centros activos de adsorción son equivalentes y la superficie es uniforme (la superficie es perfectamente plana a escala microscópica).
3. La capacidad del adsorbato para adsorberse en un centro determinado es independiente de la ocupación de los centros vecinos: las interacciones entre las moléculas adsorbidas se desprecian al asumir que son de baja intensidad en comparación a las interacciones adsorbato-adsorbente.
4. Cada sitio de adsorción solo puede alojar una molécula de adsorbato.
5. El sustrato tiene una capacidad de adsorción límite.

La isoterma de Langmuir está dada por la ecuación 2 (Enniya y Jourani, 2017):

$$q_e = \frac{q_{max} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2)$$

Donde:

- q_e es la cantidad de sustancia adsorbida en el equilibrio [mg/g].
- q_{max} es la cantidad límite de adsorbato que puede adsorber el sólido [mg/g].
- K_L es la constante de Langmuir [L/mg].
- C_e es la concentración de adsorbato en solución en el equilibrio [mg/L].

La ecuación 3 corresponde a la linealización de la isoterma de Langmuir:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max} K_L} + \frac{1}{q_{max}} C_e \quad (3)$$

La mayoría de las suposiciones de Langmuir son falsas. La superficie de la mayoría de los sólidos no es uniforme y la velocidad de desorción depende de la ubicación de la sustancia adsorbida, las interacciones entre moléculas de adsorbato es, normalmente, importante, y existe mucha evidencia de que las moléculas adsorbidas se mueven sobre la superficie del sólido. Además, tiene la limitación de que no permite explicar la adsorción en multicapas, el cual es un fenómeno muy común en la adsorción física.

2.5.2.2. Isotherma de Freundlich

La isoterma de Freundlich (Levine, 2014) se obtiene al modificar las suposiciones de Langmuir para permitir diferentes sitios de adsorción en el sólido, cada uno con un calor de adsorción diferente, por lo que cada espacio de unión ya no es equivalente. Esta isoterma se aplica habitualmente a la adsorción de solutos de soluciones líquidas en sólidos y es útil en el caso de tener adsorción en multicapas (Enniya y Jourani, 2017). Este modelo, por lo tanto, asume que existen interacciones entre moléculas adsorbidas adyacentes. La ecuación 4 define esta isoterma.

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

Donde:

- K_F es la constante de Freundlich.
- n es la intensidad de la adsorción.

La ecuación 5 representa la forma linealizada de la isoterma de Freundlich.

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (5)$$

2.5.2.3. Isotherma de Temkin

Este modelo se basa en la hipótesis de que el calor de adsorción decrece linealmente como consecuencia de la interacción entre el adsorbente y el adsorbato. Diversos autores han propuesto el uso de este modelo para fases líquidas además de fases gaseosas (Enniya y Jourani, 2017). Esta isoterma está dada por la ecuación 6.

$$q_e = B \ln K_T + B \ln C_e \quad (6)$$

Con $B = q_{max} \frac{RT}{\Delta Q}$ (7) donde:

- K_T es la constante de Temkin [L/mg].
- T es la temperatura absoluta [K].
- ΔQ es la variación de energía de adsorción [J/mol].

2.6. Adsorción de azul de metileno en adsorbentes de bajo costo

Son muchas las ventajas de la adsorción como método de remoción de colorantes en aguas, principalmente su efectividad, flexibilidad, rapidez, su sencilla operación y su relativo bajo costo al comparar con otras técnicas. Se pueden utilizar diversos adsorbentes, siendo el carbón activado aquel con mayor capacidad de adsorción. Sin embargo, su elevado costo limita su aplicación en procesos de remediación ambiental (Gupta et al., 2021). Es por esta razón que

resulta de interés estudiar adsorbentes de bajo costo en la adsorción de colorantes, particularmente en la adsorción de azul de metileno. Entre ellos se han estudiado diversos tipos de carbón activado obtenidos a partir de cáscaras de frutas, desechos agrícolas, arcillas, etc. El uso de este tipo de adsorbentes ofrece una alternativa económica, amigable con el medio ambiente, efectiva y de fácil acceso.

Entre la amplia variedad de adsorbentes de bajo costo que se han estudiado, se han obtenido buenos resultados utilizando carbón activado obtenido a partir de cáscaras de naranja (Gupta et al., 2021), cáscaras de manzana disecadas (Enniya & Jourani, 2017), cáscaras de maní disecadas (Özer et al., 2006), hojas de pino (Yagub et al., 2012) y desechos de té (Uddin et al., 2008). El uso de biomasa (viva o muerta), hongos, algas y residuos agrícolas ha sido objeto de estudio de numerosas publicaciones científicas recientes. Los materiales biológicos de este tipo utilizados para acumular y concentrar colorantes de soluciones acuosas se denominan bioadsorbentes. La principal desventaja de este tipo de biomateriales es que son no selectivos en cuanto a su capacidad de remoción (no pueden aislar cada contaminante y removerlo independientemente de los demás), sino que todo aquel contaminante en solución podría ser adsorbido en la superficie del sustrato (Mohammed et al, 2014). Sin embargo, como se mencionó previamente, la principal ventaja de este tipo de adsorbentes radica en su bajo costo, su simplicidad en cuanto al diseño y su alta eficiencia, disponibilidad y capacidad de separar una amplia variedad de sustancias presentes en aguas residuales.

En Mohammed et al. (2014) se encuentran tabulados datos de una muy amplia variedad de bioadsorbentes estudiados para la remoción de azul de metileno en aguas residuales (tabla 3). En todos los casos se han hallado resultados positivos en cuanto a la adsorción del colorante, lo cual incentiva a experimentar con nuevos sustratos de bajo costo para el desarrollo de procesos de remediación más económicos y eficientes. En todos estos estudios se determinaron isothermas de adsorción y se estudió el comportamiento de la cinética de adsorción, como también el efecto de la temperatura y del pH. Normalmente se emplean las isothermas de Langmuir, Freundlich, BET y Temkin para analizar los datos y lograr el mejor ajuste. Asimismo, se observa que la mayoría de las investigaciones se han realizado utilizando procesos por lotes (batch), lo cual permite pensar en el diseño de sistemas de flujo con aplicaciones industriales viables.

Tabla 3. Parámetros experimentales de adsorción de bioadsorbentes. Reproducida de Mohammed et al. (2014)

Biosorbent	Q _{max} (mg/g)	pH	Experimental Parameters/ Result				
			T(°C)	C _o (mg/l)	T (min)	AD (g/l)	Best fitted model
Grass waste	457.64.	3-10		380	70	0.05-1.20	L and k2
Pummelo peel	390.6	8	30	300	30	2	L and K1
Gulmohar plant leaf powder	186.22	7.5	30	10-100		0.5-2.5	L and K2
Guava seed	0.10	6	25	50		0.03	-
Meranti sawdust	120.48	9-12	60	50-200	180	0.1-1.2	L and K2
Tea waste	85.16	4.3+0.2	27+2	20-50	300	0.2	L and K2
Garlic peel,	142.86	4-12	50	25-200	210		F and K2
Carica papaya seeds	1250	6.25	30	10	120	1.5	
Pineapple stem waste	119.05	9	30	250	330	03	L and K2
Jackfruit peel	285.713	2-11	30	35-400		0.05-1.20	L and K2
Papaya seeds (PS)	555.557	3-10	30	50-360		0.05-1.0	L and K2
Water hyacinth	426.9	8	30	250		2.0	L
Hydrolyzed Oak sawdust	67.78	8	25	300	90	2.5	L and K2

Capítulo 3

Materiales y metodología

En este capítulo se detalla la metodología de trabajo y los materiales utilizados a lo largo del trabajo experimental desarrollado en el Laboratorio de Fisicoquímica de la Facultad de Ingeniería. Los protocolos de trabajo fueron adaptados a partir de los estudios en cáscaras de manzana realizados por Enniya y Jourani (2017).

3.1. Determinación de la longitud de onda máxima de absorción del azul de metileno

Se comenzó por la preparación de una solución madre de azul de metileno a partir del sólido en polvo marca Anedra (figura 10). Para pesar la sustancia se utilizó una balanza electrónica marca AND modelo HR-200 (figura 11). La solución se preparó utilizando un matraz aforado de 200 mL y se llevó a volumen con agua destilada. La concentración de esta solución fue de 102,5 ppm. Luego se prepararon soluciones diluidas del colorante a partir de la solución madre. Las concentraciones finales de estas diluciones fueron: 1,5; 3,5; 5; 6,5; 8 y 10 ppm (figura 12).

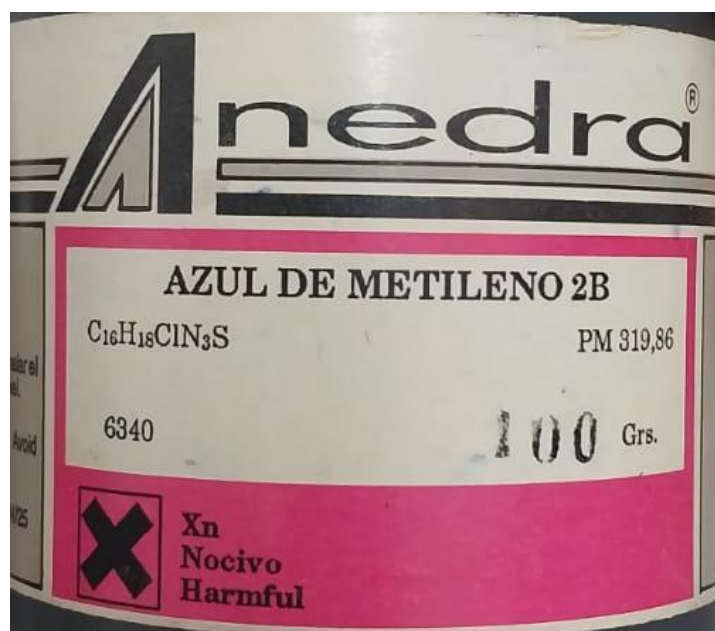


Figura 10. Azul de metileno sólido en polvo marca Anedra



Figura 11. Balanza AND HR-200



Figura 12. Soluciones acuosas de azul de metileno

Para las mediciones de absorbancia se utilizó un espectrofotómetro marca PerkinElmer modelo Lambda 25 (figura 13) y cubetas de cuarzo PerkinElmer (figura 14). Para la carga de la cubeta se utilizó una micropipeta y puntas de plástico.



Figura 13. Espectrofotómetro PerkinElmer Lambda 25

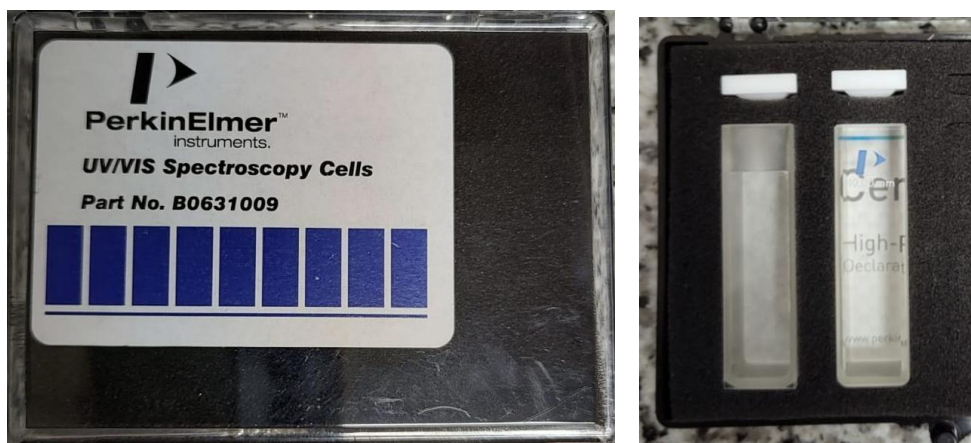


Figura 14. Cubetas de cuarzo marca PerkinElmer

Se realizó un barrido espectral para cada solución diluida de 400 a 780 nm y un barrido adicional de 200 a 780 nm para la solución de 10 ppm. Para las mediciones de absorbancia se tomó como referencia un blanco de agua destilada en cubeta de cuarzo. Luego se graficó la absorbancia de cada solución en función de la longitud de onda para construir el espectro de absorción.

Entre mediciones se lavó la cubeta de cuarzo con agua corriente, luego se realizó un lavado utilizando alcohol etílico para disolver el remanente del colorante en las paredes de la cubeta y por último se lavó con agua destilada. Para el secado de la cubeta se utilizó un secador eléctrico. Se utilizó el mismo protocolo de lavado a lo largo de todo el trabajo experimental.

3.2. Curva de calibración

Para la curva de calibración se utilizaron soluciones diluidas del colorante de concentración 1,5; 2,5; 3,5; 5; 6,5; 8; 9 y 10 ppm. A cada solución se le midió la absorbancia a la longitud de onda máxima determinada previamente. Luego se graficó la absorbancia de cada solución a la longitud de onda máxima en función de la concentración. Los parámetros de la ley de Lambert-Beer se obtuvieron de la recta de regresión lineal construida a partir del gráfico de dispersión utilizando Excel.

3.3. Preparación de los bioadsorbentes

3.3.1. Cáscaras de manzana

Las cáscaras se obtuvieron de manzanas Red Delicious. En primer lugar se lavaron las manzanas con agua corriente y luego se las peló con un cuchillo de cocina tratando de obtener

cáscaras lo más finas posible. Posteriormente se les extrajo los restos de pulpa raspándolas con un cuchillo hasta tener nada más que la cáscara de la fruta (figura 15).



Figura 15. De izquierda a derecha: cáscaras de manzana con pulpa y sin pulpa

Una vez extraída la pulpa se colocaron las cáscaras en un recipiente de metal y en una rejilla metálica con papel aluminio (figura 16).



Figura 16. Cáscaras de manzana sin pulpa previo al secado en estufa

Las cáscaras sin pulpa fueron secadas en una estufa a una temperatura de aproximadamente 60 °C durante 24 horas. Luego se procedió a la molienda de las cáscaras sin pulpa disecadas utilizando un mortero (figura 17).



Figura 17. Cáscaras de manzana disecadas previo a la molienda

Las partículas fueron tamizadas utilizando, primero, un tamiz de tamaño de rejilla de 300 μm y luego un tamiz de 200 μm . Se buscó tener partículas de alrededor de 250 μm , por lo que el adsorbente utilizado fue aquel que logró filtrarse a través del primer tamiz, pero no a través del segundo. En la figura 18 se observa el resultado final del polvo de cáscaras de manzana disecadas (CMD) sobre el tamiz de 200 μm .



Figura 18. Polvo de CMD sobre tamiz de 200 μm

3.3.2. Hojas de álamo

Se recolectaron hojas verdes de álamos. En primer lugar se extrajo el tallo de cada una de ellas para utilizar solo la lámina de las hojas. Las hojas fueron dispuestas sobre el recipiente metálico y la rejilla con papel aluminio de la misma manera que las cáscaras de manzana y se las secó en la estufa a 60 °C durante 48 horas ya que se observó que al cabo de las primeras 24 horas de secado aún conservaban humedad. Posteriormente se trituraron utilizando un mortero y finalmente se filtraron las partículas utilizando los tamices de 200 y 300 μm . En la figura 19 se observa el resultado final.



Figura 19. Hojas de álamo disecadas y trituradas para uso como bioadsorbente

3.4. Morfología de los bioadsorbentes

Para analizar el tamaño de las partículas de los bioadsorbentes se tomaron micrografías de ambos polvos utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM) del Instituto de Investigación en Tecnologías y Ciencias de la Ingeniería (IITCI, CONICET-UNCo). El microscopio, Axia ChemiSEM de Thermo Fisher Scientific, es un SEM con fuente termiónica de tungsteno que opera en un rango de 0,2–30 kV, con resolución espacial de ~ 3 nm (figura 20).

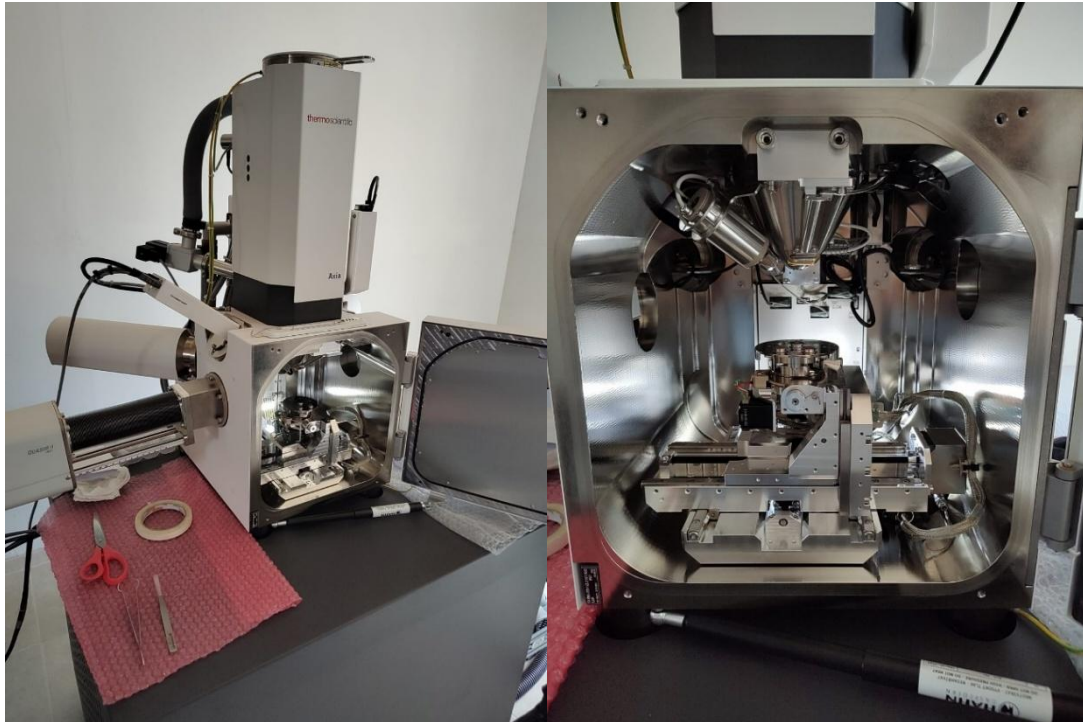


Figura 20. Microscopio Axia ChemiSEM de Thermo Fisher Scientific

3.5. Estudio del efecto de la cantidad de adsorbente en la adsorción de azul de metileno

Para estos ensayos se utilizó azul de metileno de concentración 10 ppm. Para preparar las soluciones del colorante para cada ensayo con los bioadsorbentes se preparó, en primer lugar, 1 L de una solución de 500 ppm de azul de metileno a partir de una solución de 3,74 g/L de fecha de elaboración del 25/04/16 (figura 21). Previamente se corroboró que la solución concentrada del colorante tuviera la misma longitud de onda máxima de absorción para ser utilizada como analito en los estudios de adsorción.



Figura 21. De izquierda a derecha: azul de metileno 3,74 g/L y azul de metileno 500 ppm

Las cantidades de bioadsorbente, tanto de cáscaras de manzana como de hojas de álamo, fueron: 0,025; 0,05; 0,1; 0,2 y 0,3 g. Los adsorbentes se introdujeron en erlenmeyers de 250 mL y, posteriormente, se vertieron 100 mL de azul de metileno 10 ppm utilizando una probeta. Cada mezcla fue agitada durante 30 minutos utilizando un agitador magnético. En la figura 22 se observa la mezcla y el sistema de agitación.



Figura 22. Azul de metileno 10 ppm con cáscara de manzana disecada en el agitador magnético

Adicionalmente se realizaron dos blancos de referencia con agua destilada para cada bioadsorbente utilizando la misma metodología de trabajo. Para ello se utilizaron 0,1 y 0,3 g de cada uno de los bioadsorbentes.

Una vez finalizado el proceso de agitación se dejó reposar cada mezcla durante 48 horas a temperatura ambiente (figura 23). Se controló que la temperatura de trabajo se encontrara siempre dentro del rango de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figura 23. Blanco y soluciones de azul de metileno con cáscaras de manzana disecadas como bioadsorbente en reposo

Luego de las 48 horas de reposo se midió la absorbancia de cada sistema extrayendo una muestra del sobrenadante utilizando una micropipeta. A partir de los datos registrados se calculó la cantidad de colorante adsorbida a un tiempo t (en este ensayo $t = 48$ h) utilizando la ecuación 7.

$$q_t = \frac{(C_i - C_t)V}{m} \quad (7)$$

Donde:

q_t : cantidad de azul de metileno adsorbida a un tiempo t [mg/g].

C_i : concentración inicial de azul de metileno [mg/L].

C_t : concentración de azul de metileno del sobrenadante a un tiempo t [mg/L].

m : masa de bioadsorbente [g].

V : volumen de solución de azul de metileno [L].

Adicionalmente se calculó el porcentaje de remoción de azul de metileno utilizando la ecuación 8.

$$\%R = \frac{C_i - C_t}{C_i} 100 \quad (8)$$

Finalmente se graficó q_t y $\%R$ en función de la cantidad de adsorbente.

3.6. Cinética de adsorción

Para este estudio se utilizó una cantidad fija de 0,1 g de adsorbente y azul de metileno 10 ppm. El bioadsorbente se introdujo en un erlenmeyer de 250 mL y se vertieron 100 mL de la solución del colorante. Luego se agitó la mezcla durante 1 minuto y se dejó reposar 2 minutos. Posteriormente se midió la absorbancia de la solución de azul de metileno durante 4 horas, tomando muestras del sobrenadante cada 10 minutos durante las primeras 2 horas de medición y luego cada 30 minutos durante las últimas 2 horas. Luego se graficó q_t en función de t . Para modelizar la cinética de adsorción se utilizaron dos modelos cinéticos, los cuales se describen a continuación.

3.6.1. Modelo de pseudo primer orden

El modelo de adsorción de primer orden, también conocido como modelo de Lagergren, se expresa como indica la ecuación 9 (Enniya y Jourani, 2017; Özer et al., 2006; Salunke et al., 2020).

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (9)$$

En la ecuación 9, q_e y q_t son, respectivamente, las cantidades de colorante adsorbida en el equilibrio y en el tiempo en unidades de mg/g, mientras que k_1 es la constante de velocidad de adsorción de pseudo primer orden [min^{-1}]. La ecuación 10 expresa la forma integrada del modelo de Lagergren integrando desde $t = 0$ y $q_t = 0$ hasta $t = t_e$ y $q_t = q_e$.

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2,303} t \quad (10)$$

3.6.2. Modelo de pseudo segundo orden

La ecuación 11 expresa el modelo de pseudo segundo orden para la cinética de adsorción.

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (11)$$

Donde k_2 es la constante de velocidad de adsorción de pseudo segundo orden [g/mg.min]. Al integrar la ecuación 11 desde $t = 0$ y $q_t = 0$ hasta $t = t_e$ y $q_t = q_e$ se obtiene la forma linealizada del modelo (ecuación 12).

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{(k_2 q_e^2)} + \frac{1}{q_e} t \quad (12)$$

3.7. Isotermas de adsorción

Se pesaron 0,1 g de bioadsorbente y se introdujeron en erlenmeyers de 250 mL. Para el caso de las cáscaras de manzana desecadas se utilizaron soluciones de azul de metileno de 5, 10, 14, 50, 100 y 300 ppm. En el caso de las hojas de álamo se utilizaron soluciones del colorante de 5, 10, 50, 100 y 300 ppm. Se vertieron 100 mL de cada solución en el erlenmeyer correspondiente, se agitó durante 30 minutos la mezcla y se la dejó reposar durante 48 horas a temperatura ambiente (20 °C). Finalizada la etapa de reposo se procedió a medir la absorbancia de cada solución del colorante extrayendo muestras del sobrenadante con una micropipeta. Luego se construyeron las isotermas empleando las ecuaciones de la sección 2.5.2.

3.8. Efecto del pH en la adsorción

Se estudió la adsorción de azul de metileno a pH básico, neutro y ácido. Se utilizaron 0,1 g de bioadsorbente y 100 mL de solución acuosa de azul de metileno 10 ppm. Para medir el pH de las soluciones se utilizaron tiras reactivas y un peachímetro marca Adwa modelo AD12. El peachímetro fue calibrado utilizando agua destilada.

Para alcalinizar la solución se utilizó hidróxido de sodio y se midió el pH tanto con las tiras reactivas como con el peachímetro. Para la acidificación se utilizó ácido clorhídrico y se

midió el pH de la misma manera. La solución neutra fue preparada con agua destilada y se corroboró que se encontrara a pH neutro.

Para este estudio se pesaron 0,1 g de bioadsorbente, se introdujeron en un erlenmeyer de 250 mL y luego se vertieron 100 mL de la solución básica de azul de metileno. Posteriormente se agitó la mezcla durante 30 minutos y luego se dejó reposar durante 48 horas. Una vez transcurrido el período de reposo se midió la absorbancia de la solución extrayendo una muestra del sobrenadante. El mismo procedimiento se realizó con la solución neutra y ácida del colorante y con ambos bioadsorbentes. A partir de los resultados experimentales se graficó la cantidad de colorante adsorbida en el equilibrio q_e en función del pH.

3.9. Tratamiento de residuos

Los ensayos experimentales realizados a lo largo del trabajo de laboratorio generaron residuos de azul de metileno. Por un lado, los descartes de solución del colorante se almacenaron en un bidón de plástico del Laboratorio de Fisicoquímica de la Facultad de Ingeniería para su posterior tratamiento. Asimismo, los residuos de bioadsorbentes utilizados en la adsorción del colorante fueron recolectados en papel de filtro y descartados en un recipiente de uso exclusivo para residuos sólidos del laboratorio.

Capítulo 4

Resultados y discusión

4.1. Determinación de la longitud de onda máxima de absorción del azul de metileno y barrido espectral

Las figuras 24 y 25 muestran el espectro de absorción del azul de metileno a distintas concentraciones.

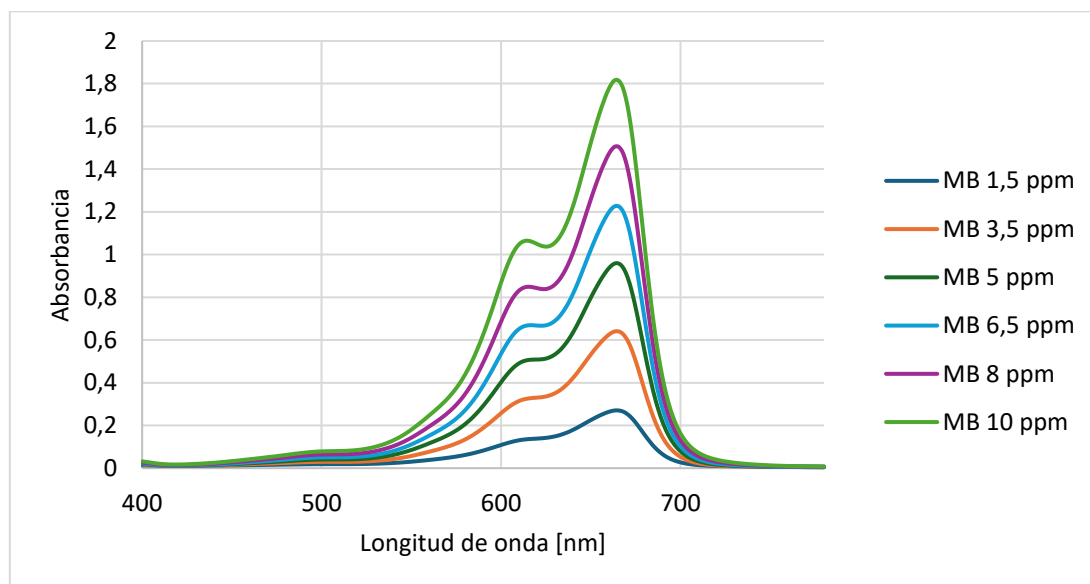


Figura 24. Barrido espectral del azul de metileno (400 – 780 nm)

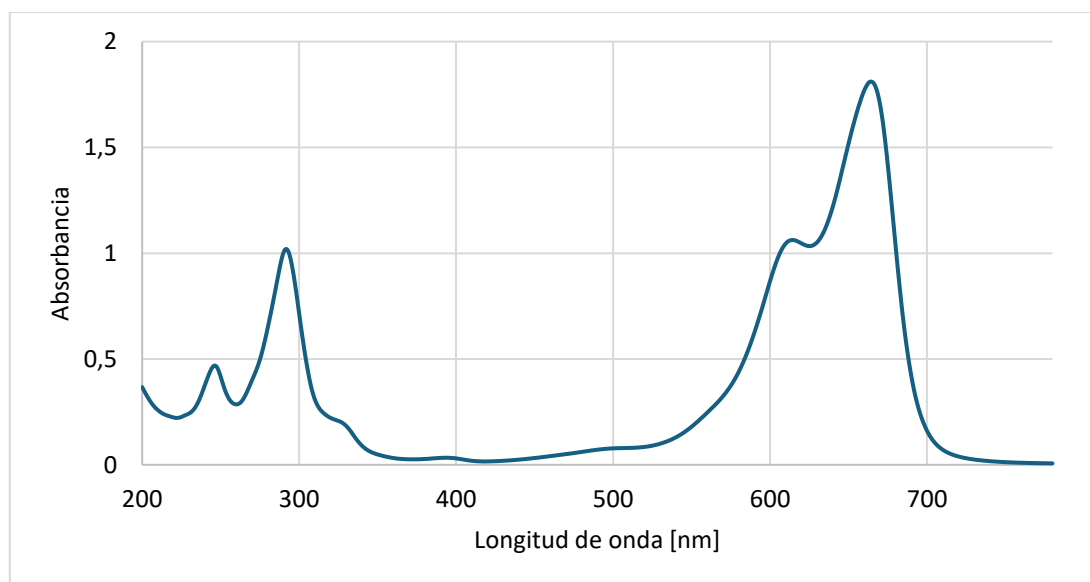


Figura 25. Barrido espectral de azul de metileno 10 ppm (200 – 780 nm)

Se puede observar, a partir de la figura 24, que la sustancia posee dos máximos de absorción en la región visible del espectro electromagnético. A su vez, se observa que los barridos conservan la proporcionalidad entre la absorbancia y la concentración, tal como lo establece la ley de Beer (ecuación 1). La figura 25 evidencia máximos de absorbancia en la

región UV del espectro a partir del barrido de la solución 10 ppm del colorante. A partir de los datos de absorbancia en función de la longitud de onda se pudo determinar que el valor de $\lambda_{\text{máx}}$ de absorbancia de la sustancia se encuentra a 664 nm (tabla 4).

Tabla 4. Extracto de datos de absorbancia de azul de metileno en función de la longitud de onda

Longitud de onda [nm]	Absorbancia					
	1,5 ppm	3,5 ppm	5 ppm	6,5 ppm	8 ppm	10 ppm
665	0,2704	0,6409	0,9592	1,2271	1,5061	1,8165
664	0,2704	0,6410	0,9595	1,2276	1,5067	1,8177
663	0,2696	0,6390	0,9567	1,2241	1,5030	1,8138

4.2. Curva de calibración

En la tabla 5 se encuentran los valores de absorbancia (A) para cada concentración (C) de azul de metileno y en la figura 26 se observa la línea de tendencia correspondiente a los datos registrados.

Tabla 5. Absorbancia de las soluciones de azul de metileno empleadas para la curva de calibración

C [ppm]	A
1,5	0,2509
2,5	0,4944
3,5	0,6764
5	0,9711
6,5	1,2699
8	1,5537
9	1,6721
10	1,8257

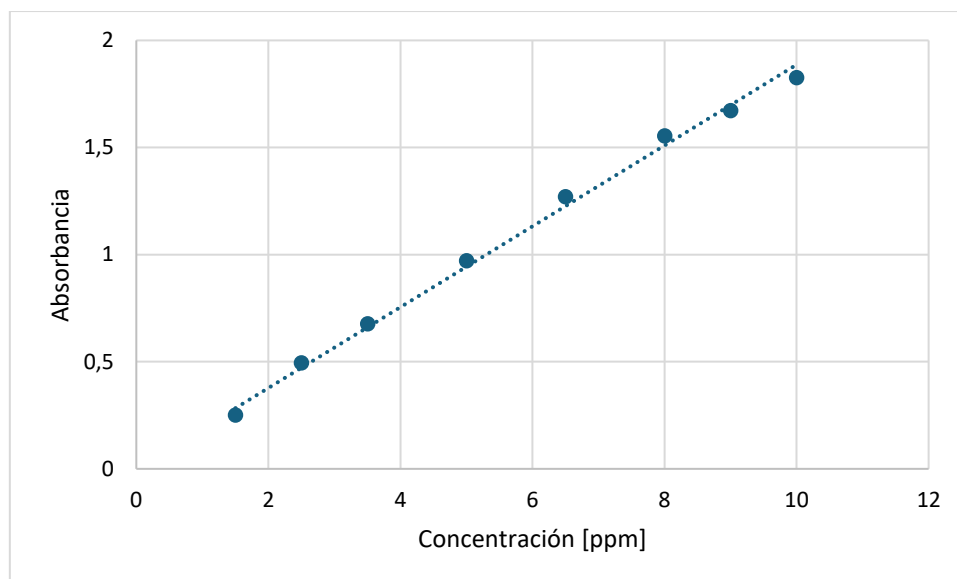


Figura 26. Curva de calibración de azul de metileno

El valor de R^2 de la línea de tendencia de la figura 26 fue de 0,9991. La ecuación de la regresión lineal se puede interpretar en términos de la ley de Lambert-Beer (ecuación 1) de la siguiente manera:

$$A = 0,1887 \frac{L}{\text{mol cm}} bc \quad (13)$$

A partir de la ecuación 13 se calcularon las concentraciones de todas las soluciones analizadas por espectroscopia de absorción molecular ($b = 1 \text{ cm}$).

4.3. Morfología de los bioadsorbentes

En las figuras 27 y 28 se pueden observar las micrografías de las partículas de CMD y de HAD, respectivamente, tomadas con el microscopio electrónico de barrido. En la figura 27 se observan partículas correspondientes al polvo de CMD de forma irregular, dispersas y de tamaño uniforme de alrededor de $200 \mu\text{m}$. En la figura 28 se observan las partículas de polvo de HAD con una mayor aglomeración respecto a lo que se observa para las partículas de CMD, de forma igualmente irregular y tamaño de alrededor de $200 \mu\text{m}$, aunque se observan partículas de mayor tamaño, alargadas, que posiblemente hayan atravesado el tamiz de $300 \mu\text{m}$ a través de su sección longitudinal.

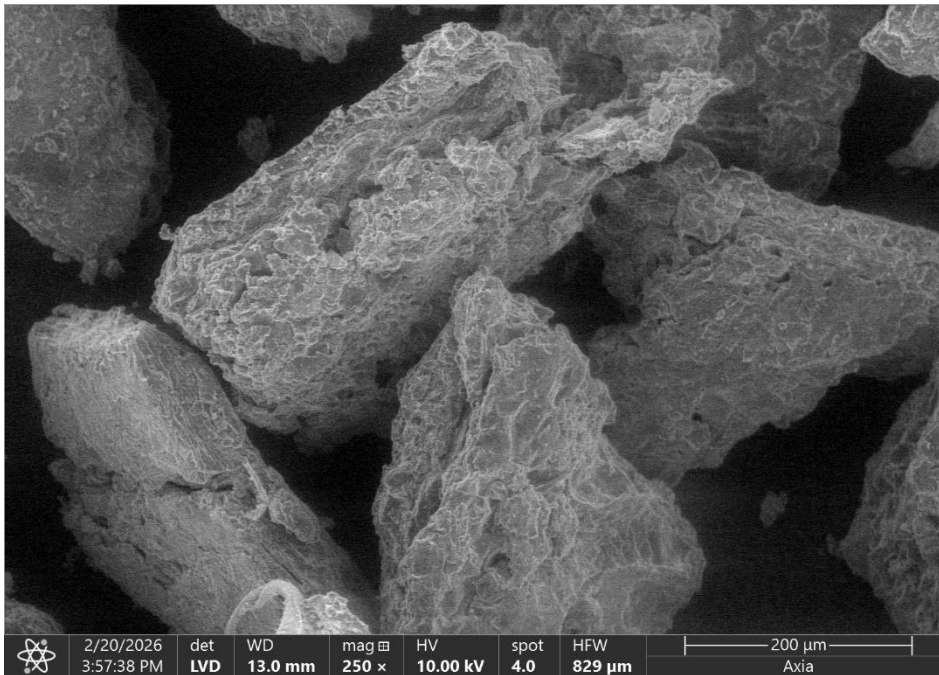
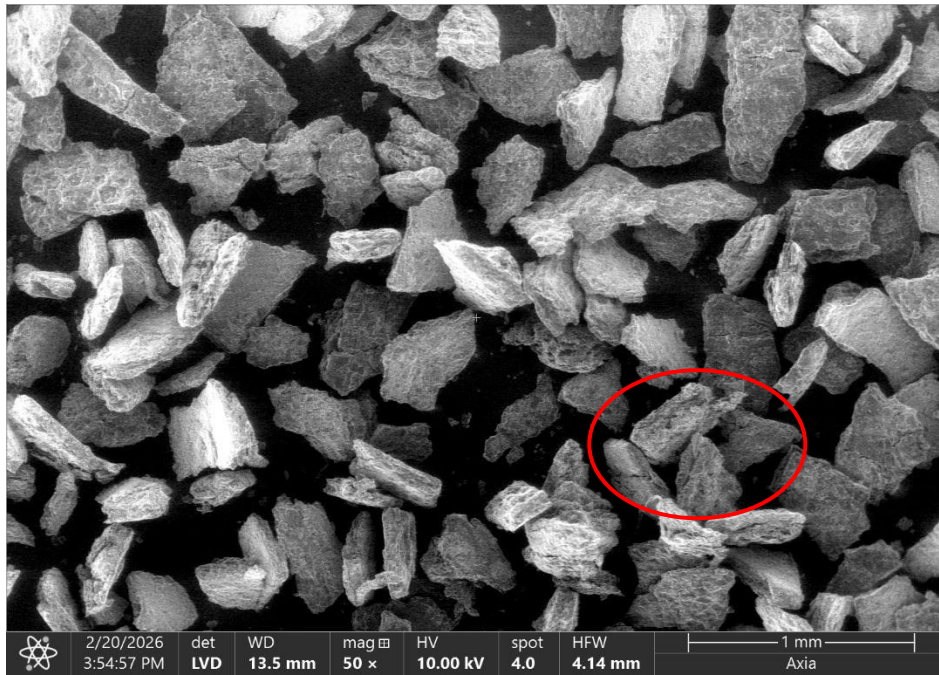


Figura 27. Micrografías de las partículas de CMD

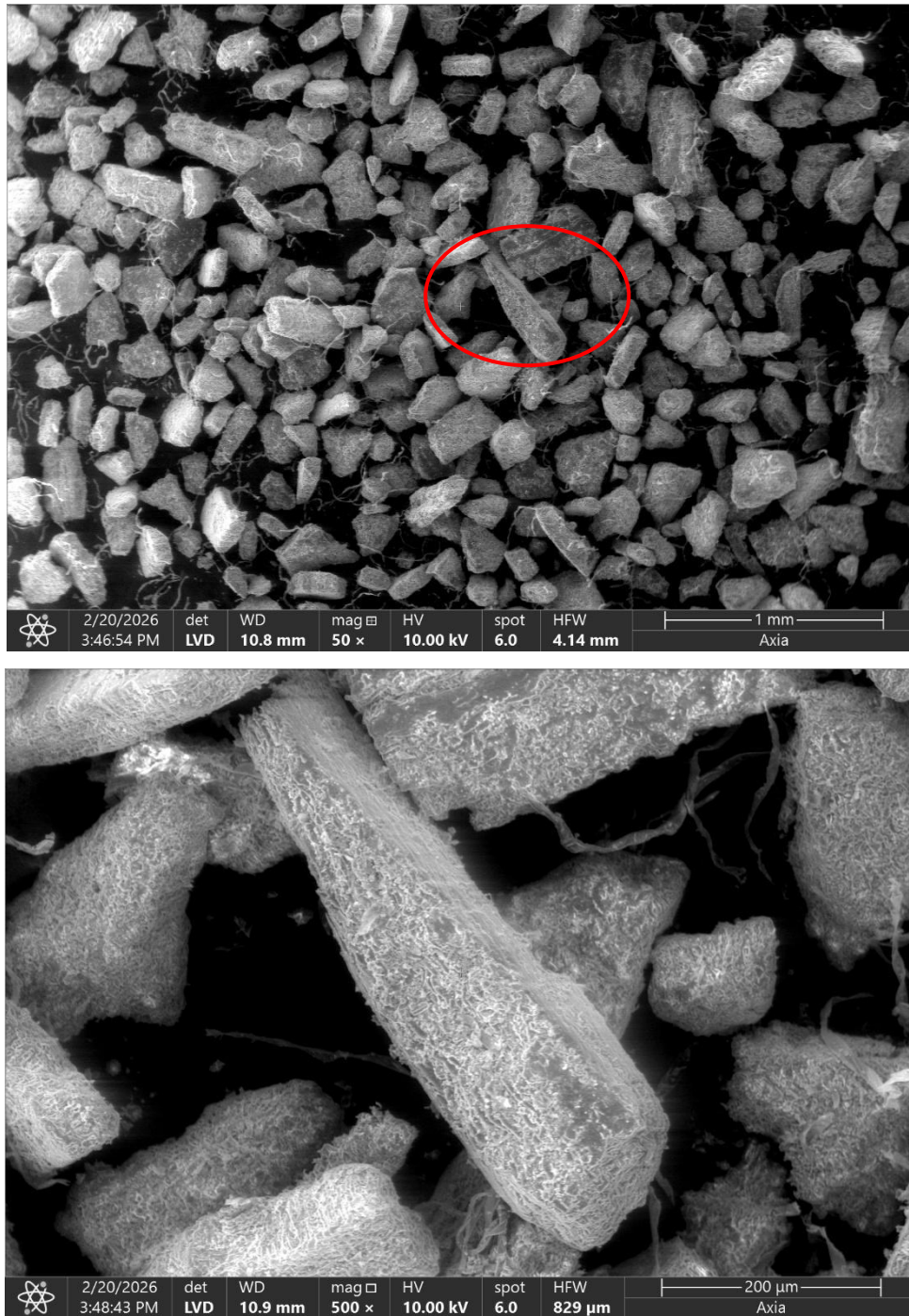


Figura 28. Micrografías de las partículas de HAD

4.4. Efecto de la cantidad de adsorbente en la adsorción de azul de metileno

4.4.1. Adsorbente: cáscaras de manzana disecadas

En primer lugar se obtuvieron los valores de absorbancia de los blancos de cáscaras de manzana disecadas. En el caso del blanco con 0,1 g de CMD se obtuvo una absorbancia promedio de 0,0176, mientras que para el blanco con 0,3 g de CMD se obtuvo una absorbancia promedio de 0,0670.

La tabla 6 contiene los resultados obtenidos para la adsorción de azul de metileno frente a diferentes dosis de CMD, donde \bar{A} es la absorbancia promedio la solución y $\bar{A} - \bar{A}_{\text{blanco}}$ es la absorbancia promedio que resulta al descontar la absorbancia del blanco. A las absorbancias de las soluciones de 0,025; 0,05 y 0,1 g de CMD se les descontó la absorbancia promedio del blanco de 0,1 g de CMD, a la solución de 0,2 g de CMD se le descontó una absorbancia de 0,0423 que resulta de una interpolación entre los valores de absorbancia de los blancos de 0,1 y 0,3 g de CMD, mientras que a la absorbancia de la mezcla con 0,3 g de CMD se le descontó el valor de absorbancia del blanco de 0,3 g de CMD.

La concentración de equilibrio C_e se calcula a partir de la ecuación de Lambert-Beer obtenida a través de la curva de calibración (ecuación 13). La cantidad de colorante adsorbida una vez alcanzado el equilibrio pasadas las 48 horas de reposo (ver sección 3.5), $q_{e \text{ experimental}}$, se calcula a partir de la ecuación 14.

$$q_{e \text{ experimental}} = \frac{(C_0 - C_e) V}{m} \quad (14)$$

Donde:

C_0 : concentración inicial de azul de metileno [ppm].

C_e : concentración de azul de metileno en el equilibrio de adsorción [ppm].

V : volumen de solución [L].

m : masa de adsorbente [g].

Tabla 6. Resultados experimentales de la adsorción de azul de metileno a diferentes cantidades de CMD

Dosis CMD [g]	\bar{A}	$\bar{A} - \bar{A}_{\text{blanco}}$	C_0 [ppm]	C_e [ppm]	$q_{e \text{ experimental}}$ [mg/g]	Porcentaje de remoción [%]
0,025	0,6567	0,6391	10	3,39	25,6	65,3
0,05	0,3129	0,2940		1,56	16,5	84,1
0,1	0,1430	0,1254		0,66	9,34	93,3
0,2	0,1173	0,0750		0,40	4,7	95,9
0,3	0,1334	0,0664		0,35	3,1	96,4

En la figura 29 se puede observar gráficamente la cantidad adsorbida en el equilibrio y el porcentaje de remoción en función de la cantidad de adsorbente.

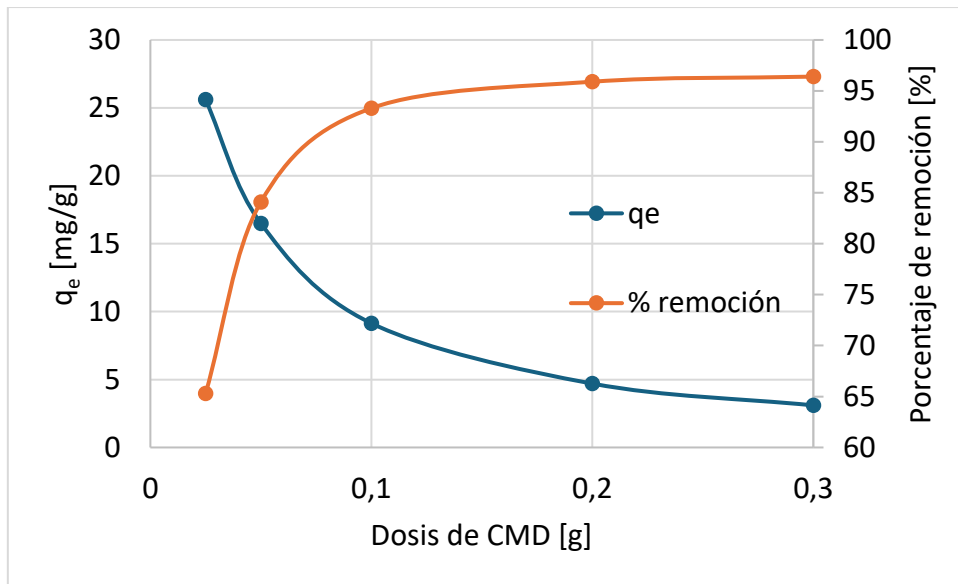


Figura 29. Adsorción de MB: q_e y porcentaje de remoción en función de la cantidad de CMD

Se observa que el porcentaje de remoción del colorante aumentó de 65,3% a 96,4% al aumentar la dosis de CMD. La cantidad adsorbida por gramo de CMD disminuyó al aumentar la cantidad de adsorbente. Según Salunke et al. (2020) la disminución de q_e frente al aumento de la masa de sustrato puede deberse al aumento de la cantidad de sitios activos vacantes para la adsorción.

En la figura 30 se pueden observar los resultados obtenidos por Enniya y Jourani (2017) para el estudio del efecto de la cantidad de CMD en la adsorción de azul de metileno a 20 °C. Se observa que el comportamiento es comparable a lo obtenido en nuestro estudio: el porcentaje de remoción aumenta desde aproximadamente 65% hasta alrededor de 92%, mientras que la cantidad adsorbida por gramo de CMD disminuye al aumentar la cantidad de adsorbente. La relación entre cantidad de adsorbente y volumen de solución fue la misma en ambos estudios.

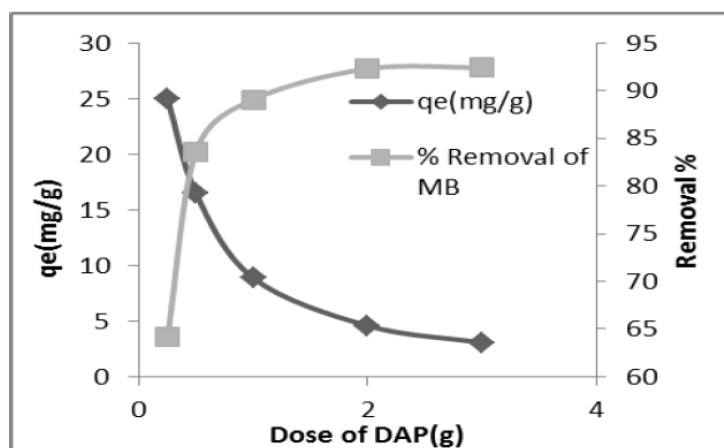


Figura 30. Adsorción de azul de metileno en función de la cantidad de CMD. Reproducida de Enniya y Jourani (2017)

4.4.2. Adsorbente: hojas de álamo disecadas

Se realizaron blancos de absorbancia de hojas de álamo disecadas (HAD). El blanco con 0,1 g de adsorbente tuvo una absorbancia promedio de 0,0635 mientras que para el caso de 0,3 g de sustrato la absorbancia promedio fue de 0,0986.

La tabla 7 contiene los resultados de la adsorción de azul de metileno a diferentes cantidades de HAD. A las absorbancias de las soluciones con 0,025; 0,05 y 1 g de adsorbente se les descontó la absorbancia del blanco de 0,1 g de HAD. A la mezcla con 0,2 g de HAD se le descontó una absorbancia de 0,0810 que resulta del promedio de la absorbancia de los blancos. En el caso de la absorbancia del experimento con 0,3 g de HAD se le descontó la absorbancia del blanco con 0,3 g de sustrato.

Tabla 7. Resultados experimentales de la adsorción de azul de metileno a diferentes cantidades de HAD

Dosis HAD [g]	\bar{A}	$\bar{A} - \bar{A}_{\text{blanco}}$	C_0 [ppm]	C_e [ppm]	q_e experimental [mg/g]	Porcentaje de remoción [%]
0,025	0,4564	0,3929	10	2,08	31,7	79,2
0,05	0,3136	0,2501		1,33	17,4	86,7
0,1	0,2560	0,1925		1,02	9,0	89,8
0,2	0,2734	0,1924		1,02	4,5	89,8
0,3	0,2781	0,1795		0,95	3,0	90,5

En la figura 31 se pueden observar gráficamente los resultados de la adsorción de azul de metileno en función de la cantidad de HAD.

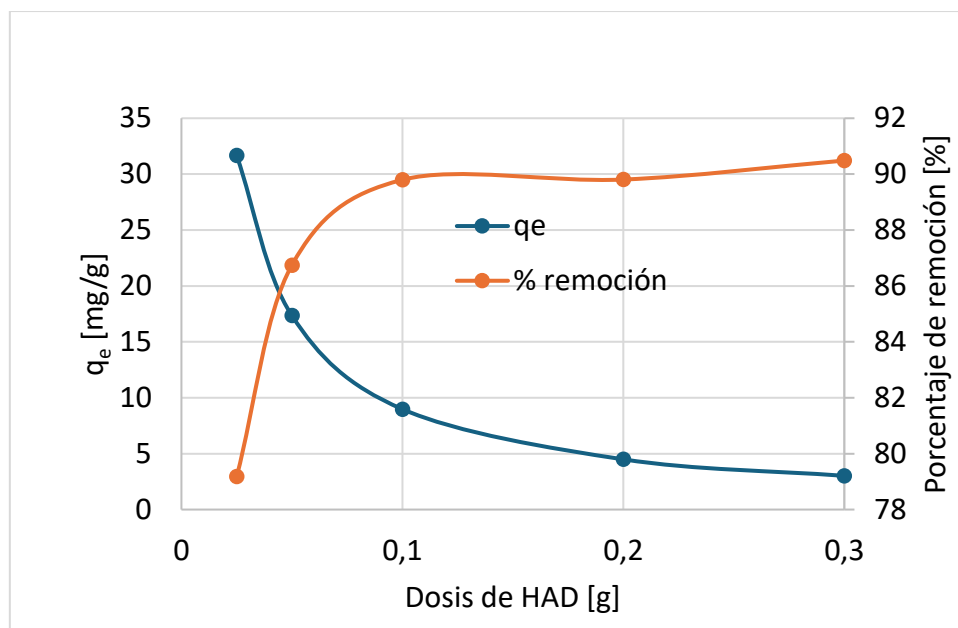


Figura 31. Adsorción de MB: q_e y porcentaje de remoción en función de la cantidad de HAD

Se observa que el porcentaje de remoción con 0,025 g de HAD fue de 79,2%, es decir, un 13,9% más alto que el porcentaje de remoción obtenido utilizando la misma cantidad de CMD. La remoción aumentó hasta un 90,5% cuando se utilizaron 0,3 g de HAD, un 5,9% más bajo al comparar el porcentaje de adsorción frente a la misma cantidad de CMD. La cantidad adsorbida por gramo de HAD disminuyó al aumentar la cantidad de adsorbente, lo cual se puede explicar, de nuevo, por el aumento de la cantidad de sitios activos vacantes para la adsorción (Salunke et al., 2020).

4.5. Cinética de adsorción

4.5.1. Resultados en CMD

La tabla 8 contiene los resultados experimentales de la adsorción de azul de metileno en CMD en función del tiempo. A cada medición de absorbancia se le restó la absorbancia del blanco con 0,1 g de CMD. Luego se calculó la cantidad de colorante adsorbida utilizando la ecuación 9. La cantidad adsorbida q_t se calculó utilizando la ecuación 14. En este caso se calculó la cantidad adsorbida a cada tiempo t (q_t) mientras que el último registro coincide con la cantidad adsorbida una vez alcanzado el equilibrio, q_e , una vez transcurridas las 48 horas de reposo.

Tabla 8. Adsorción de azul de metileno en CMD en el tiempo

t [min]	A	$\bar{A} - A_{\text{blanco}}$	q_t [mg/g]
16	1,4465	1,4289	2,43
25	1,3761	1,3585	2,80
36	1,3257	1,3081	3,07
46	1,2782	1,2606	3,32
56	1,2287	1,2111	3,58
66	1,1762	1,1586	3,86
76	1,1455	1,1279	4,02
86	1,1077	1,0901	4,22
96	1,0876	1,0700	4,33
106	1,0558	1,0382	4,50
116	1,0212	1,0036	4,68
126	0,9931	0,9755	4,83
136	0,9668	0,9492	4,97
166	0,9429	0,9253	5,10
196	0,8998	0,8822	5,32
226	0,8488	0,8312	5,60
256	0,8064	0,7888	5,82
286	0,8119	0,7943	5,79
316	0,7508	0,7332	6,11
346	0,7137	0,6961	6,31
406	0,6636	0,6460	6,58
456	0,5892	0,5716	6,97
1410	0,2540	0,2364	8,75
2880	0,1430	0,1254	9,34

La figura 32 permite apreciar gráficamente el aumento en la cantidad de colorante adsorbida con el transcurso del tiempo.

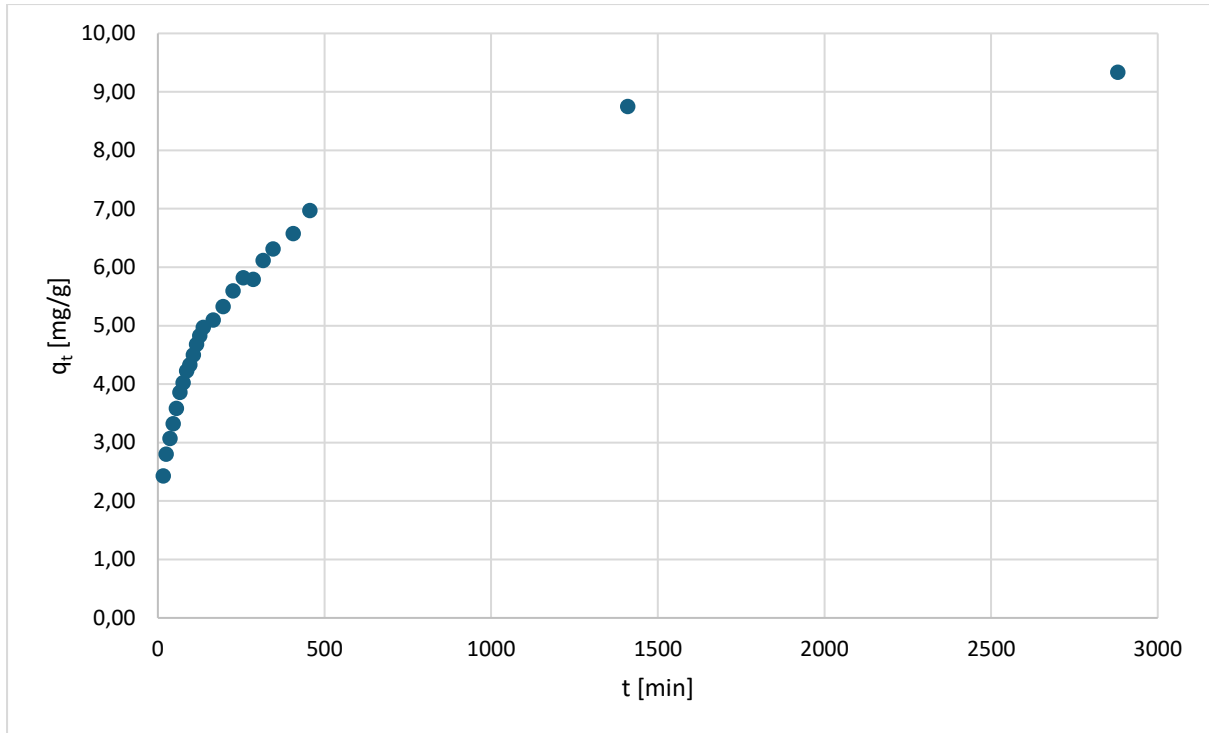


Figura 32. Adsorción de azul de metileno en CMD en función del tiempo

4.5.1.1. Modelo de pseudo primer orden

La figura 33 contiene los resultados obtenidos al aplicar el modelo de Lagergren (ver sección 3.6.1) a los datos de la tabla 8.

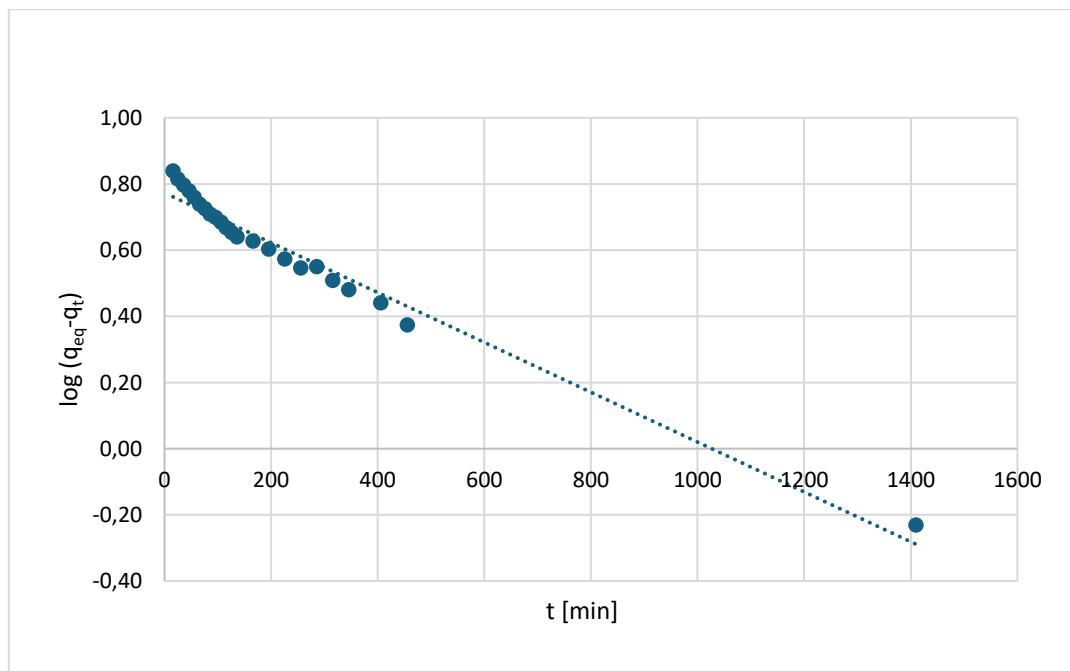


Figura 33. Modelo de Lagergren aplicado a la adsorción de azul de metileno en CMD

La regresión lineal de la figura 33 (ecuación 15) tuvo un valor de R^2 de 0,9726. A partir de su ecuación se obtuvieron los parámetros del modelo cinético (tabla 9).

$$\log (q_e - q_t) = 0,7733 - 0,0008 \text{ min}^{-1} t \quad (15)$$

4.5.1.2. Modelo de pseudo segundo orden

En la figura 34 se observa gráficamente el modelo de pseudo segundo orden (ecuación 12) aplicado a los datos de adsorción de la tabla 8.

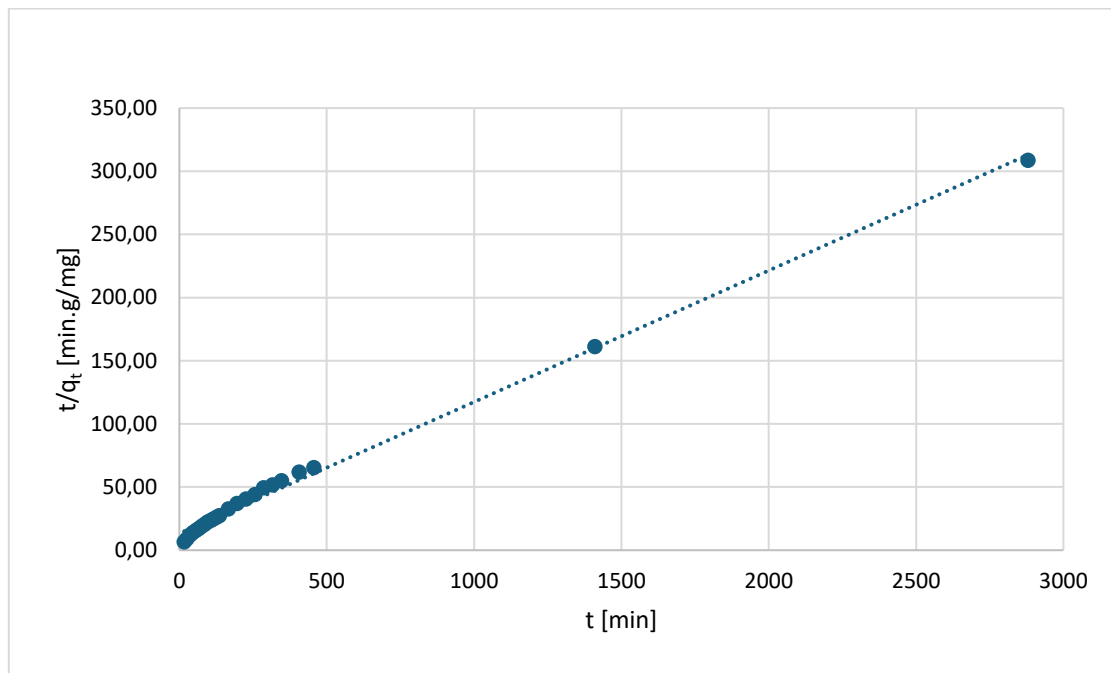


Figura 34. Modelo de pseudo segundo orden aplicado a la adsorción de azul de metileno en CMD

La regresión lineal de la figura 34 tuvo un R^2 de 0,9955. Los parámetros cinéticos se obtuvieron a partir de la ecuación 16.

$$\frac{t}{q_t} = 13,255 \frac{\text{min.g}}{\text{mg}} + 0,1041 \frac{\text{g}}{\text{mg}} t \quad (16)$$

La tabla 9 contiene los parámetros cinéticos para los modelos de pseudo primer y segundo orden para la adsorción de azul de metileno.

Tabla 9. Parámetros cinéticos de la adsorción de azul de metileno sobre CMD

C_0 [ppm]	q_e experimental [mg/g]	Pseudo 1° orden			Pseudo 2° orden		
		k_1 [min ⁻¹]	q_e calculado [mg/g]	R^2	k_2 [g/mg.min]	q_e calculado [mg/g]	R^2
10	9,34	0,0018	5,93	0,9726	0,00082	9,61	0,9955

A partir de los resultados obtenidos se puede observar que el modelo de pseudo segundo orden ajusta los datos de adsorción de manera más certera que el modelo de primer orden al observar los respectivos valores de R^2 . Además, la cantidad adsorbida en el equilibrio calculada bajo el modelo de segundo orden concuerda con el valor obtenido experimentalmente, no así con el modelo de Lagergren.

4.5.2. Resultados en HAD

La tabla 10 contiene los resultados de la adsorción de azul de metileno sobre HAD en el tiempo. A cada medición de absorbancia se le restó el blanco con 0,1 g de HAD. De igual manera que para la adsorción sobre CMD, la cantidad adsorbida q_t se calculó utilizando la ecuación 14. El último valor de la serie corresponde a la cantidad adsorbida q_e transcurridas las 48 horas de reposo del sistema.

Tabla 10. Adsorción de azul de metileno en HAD en el tiempo

t [min]	A	$\bar{A} - A_{\text{blanco}}$	q_t [mg/g]
0	1,1292	1,0657	4,35
10	1,0544	0,9909	4,75
20	1,0452	0,9817	4,80
30	1,0157	0,9522	4,95
40	0,9808	0,9173	5,14
50	0,9802	0,9167	5,14
60	0,9468	0,8833	5,32
70	0,9278	0,8643	5,42
80	0,9161	0,8526	5,48
90	0,9026	0,8391	5,55
100	0,8823	0,8188	5,66
110	0,8599	0,7964	5,78
120	0,8334	0,7699	5,92
150	0,8012	0,7377	6,09
180	0,7733	0,7098	6,24
214	0,7549	0,6914	6,34
244	0,7283	0,6648	6,48
2880	0,2754	0,2119	8,88

Se puede observar gráficamente el aumento de la cantidad de colorante adsorbida en función del tiempo en la figura 35.

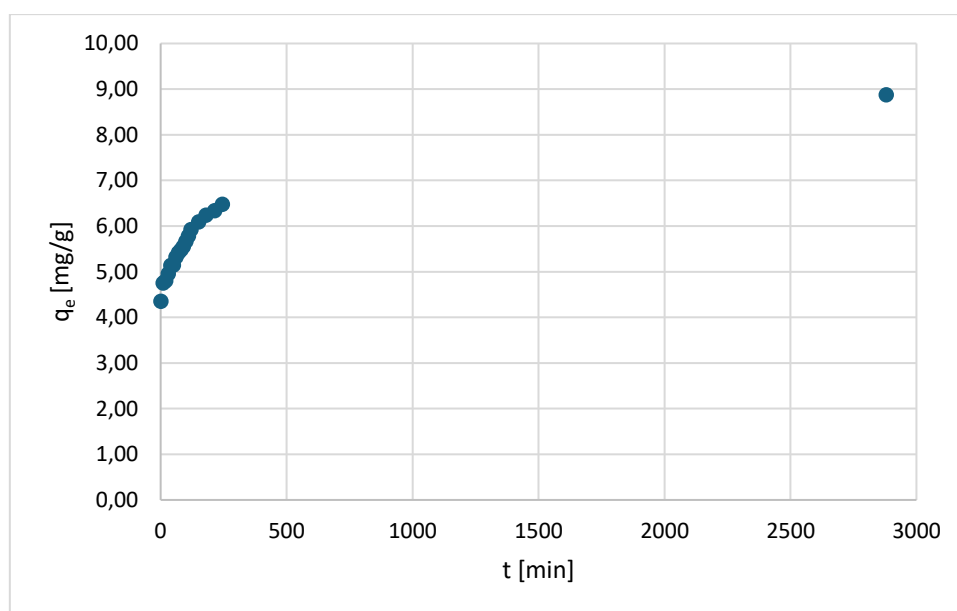


Figura 35. Adsorción de azul de metileno en HAD en función del tiempo

4.5.2.1. Modelo de pseudo primer orden

Aplicando el modelo de pseudo primer orden (ecuación 10) a los datos de la tabla 10 se obtuvo el ajuste representado en la figura 36.

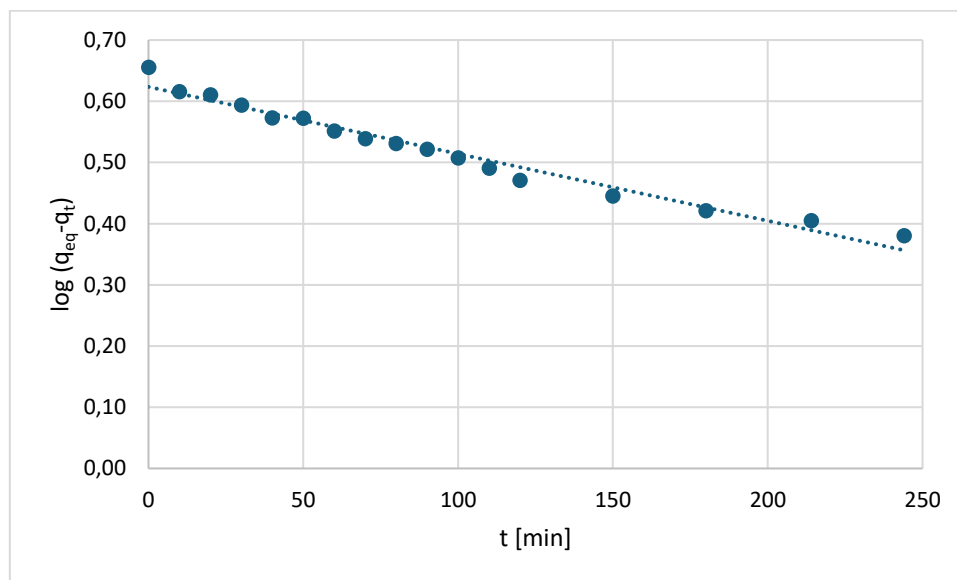


Figura 36. Modelo de Lagergren aplicado a la adsorción de azul de metileno en HAD

La regresión lineal de la figura 36 tuvo un R^2 de 0,9696. La ecuación 17 representa la tendencia observada en la figura.

$$\log (q_e - q_t) = 0,6235 - 0,0011 \text{ min}^{-1} t \quad (17)$$

Los parámetros cinéticos para el modelo de primer orden aplicado a la adsorción sobre HAD se encuentran en la tabla 11.

4.5.2.2. Modelo de pseudo segundo orden

Al aplicar el modelo de pseudo segundo orden (ecuación 12) se obtuvo el ajuste representado en la figura 37.

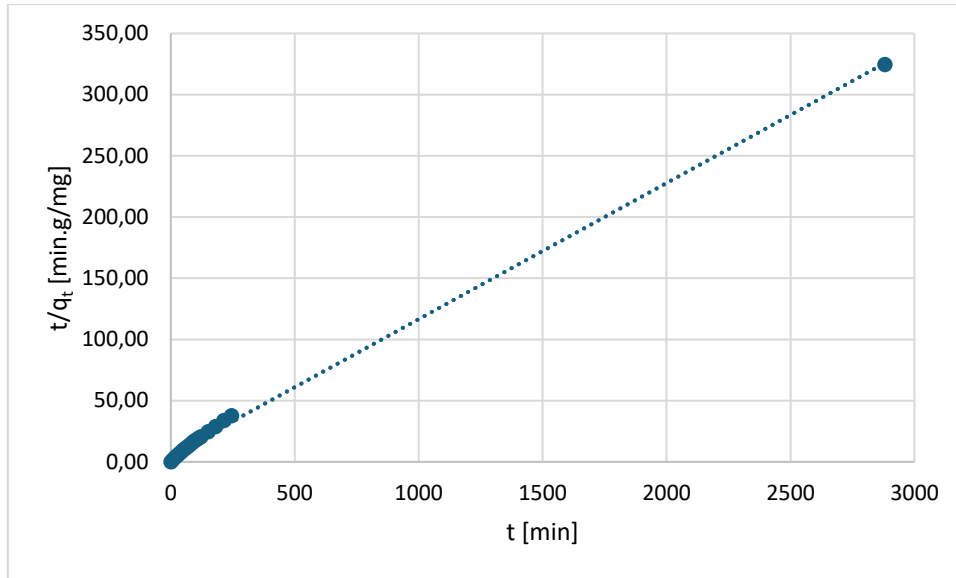


Figura 37. Modelo de pseudo segundo orden aplicado a la adsorción de azul de metileno en HAD

La ecuación 18 representa la regresión lineal de la figura 37. El valor de R^2 de la misma fue de 0,9984.

$$\frac{t}{q_t} = 5,3632 \frac{\text{min.g}}{\text{mg}} + 0,1112 \frac{\text{g}}{\text{mg}} t \quad (18)$$

Los parámetros cinéticos del modelo de pseudo segundo orden de adsorción de azul de metileno sobre HAD se encuentran en la tabla 11.

Tabla 11. Parámetros cinéticos de la adsorción de azul de metileno sobre HAD

C_0 [ppm]	q_e experimental [mg/g]	Pseudo 1° orden			Pseudo 2° orden		
		k_1 [min^{-1}]	q_e calculado [mg/g]	R^2	k_2 [g/mg.min]	q_e calculado [mg/g]	R^2
10	8,88	0,0025	4,20	0,9696	0,0023	8,99	0,9984

Al igual que con los resultados para la adsorción sobre CMD, los datos de adsorción sobre HAD muestran un mejor ajuste al utilizar el modelo de pseudo segundo orden, evidenciado no solo por un mayor valor de R^2 sino también por la correspondencia entre el valor de q_e calculado a partir del modelo y el valor obtenido experimentalmente.

Al comparar los resultados sobre ambos adsorbentes se puede concluir que la adsorción sobre CMD permite remover más cantidad del colorante cuando se llega al equilibrio: la

cantidad de colorante adsorbida q sobre CMD a las 48 horas fue de 9,34 mg/g, mientras que para la adsorción sobre HAD fue de 8,88 mg/g.

4.6. Isotermas de adsorción

4.6.1. Resultados en CMD

La tabla 12 contiene los resultados obtenidos para la adsorción de azul de metileno sobre CMD a diferentes concentraciones de colorante.

Tabla 12. Adsorción de azul de metileno sobre CMD a diferentes concentraciones de colorante

C_0 [ppm]	\bar{A}	$\bar{A} - \bar{A}_{\text{blanco}}$	C_e [ppm]	q_e [mg/g]
5	0,0730	0,0554	0,29	4,71
10	0,1353	0,1177	0,62	9,38
14	0,2213	0,2037	1,08	12,92
50	0,3648	0,3472	9,20	40,80
100	0,7730	0,7554	20,02	79,98
300	1,2909	1,2733	224,92	75,08

4.6.1.1. Isotherma de Langmuir

La forma linealizada de la isoterma de Langmuir (figura 38) se construyó a partir de los datos de la tabla 12 y aplicando la ecuación 3.

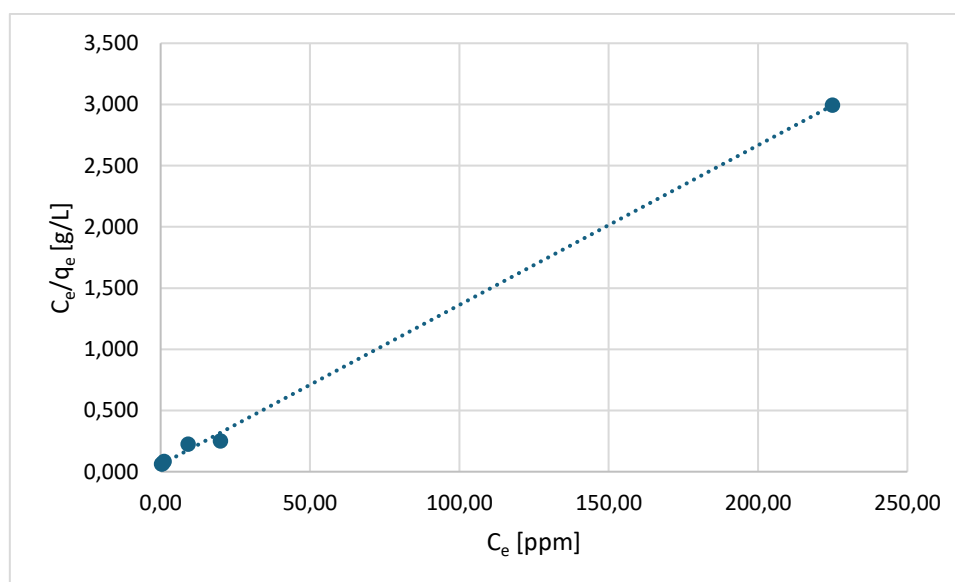


Figura 38. Forma linealizada de la isoterma de Langmuir para la adsorción de azul de metileno sobre CMD

La regresión lineal de la figura 38 (ecuación 19) tuvo un R^2 de 0,999. A partir de ella se calcularon los parámetros característicos de la isoterma (tabla 13).

$$\frac{C_e}{q_e} = 0,057 \frac{g}{L} + 0,013 \frac{g}{mg} C_e \quad (19)$$

4.6.1.2. Isotherma de Freundlich

Al aplicar la ecuación 5 sobre los datos de la tabla 12 se obtuvo la forma linealizada de la isoterma de Freundlich representada gráficamente en la figura 39.

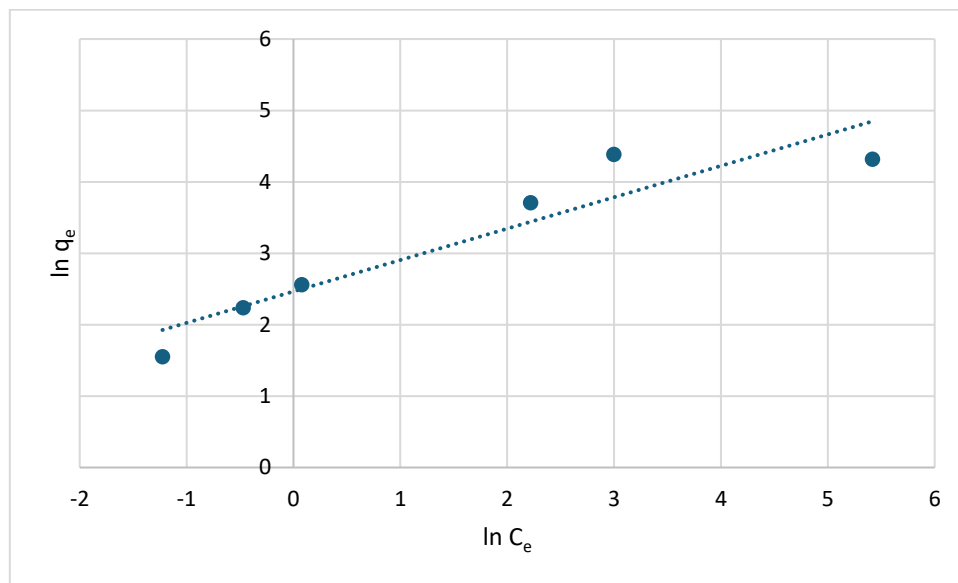


Figura 39. Forma linealizada de la isoterma de Freundlich para la adsorción de azul de metileno sobre CMD

La regresión lineal de la figura 39 (ecuación 20) tuvo un R^2 de 0,8766 y permitió obtener los parámetros de la isoterma de Freundlich (tabla 13).

$$\ln q_e = 2,4654 + 0,4398 \ln C_e \quad (20)$$

4.6.1.3. Isotherma de Temkin

A partir de los datos de la tabla 12 se obtuvo la forma linealizada de la isoterma de Temkin representada gráficamente en la figura 40.

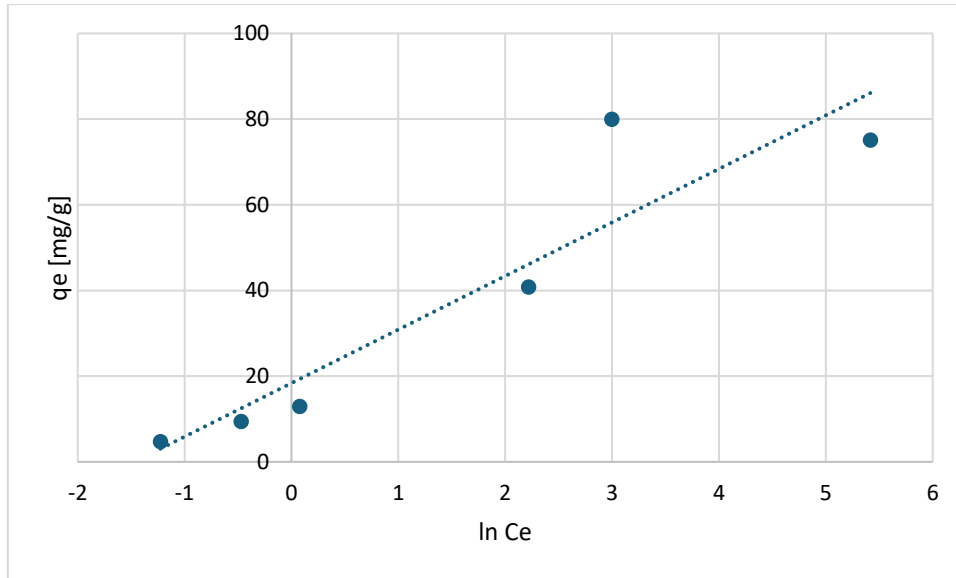


Figura 40. Forma linealizada de la isoterma de Temkin para la adsorción de azul de metileno sobre CMD

La regresión lineal de la figura 40 (ecuación 21) tuvo un R^2 de 0,8621. A partir de ella se calcularon los parámetros característicos de la isoterma (tabla 13).

$$q_e = 18,372 \frac{mg}{g} + 12,5 \frac{mg}{g} \ln C_e \quad (21)$$

4.6.1.4. Parámetros de las isotermas

A partir de las regresiones lineales se obtuvieron los parámetros de las isotermas empleadas para el estudio de la adsorción de azul de metileno 10 ppm sobre CMD a 20 °C (tabla 13).

Tabla 13. Parámetros de las isotermas de Langmuir, Freundlich y Temkin para la adsorción de azul de metileno sobre CMD (20 °C)

Langmuir			Freundlich			Temkin	
q_{max} [mg/g]	K_L [L/mg]	R^2	n	K_F [L/g]	R^2	K_T [g/mg]	R^2
76,92	0,23	0,999	2,27	11,77	0,8766	4,36	0,8621

A partir de los parámetros de la tabla 13 se puede observar que la isoterma de Langmuir no solo es la que mejor ajusta los datos de adsorción sino que además proporciona un valor de q_{max} que se corresponde con los resultados obtenidos experimentalmente: la máxima cantidad adsorbida fue de 75,08 mg/g a partir de la solución de 300 ppm del colorante sobre 0,1 g de

CMD. Esto permite suponer que la sustancia se adsorbe sobre la superficie de CMD formando una monocapa.

4.6.2. Resultados en HAD

La tabla 14 contiene los resultados de la adsorción de azul de metileno sobre HAD a 20 °C.

Tabla 14. Adsorción de azul de metileno sobre HAD a diferentes concentraciones de colorante

C_0 [ppm]	\bar{A}	$\bar{A} - \bar{A}_{\text{blanco}}$	C_e [ppm]	q_e [mg/g]
5	0,2267	0,1632	0,86	4,14
10	0,2754	0,2119	1,12	8,88
50	0,5348	0,4713	12,49	37,51
100	0,5670	0,5035	26,68	73,32
300	0,8220	0,7585	160,78	139,22

4.6.2.1. Isotherma de Langmuir

La forma linealizada de la isoterma de Langmuir (figura 41) se construyó a partir de los datos de la tabla 14 y aplicando la ecuación 3.

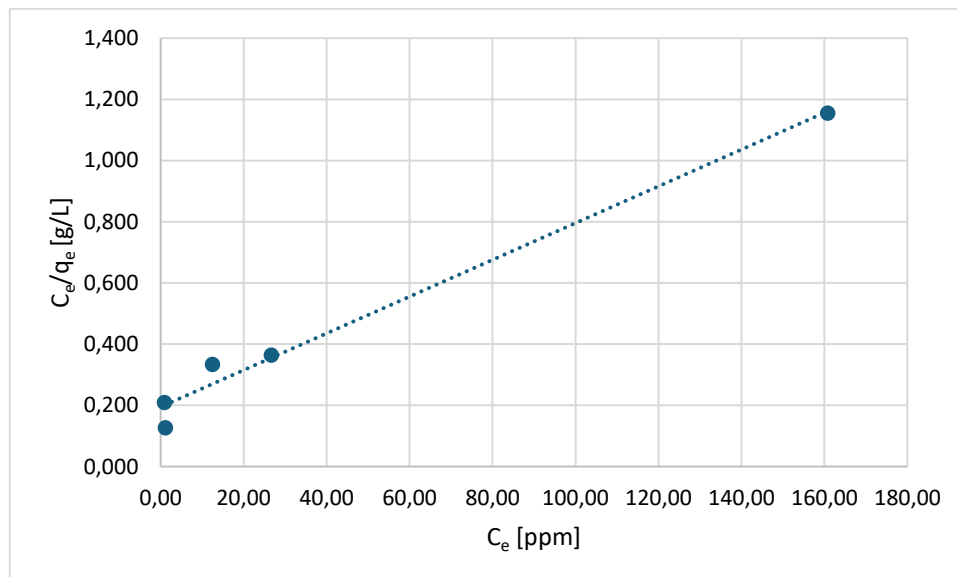


Figura 41. Forma linealizada de la isoterma de Langmuir para la adsorción de azul de metileno sobre HAD

La regresión lineal de la figura 41 tuvo un R^2 de 0,9856 y se representa a partir de la ecuación 22. A partir de esta regresión se obtuvieron los parámetros de Langmuir (tabla 15).

$$\frac{C_e}{q_e} = 0,1948 \frac{g}{L} + 0,06 \frac{g}{mg} C_e \quad (22)$$

4.6.2.2. Isoterma de Freundlich

En la figura 42 se encuentra representada la forma linealizada de la isoterma de Freundlich obtenida al aplicar la ecuación 5 sobre los datos de la tabla 14.

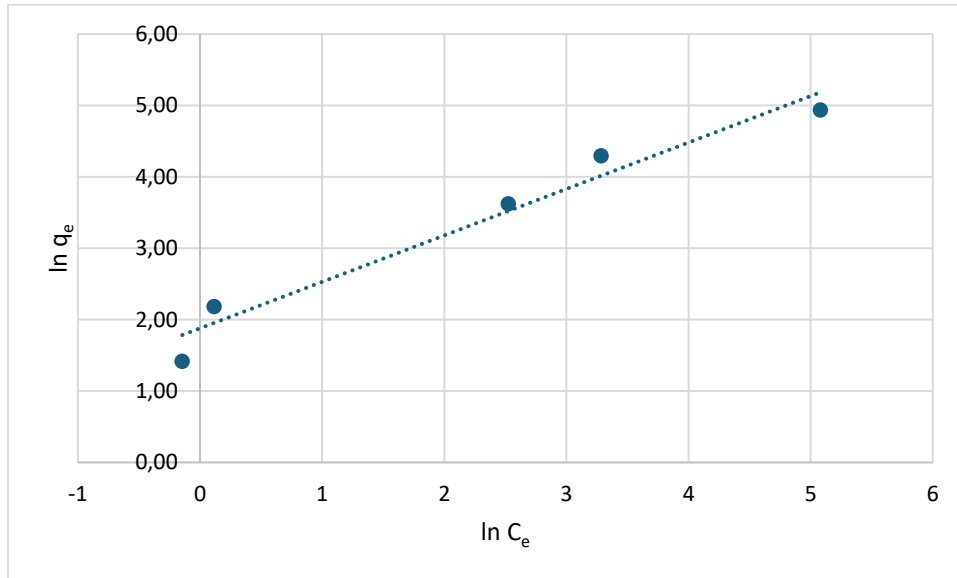


Figura 42. Forma linealizada de la isoterma de Freundlich para la adsorción de azul de metileno sobre HAD

La regresión lineal de la figura 42 arrojó un R^2 de 0,9607 y se representa a partir de la ecuación 23. A partir de ella se obtuvieron los parámetros de la isoterma de Freundlich (tabla 15).

$$\ln q_e = 1,8786 + 0,6506 \ln C_e \quad (23)$$

4.6.2.3. Isoterma de Temkin

La forma linealizada de la isoterma de Temkin se halla representada en la figura 43.

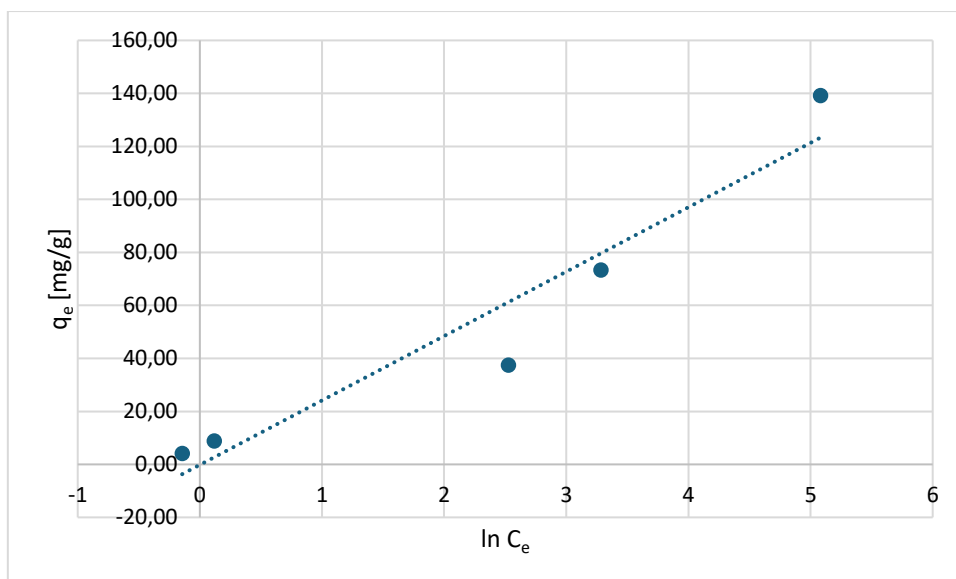


Figura 43. Forma linealizada de la isoterma de Temkin para la adsorción de azul de metileno sobre HAD

La regresión lineal de la figura 43 (ecuación 24) tuvo un R^2 de 0,9232. A partir de ella se calcularon los parámetros característicos de la isoterma (tabla 15).

$$q_e = -0,1691 \frac{mg}{g} + 24,301 \frac{mg}{g} \ln C_e \quad (24)$$

4.6.2.4. Parámetros de las isotermas

A partir de las regresiones lineales se obtuvieron los parámetros de las isotermas empleadas para el estudio de la adsorción de azul de metileno 10 ppm sobre HAD a 20 °C (tabla 15).

Tabla 15. Parámetros de las isotermas de Langmuir, Freundlich y Temkin para la adsorción de azul de metileno sobre HAD (20 °C)

Langmuir			Freundlich			Temkin	
q _{max} [mg/g]	K _L [L/mg]	R ²	n	K _F [L/g]	R ²	K _T [g/mg]	R ²
166,7	0,03	0,9856	1,54	6,54	0,9607	1,0	0,9232

Nuevamente, se observa que la isoterma de Langmuir es aquella que logra ajustar los datos de manera más certera, arrojando además un valor de q_{max} coherente con la cantidad máxima adsorbida experimentalmente: 139,2 mg/g para el experimento con azul de metileno 300 ppm sobre 0,1 g de HAD. Por esto, es posible inferir que la adsorción del colorante sobre el sustrato se da en forma de monocapa.

A modo de referencia, la tabla 16 contiene valores de q_{\max} obtenidos a partir de la adsorción de azul de metileno sobre otros adsorbentes de bajo costo.

Tabla 16. Comparación de la capacidad de adsorción de CMD y HAD con otros adsorbentes de bajo costo

Adsorbente	q_{\max} [mg/g]	Referencias
Cáscaras de banana activadas	19,7	Khalifaoui et al. (2012)
Cáscaras de banana al natural	18,6	Khalifaoui et al. (2012)
Cáscaras de pomelo	133	Hou (2013)
Cáscaras de papas	33,5	Oktem et al. (2012)
Residuos de té	85,2	Uddin et al. (2008)
Cáscaras de manzana disecadas	76,9	Este estudio
Hojas de álamo disecadas	166,7	Este estudio

Nota. Adaptada de Enniya y Jourani (2017)

4.7. Efecto del pH

Las tablas 17 y 18 contienen los resultados obtenidos para la adsorción de azul de metileno sobre CMD y HAD respectivamente.

Tabla 17. Adsorción de azul de metileno sobre CMD a diferentes valores de pH

pH	A	$A - \bar{A}_{\text{blanco}}$	C_e [ppm]	q_e [mg/g]
2,5	1,2723	1,2547	6,65	3,35
7,0	0,1430	0,1254	0,66	9,14
10,7	0,2618	0,2442	1,29	8,71

Tabla 18. Adsorción de azul de metileno sobre HAD a diferentes valores de pH

pH	A	$A - \bar{A}_{\text{blanco}}$	C_e [ppm]	q_e [mg/g]
2,5	1,1121	1,0486	5,56	4,44
7,0	0,2560	0,1925	1,02	8,98
10,7	0,1995	0,1360	0,72	9,28

En la figura 44 se representa gráficamente q_e en función del pH para la adsorción de azul de metileno sobre ambos adsorbentes.

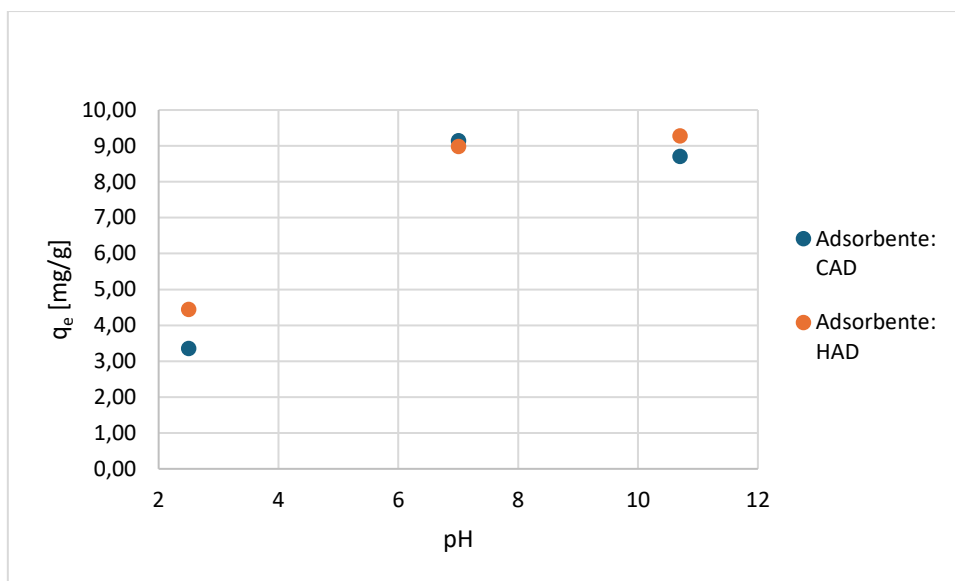


Figura 44. Adsorción de azul de metileno sobre CMD y HAD a diferentes valores de pH

Se observa que los valores más altos de adsorción se obtuvieron, para ambos adsorbentes, a pH neutro y básico. Un marcado descenso en la adsorción se produjo a pH ácido. Según Enniya y Jourani (2017), la adsorción de azul de metileno se produce principalmente sobre grupos -OH, C-O, C-O-C y C=O del sustrato. Esto influye directamente en la adsorción a diferentes pH: el azul de metileno es un colorante catiónico, por lo tanto, su adsorción sobre CMD se verá favorecida a valores de pH por encima del pH de carga cero del adsorbente. Los autores indican que, para CMD, este valor es de 5,8. Por lo tanto, por encima de un pH de 5,8 la superficie del adsorbente tendrá carga negativa, lo cual favorece la adsorción del colorante. Por el contrario, a pH por debajo de 5,8, el sólido tendrá carga positiva sobre su superficie, por lo que la adsorción de azul de metileno a pH ácido se ve mitigada. Un comportamiento análogo se observa en la adsorción del colorante sobre HAD, aunque no se encontraron reportes científicos acerca de las características de superficie de este adsorbente natural que expliquen el fenómeno.

Este efecto del pH en la adsorción del colorante se puede observar, también, en los resultados obtenidos por Enniya y Jourani (2017) en la figura 45.

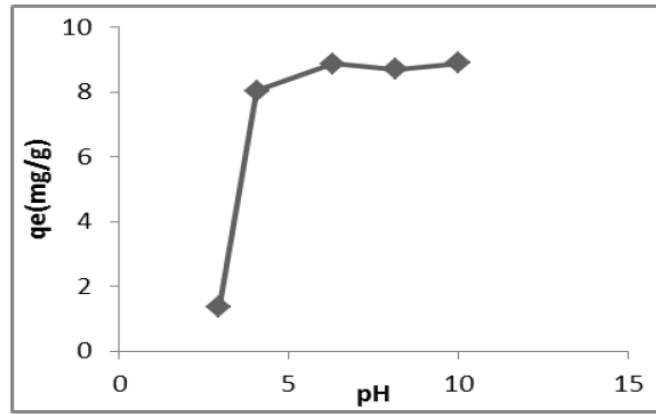


Figura 45. Adsorción de azul de metileno sobre CMD a diferentes valores de pH. Reproducida de Enniya y Jourani (2017)

Capítulo 5

Conclusiones

5. Conclusiones

Se estudió la adsorción de azul de metileno sobre CMD y HAD. Los experimentos se realizaron a una temperatura aproximada de 20 °C y se estudió el proceso de adsorción frente a diferentes cantidades de adsorbente y frente a diferentes valores de pH. Se evaluó la cinética del proceso y se construyeron las isothermas de Langmuir, Freundlich y Temkin.

La adsorción del colorante sobre CMD y HAD aumenta al aumentar la cantidad de sustrato hasta 0,3 g. Las CMD mostraron alcanzar un mayor porcentaje de remoción del colorante en solución acuosa al comparar con los resultados sobre HAD.

Tanto para la adsorción sobre CMD como sobre HAD, el proceso se ajusta satisfactoriamente a una cinética de segundo orden, lo cual coincide con lo reportado en trabajos científicos.

El modelo de Langmuir proporciona un buen ajuste de los datos a temperatura constante para la adsorción del colorante sobre CMD y HAD, por lo que se puede inferir que la adsorción se da en monocapas sobre el sustrato.

A pH ácido ambos adsorbentes muestran una disminución en la capacidad de adsorción del colorante. A pH neutro y básico el proceso se vio notablemente favorecido al evidenciarse el aumento en la cantidad de colorante adsorbida.

Ambos adsorbentes mostraron resultados positivos al evaluar su capacidad de adsorción de azul de metileno en solución acuosa. El bajo costo de producción de estos bioadsorbentes y la presencia de ambos materiales en la región significan una alternativa viable en el uso como adsorbentes naturales.

Capítulo 6

Propuesta didáctica

6.1. Educación STEM

La propuesta metodológica orientada a un espacio áulico se trabajó a partir del enfoque STEM, del acrónimo en inglés Ciencia (Science), Tecnología (Technology), Ingeniería (Engineering) y Matemáticas (Mathematics), un enfoque pedagógico que busca formar ciudadanos capaces de pensar, reflexionar e involucrarse en temas complejos de interés actual para la sociedad como, por ejemplo, la contaminación ambiental, a través de la innovación. El enfoque STEM busca mejorar las conexiones entre disciplinas a través de la innovación para resolver problemas contextuales complejos (Kelley & Knowles, 2016; Kennedy & Odell, 2023). A su vez, desde este enfoque se concibe a la educación científica y tecnológica actual de modo interdisciplinar con el propósito de fortalecer el vínculo entre la ciencia, la creatividad, el emprendimiento y la innovación (Bryan et al., 2015; English, 2016; Kennedy & Odell, 2014; UNESCO, 2019). Al remover las barreras tradicionales entre las cuatro disciplinas que componen STEM se genera una integración cohesiva de saberes en los procesos de enseñanza y aprendizaje (Kennedy & Odell, 2014; Honey et al., 2014). Otras variantes de STEM incorporan también una dimensión artística en el proceso de enseñanza y aprendizaje que abarca las capacidades creativas y de diseño de los estudiantes, dando lugar a la variación STEAM (Kim & Chae, 2016; Madden et al., 2013; Yakman, 2008; Yakman & Lee 2012).

La implementación de STEM en la enseñanza busca comprometer a los estudiantes en su proceso de aprendizaje (Kennedy & Odell, 2014; Bybee, 2013). Para ello se deben promover estrategias de enseñanza que motiven a los estudiantes en la investigación y la innovación (National Research Council, 2012; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019), por ejemplo, en la aplicación de conocimientos en ciencias para resolver un problema y en la producción y uso de tecnologías para la búsqueda de soluciones (Kelley & Knowles, 2016).

Algunas de las características principales de un programa o propuesta de educación STEM son la integración de tecnología e ingeniería en currículos de ciencias, la promoción del diseño, la innovación y la búsqueda de soluciones a problemas de interés científico vinculados a la vida cotidiana (National Research Council, 2012; Moore et al., 2014; Roehrig et al., 2021; Sanders, 2009), el desarrollo de materiales que permitan dar solución a una problemática a través de experiencias prácticas que promuevan estrategias de pensamiento y aprendizaje colaborativo (Vasquez et al., 2013; Krajcik & Blumenfeld, 2006), y la comunicación o divulgación de lo desarrollado por los estudiantes.

Este tipo de integración de conceptos que propone la educación STEM puede llevarse a cabo a través de diversas metodologías (figura 46), siendo una de ellas el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) (Kennedy & Odell, 2014).



Figura 46. Estrategias didácticas para implementar la enseñanza STEAM. Nota. Reproducida de *Introducción a la enseñanza de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas – STEM [material del curso de posgrado]*, por A. B. Prieto, 2025, *Maestría en Enseñanza de Ciencias Exactas y Naturales, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue*.

6.2. Estrategias de enseñanza STEM: aprendizaje basado en proyectos

Según Zambrano Briones et al. (2022), el Aprendizaje Basado en Proyectos es una estrategia didáctica activa que permite llevar contenidos teóricos a la práctica, dándole lugar al estudiante para implicarse en procesos de investigación de manera autónoma, sin reducir su proceso de aprendizaje a la escucha en forma pasiva. Se trata de un enfoque que busca explorar problemas y desafíos del mundo real (Bell, 2010) desarrollando, al mismo tiempo, habilidades interdisciplinarias trabajando en pequeños grupos colaborativos (Blumenfeld et al., 1991; Barron et al., 1998; Markula & Aksela, 2022). El empleo de esta metodología de enseñanza fortalece el trabajo en equipo, la comunicación (Kokotsaki et al., 2016), el aprendizaje

autónomo, el pensamiento crítico, la habilidad para investigar y solucionar problemas (Guo et al., 2020), entre otras aptitudes.

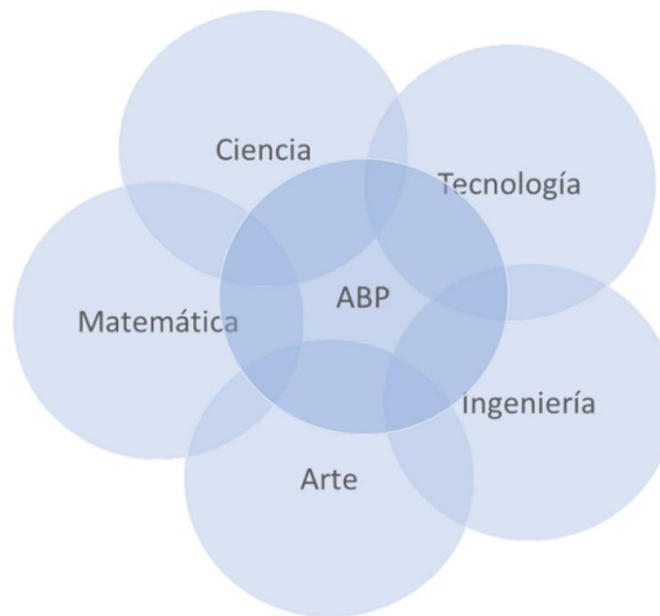


Figura 47. Enseñanza STEAM a través de la estrategia ABP (Aprendizaje Basado en Proyectos) Nota. Reproducida de Introducción a la enseñanza de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas – STEM [material del curso de posgrado], por A. B. Prieto, 2025, Maestría en Enseñanza de Ciencias Exactas y Naturales, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue.

Los diseños basados en ABP incluyen una serie de etapas como la conceptualización del fenómeno de estudio, el diseño y testeo de prototipos, la socialización y la divulgación de los resultados, todo ello aplicando los pasos del método científico a través de la realización de un proyecto de investigación científica (Fundación Telefónica, s. f.). En función de estas etapas, el proyecto educativo debe contener los siguientes elementos:

- Definición del problema o pregunta a trabajar: se debe abordar una problemática que genere interés en los estudiantes con un nivel de dificultad suficiente para abordarlo desde los contenidos escolares enmarcado en un problema a resolver o pregunta a contestar. Las preguntas que se planteen en torno al fenómeno deben estar abiertas a la construcción de múltiples respuestas, con la posibilidad de ser guiadas a aspectos específicos de la problemática que se desee estudiar.
- Conocimientos y saberes: el proyecto debe contener los conceptos a enseñar siguiendo las normativas escolares e institucionales. Asimismo, se debe incluir el desarrollo de

habilidades como el pensamiento crítico, la resolución de problemas, la comunicación y el trabajo colaborativo.

- Investigación sostenida y autenticidad: el proyecto debe involucrar a los estudiantes en el proceso de formulación de preguntas y en la búsqueda de recursos para construir posibles respuestas.

- Reflexión y comunicación: tanto los estudiantes como los profesores deben reflexionar sobre lo aprendido en el proyecto y reflexionar críticamente acerca de la calidad del trabajo, los objetivos alcanzados, los obstáculos atravesados y las soluciones a las que se llegaron. A su vez, el trabajo de investigación o el producto diseñado debe hacerse público a través de la divulgación del proyecto. Este es un punto clave en la implementación de la estrategia ya que es la instancia en la que se desarrollan las habilidades comunicativas de los estudiantes al compartir con distintas audiencias los resultados y, fundamentalmente, al hacer uso del lenguaje técnico de las disciplinas involucradas.



Figura 48. Pasos para planificar un ABP. Nota. Reproducido de “El aprendizaje basado en proyectos”, en *Viaje a la escuela del siglo XXI: Así trabajan los colegios más innovadores del mundo* (p. 91), por A. Hernando Calvo, 2015, Fundación Telefónica.

Una característica importante del ABP es la producción de un producto final por parte de los estudiantes, orientado a la obtención de resultados y a la valoración crítica de otras personas (Zambrano Briones et al., 2022). El producto final puede ir desde el diseño de dispositivos que den solución al problema en estudio, hasta la producción de material de divulgación como, por ejemplo, un póster.

Según Hernández y Jiménez (2019), el Aprendizaje Basado en Problemas (ABP) constituye una estrategia eficaz para promover la formación educativa ambiental ya que permite abordar problemáticas reales del entorno, motivando al estudiante a investigar, reflexionar críticamente y comprometerse en el desarrollo de soluciones ambientales. El estudio de problemas socioambientales relevantes para la sociedad entra dentro de la categoría general de problemas socio-científicos. Estos sirven como motivación para trabajar la argumentación, el pensamiento crítico, la formulación de preguntas y posibles respuestas al mismo tiempo que intervienen aspectos morales en el aprendizaje de las ciencias (Ramos & Ruz, 2010). A través de la indagación, la investigación, el uso de conceptos fisicoquímicos y de herramientas digitales de fácil acceso, se promueve un aprendizaje integral que posicionan al estudiante desde un lugar de acción.

Una propuesta didáctica basada en el enfoque STEM y aplicada a través de la metodología de ABP contribuye a la formación de ciudadanos que sean capaces de pensar su entorno, identificar problemas y plantear posibles soluciones a ellos utilizando, de forma integral, los conocimientos disciplinares, procedimentales y actitudinales que se buscan promover. De ello se trata la alfabetización científica: una educación en ciencias que sea relevante para la vida cotidiana, en sociedad, que promueva la participación democrática y la toma de decisiones fundamentada (Acevedo-Díaz, 2004).

En particular, desde el estudio del azul de metileno como contaminante ambiental, los estudiantes pueden relacionar conceptos teóricos de la química con problemáticas ambientales actuales: la contaminación de aguas superficiales por colorantes (Pamenang, Wibowo & Marlinda, 2024).

6.3. Perspectiva ambiental

La propuesta se diseñó bajo la perspectiva ambiental del diseño curricular de la Provincia del Neuquén (Ministerio de Educación de la Provincia del Neuquén, 2018), que promueve la valoración del ambiente como bien común y el desarrollo de prácticas escolares orientadas al cuidado de los recursos naturales. Asimismo, se incorpora la perspectiva de

derechos humanos, reconociendo al agua potable como un derecho humano esencial y abordando la necesidad de garantizar su acceso y preservación como parte de la formación ciudadana integral.

6.4. Grupo clase objetivo de la propuesta

La propuesta didáctica está dirigida a estudiantes de tercer año de la asignatura Química del Enlace Pedagógico Interciclo según el nuevo diseño curricular de la Provincia del Neuquén (Ministerio de Educación de la Provincia del Neuquén, 2018). Se abordará de forma introductoria el fenómeno de adsorción a través del estudio de contenidos propios del diseño para dicha materia como las soluciones y sus características como sistemas homogéneos, el concepto de pH y la identificación de sustancias ácidas, básicas y neutras. A través de actividades de indagación, construcción conceptual y experimentación, se trabajarán contenidos curriculares del ciclo básico vinculados con los Núcleos de Aprendizaje Prioritarios (NAP) de ciencias naturales para tercer año en relación con los materiales y sus cambios (Ministerio de Educación de la Nación, 2012). En particular, se abordarán:

- La identificación de soluciones acuosas ácidas, básicas y neutras.
- El reconocimiento de fenómenos fisicoquímicos relacionados con acciones preventivas y reparadoras del deterioro ambiental, vinculando la adsorción como un proceso de remediación de aguas contaminadas.

6.5. Objetivos

Los objetivos de la propuesta didáctica son:

- Comprender el concepto de pH y diferenciarlo de la adsorción y la absorción, a través de la medición experimental de soluciones cotidianas y del análisis de su influencia en la eficiencia de remediación.
- Identificar el impacto ambiental de la contaminación de aguas superficiales por colorantes y aplicar el método científico para evaluar el fenómeno de adsorción como estrategia de remediación con materiales de bajo costo.
- Diseñar y comunicar un producto de divulgación que presente el problema ambiental, el proceso experimental, los resultados y las recomendaciones a distintas audiencias.

- Generar conciencia ambiental a través de la puesta en valor del agua como recurso natural esencial, promoviendo la economía circular mediante el uso de residuos como adsorbentes.
- Analizar datos experimentales mediante registros numéricos de color, cálculo de porcentajes de remoción y representación gráfica de la relación entre pH y eficiencia de adsorción.
- Valorar el rol de los estudiantes en la identificación de problemas ambientales y en la elaboración de recomendaciones fundamentadas a partir de evidencias experimentales.

6.6. Metodología

La secuencia didáctica se organizó en torno a las siguientes etapas:

1. **Planteo de la problemática socioambiental como tema disparador:** se presentará a los estudiantes la contaminación de aguas superficiales por colorantes industriales. En esta instancia se busca motivar a los estudiantes al estudio de los contenidos propuestos a través de preguntas disparadoras, imágenes o noticias vinculadas a la contaminación del agua.
2. **Indagación de saberes previos:** a partir de una lluvia de ideas y actividades diagnósticas, se indagará sobre los conocimientos previos de los estudiantes en cuanto a los contenidos de interés para la propuesta (soluciones, pH, sustancias ácidas, básicas y neutras). También se trabajará con casos de contaminación de aguas.
3. **Momento intermedio de construcción conceptual:** se propondrá un espacio de trabajo guiado que permita a los estudiantes apropiarse de los conceptos necesarios de los contenidos a estudiar antes de la experimentación. Para ello se presentará material de lectura y preguntas orientadoras que permitan un primer acercamiento a los contenidos.
4. **Experimentación guiada:** las actividades se llevarán a cabo en equipos de trabajo colaborativo con el docente como guía en cada instancia. Se buscará que el estudiante participe en forma activa en la vinculación de los contenidos teóricos con lo práctico a través de la observación, el registro de resultados, el intercambio de ideas, el debate y la comunicación de lo observado. Se trabajará con mezclas simples para reconocer soluciones homogéneas y diferenciarlas de sistemas heterogéneos. Para estudiar el pH se utilizarán soluciones cotidianas que permitan identificar el carácter ácido, neutro o

básico de cada una de ellas. Además, se emplearán soluciones de azul de metileno ajustadas a distintos pH preparadas previamente por el docente o bajo supervisión docente, utilizando soluciones diluidas de ácido/base y verificando el pH con tiras reactivas o peachímetro. En cuanto al fenómeno de adsorción, los estudiantes podrán elaborar su propio adsorbente a partir de cáscaras de manzana, de pera, de nuez y yerba mate usada para evaluar la adsorción de azul de metileno a través de cambios en la coloración de la solución.

5. **Elaboración del producto final:** los estudiantes diseñarán, en grupos, una infografía destinada a la comunidad escolar destinada a la comunicación de la problemática en estudio.
6. **Evaluación:** se tratará de un proceso continuo a lo largo de la secuencia, valorando el proceso de cada estudiante a través una rúbrica de evaluación construida a partir de los objetivos conceptuales, procedimentales y actitudinales de la secuencia. Se finalizará con una instancia evaluativa que puede ser escrita u oral y en la que se abordarán los contenidos desde lo teórico y lo práctico.

En la siguiente tabla se encuentra la [distribución temporal de la secuencia didáctica](#) en función de las semanas de clase y las actividades propuestas para cada día.

6.7. Propuesta didáctica

- **Planteo de la problemática ambiental como tema disparador**
 - 1) Leer la siguiente [noticia](#), debatir en grupos de hasta cuatro personas y luego investigar para responder las preguntas.



Arroyo Sarandí, en Avellaneda, teñido de rojo, esta tarde
Sebastián Hipperdinger

Figura 49: Captura de pantalla de un fragmento del artículo “Alerta por un arroyo que se tiñó de rojo en el conurbano: impactantes imágenes”. *Nota.* Tomado de "Alerta por un arroyo que se tiñó de rojo en el conurbano", por S. Hipperdinger, 2025, *La Nación* (<https://www.lanacion.com.ar/sociedad/alerta-por-un-arroyo-que-se-tino-de-rojo-en-el-conurbano-nid06022025/>). Copyright 2026 SA La Nación.

- a) ¿Qué se entiende por contaminación y, en particular, por contaminación del agua?
 - b) ¿Toda sustancia disuelta en agua es un contaminante? ¿En qué se diferencia una sustancia contaminante de una que no lo es?
 - c) El artículo menciona que se desplegó un laboratorio móvil. ¿Qué tipo de análisis creen que realizaron?
 - d) Los vecinos dicen que no tienen agua potable. ¿Qué relación hay entre la contaminación del arroyo y el acceso al agua segura como derecho?
 - e) ¿Conocen algún caso similar de contaminación de aguas en nuestra región?
- 2) En forma individual, completar la siguiente [ficha de indagación inicial](#) sobre contaminación de aguas por colorantes y formas de remediación ambiental.

- 3) En grupos, compartan las soluciones propuestas para remover colorantes del agua. Luego, elaboren una lista común en el pizarrón clasificando las alternativas en: métodos físicos, químicos, biológicos/naturales y tecnológicos.

Nota para el docente: orientar la discusión hacia materiales de origen natural disponibles en la región, como arcillas, hojas, restos vegetales o cáscaras de frutas, sin anticipar inicialmente el uso de cáscaras de manzana.

- **Indagación de saberes previos**

- 4) a) Formar grupos de cuatro personas. Cada grupo contará con un vaso de precipitados, una varilla de vidrio y alguna de las siguientes sustancias: sal, aceite, arena, témpera, alcohol.

Procedimiento: agregar la sustancia asignada a un vaso de precipitados con agua y agitar con la varilla de vidrio, observando lo que sucede en el proceso.

Luego, caracterizar la mezcla a partir de las siguientes preguntas orientadoras:

-  La mezcla tiene aspecto uniforme o no uniforme?
-  Se puede observar la presencia de diferentes fases?
-  El sistema es homogéneo o heterogéneo? Según el caso, describir los componentes de la mezcla.

- b) Teniendo en cuenta el tipo de mezcla de tu grupo, debatir si es posible separar la mezcla obtenida a partir de algunos de los siguientes métodos de separación:

- **Evaporación:** es una técnica utilizada para separar mezclas homogéneas que contienen una o más sales disueltas. El proceso implica el calentamiento de la mezcla hasta la evaporación del solvente, dejando en el fondo del recipiente el soluto de la solución original.
- **Sedimentación:** es un método físico de separación de mezclas heterogéneas que consiste en dejar reposar la mezcla para que las partículas sólidas (que sean más densas que el líquido) se depositen en el fondo del recipiente por acción de la gravedad.
- **Destilación:** es un método eficaz para separar mezclas homogéneas de dos o más líquidos puros. Es un proceso de purificación en el que los componentes de una mezcla líquida se vaporizan y luego se condensan y aislan. En la

destilación simple, la mezcla se calienta y el componente más volátil se vaporiza a la temperatura más baja.

- Decantación: es un método de separación de mezclas heterogéneas compuestas por dos o más líquidos inmiscibles al aprovechar la diferencia de densidades entre cada una de las fases del sistema. El método consiste en dejar la mezcla en reposo hasta que los componentes se separen según su densidad en el recipiente y luego separar la fase superior con cuidado vertiéndola en otro recipiente.

c) Cada grupo compartirá con el resto de la clase los resultados obtenidos. Con la información aportada por todos los grupos, se construirá en el pizarrón un cuadro comparativo en el que se registrarán, para cada mezcla trabajada, el tipo de sistema formado (homogéneo o heterogéneo), las principales características observadas y el método de separación que consideran más adecuado para ese sistema.

d) En el caso de la mezcla con colorante, ¿es posible una separación por alguno de los métodos propuestos? ¿Se te ocurre alguna forma posible de separar los componentes de la mezcla?

- **Momento intermedio de construcción conceptual y experimentación guiada**

A partir de la puesta en común de la actividad anterior identificamos el problema de la remediación de aguas que contienen colorantes como surgió en la mezcla con ténpera. Esto permite introducir el fenómeno de adsorción como una alternativa útil frente a la necesidad de remediar cuerpos de agua contaminados con colorantes como se observó en la primera actividad de la propuesta.

5) I. Actividad experimental: se trabajará a partir de dos situaciones experimentales.

- En primer lugar: se colocará una pequeña cantidad de agua sobre una esponja o un trozo de papel absorbente, observando cómo el líquido penetra en el material. Luego se realizará la misma experiencia utilizando agua coloreada con azul de metileno diluido.
- En segundo lugar: se pondrá en contacto una solución coloreada con azul de metileno diluido con un material sólido finamente dividido (como carbón vegetal triturado, carbón activado, arcilla o arena fina), se agitará durante 10 minutos y se observará si el color disminuye en la solución con el paso del tiempo y la agitación.

En cada caso se debe registrar por escrito lo que ocurre en cada situación.

II. Una vez realizados los experimentos, responder las siguientes preguntas:

- ¿Qué sucede con el agua en el primer caso? ¿El líquido queda en la superficie del material o ingresa en su interior?
- ¿Qué sucede con el colorante en el segundo caso? ¿Desaparece o queda retenido en algún lugar?
- ¿En qué se diferencian los dos fenómenos observados?
- ¿Por qué la adsorción puede ser un método útil para remover sustancias disueltas en el agua?
- La adsorción se utiliza en el tratamiento de aguas residuales. ¿Por qué no se utiliza la absorción?

A partir de la explicación inicial y de la actividad experimental se regresará a las preguntas disparadoras del inicio y se debatirán en grupos. Se sumarán las siguientes preguntas a la discusión: ¿qué adsorbente de origen natural crees que podría producirse en nuestra región? ¿Cómo crees que impactaría en la economía local y en el cuidado del medio ambiente? Luego se hará una lluvia de ideas en el pizarrón a partir de lo comentado por cada grupo.

Introducción al fenómeno de adsorción

Esta será una instancia de construcción teórica de los conceptos necesarios para entender el fenómeno y cómo utilizarlo en la remediación de aguas contaminadas por colorantes. Se realizará una explicación en el pizarrón que puede estar acompañada por material visual en, por ejemplo, diapositivas.

Preguntas disparadoras:

- Si un cuerpo de agua presenta contaminación por colorantes, ¿qué estrategias podrían diseñarse y probarse para remover o disminuir la concentración del colorante en el agua? ¿Cómo podríamos remover un colorante disuelto en agua?

Explicación en el pizarrón:

La adsorción es un proceso que se utiliza para remover sustancias del agua cuando estas se encuentran disueltas y no pueden separarse mediante métodos simples como la filtración o

la decantación. En este proceso, una sustancia que está disuelta en el agua se adhiere a la superficie de un material sólido, llamado adsorbente, sin ingresar en su interior. Por ejemplo, en el caso de aguas contaminadas con colorantes, se podría utilizar el fenómeno de adsorción para adsorber la sustancia sobre algún tipo de adsorbente y luego retirar el adsorbente junto con la sustancia adherida o adsorbida mediante alguno de los métodos de separación vistos en la actividad anterior.

Es importante no confundir la adsorción con la absorción. Mientras que en la absorción una sustancia penetra en el interior de otra (como el agua que entra en una esponja), en la adsorción la sustancia se fija únicamente en la superficie del material sólido como se muestra en la figura 50.

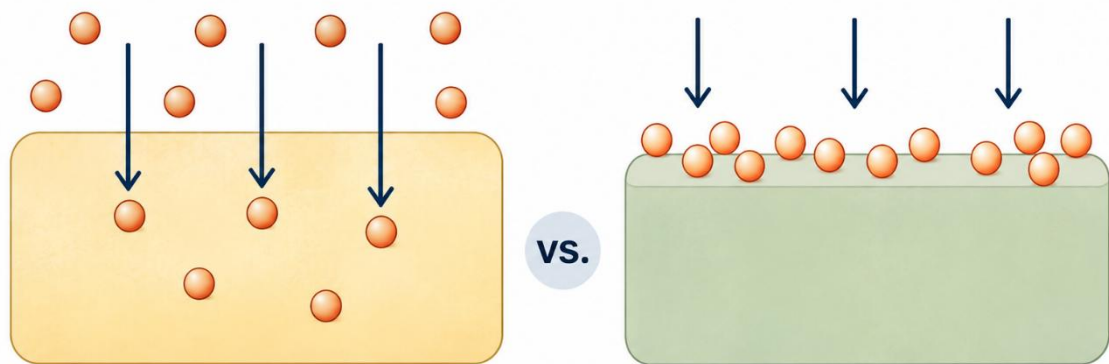


Figura 50. Diferencia entre absorción (izquierda) y adsorción (derecha). Fuente: elaboración propia, modificado de Sethi y Kaushal (2024)

Los adsorbentes son materiales sólidos que tienen la capacidad de retener sustancias en su superficie cuando entran en contacto con un líquido o un gas. Esta capacidad se debe a que presentan una superficie extensa y, en muchos casos, porosa, que permite que otras sustancias se adhieran a ella. En el tratamiento de aguas, los adsorbentes se utilizan para remover contaminantes disueltos, como colorantes, metales o compuestos orgánicos, que no pueden separarse mediante métodos tradicionales como la filtración o la decantación.

Algunos tipos de adsorbentes son:

- Adsorbentes naturales: son materiales que se encuentran en la naturaleza y pueden utilizarse con un procesamiento mínimo. Entre ellos se incluyen arcillas, arenas especiales y ciertos minerales. Estos materiales se destacan por su disponibilidad y bajo costo.
- Adsorbentes de origen industrial: un ejemplo ampliamente utilizado es el carbón activado, que posee una gran superficie y alta capacidad de adsorción. Si bien es

muy eficiente, su costo puede ser elevado, lo que limita su uso en algunos contextos.

- Adsorbentes de bajo costo y origen residual: en los últimos años se ha investigado el uso de materiales provenientes de residuos como adsorbentes alternativos. Estos materiales, además de ser económicos, permiten reutilizar desechos y reducir el impacto ambiental. Algunos ejemplos son cáscaras de frutas, restos vegetales, residuos agrícolas o materiales carbonizados obtenidos a partir de biomasa.

Introducción al concepto de pH y su influencia en el fenómeno de adsorción

Hasta ahora vimos que, cuando una sustancia se disuelve en el agua, no siempre es sencillo separarla utilizando métodos como la filtración o la decantación. En esos casos, la adsorción aparece como una alternativa para remover sustancias disueltas, como colorantes, a partir de su fijación en la superficie de un material sólido. Sin embargo, este proceso puede verse fuertemente afectado por el pH de la solución, pero ¿qué es el pH?

Una de las propiedades más importantes de las soluciones acuosas es el pH. El pH es una medida de la concentración de iones H^+ en agua y permite indicar si una solución es ácida, básica o neutra. De este modo, dos soluciones que a simple vista pueden parecer iguales pueden comportarse de manera diferente según su pH, afectando a las reacciones y procesos que puedan darse en la solución.

Las soluciones pueden clasificarse en ácidas, neutras o básicas a partir de una escala de pH. En esta escala:

- Las soluciones con pH menor a 7 se consideran ácidas.
- Las soluciones con pH igual a 7 se consideran neutras.
- Las soluciones con pH mayor a 7 se consideran básicas o alcalinas.

Para medir el pH de una solución se utilizan indicadores o instrumentos de medición. Las tiras de pH son un tipo de indicador que permiten estimar el pH de una solución a partir de una escala de colores. La tira está impregnada de sustancias que cambian de color al entrar en contacto con la solución según su pH. Para utilizarlas se la sumerge durante unos segundos en la solución y luego se compara el color resultante con una escala.

Otra forma de medir el pH es mediante el uso de un peachímetro, un instrumento electrónico de medición que permite obtener valores más precisos. Este instrumento se utiliza

cuando se requiere mayor exactitud, por ejemplo en laboratorios profesionales o en investigaciones científicas.

6) I. Clasificar las soluciones de las siguientes sustancias en ácidas, neutras o básicas: agua destilada, agua corriente, vinagre, café, bicarbonato de sodio, jabón, leche, jugo de naranja. Justificar brevemente a partir de tus conocimientos previos o de experiencias cotidianas.

II. El siguiente [simulador de pH](#) (PhET Interactive Simulations, Universidad de Colorado Boulder, 2002) permite seleccionar distintas sustancias y evaluar su pH utilizando un peachímetro. Para cada sustancia del punto anterior, registrar el valor de pH obtenido.

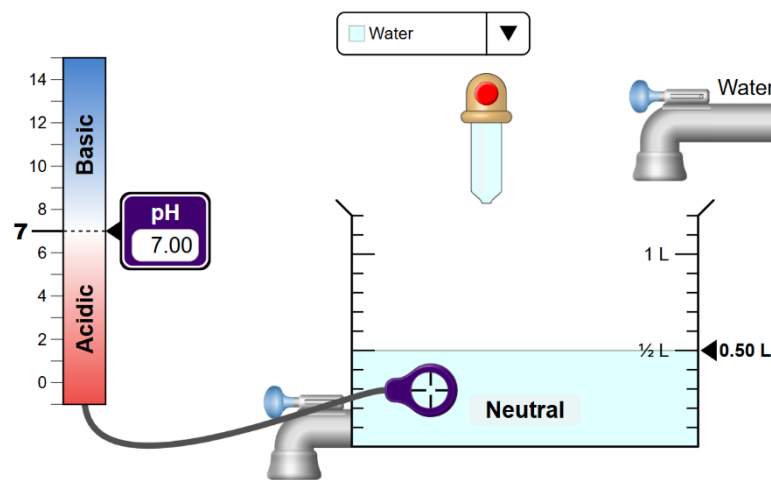


Figura 51. Simulador de pH. *Nota.* Captura de pantalla tomada de *pH Scale* [Simulador interactivo], por PhET Interactive Simulations, Universidad de Colorado Boulder, 2002 (https://phet.colorado.edu/sims/html/ph-scale/latest/ph-scale_all.html). CC BY-NC 4.0.

III. En grupos de cuatro integrantes evaluar el pH de las soluciones propuestas utilizando tiras reactivas de pH. Para ello, se introducirá una tira en cada solución y se comparará el color obtenido con la escala de referencia, registrando el valor aproximado de pH.

IV. Finalmente, comparar las predicciones y los resultados obtenidos en cada instancia y responder las siguientes preguntas:

- ¿Qué diferencias o similitudes observan entre los valores obtenidos con la simulación y con las tiras de pH?
- ¿Hubo alguna sustancia cuyo pH los haya sorprendido? ¿Por qué?
- ¿En qué casos coincidieron las predicciones con los valores medidos?
- ¿Qué método de medición consideran más preciso? ¿Por qué?

- ¿En qué casos las tiras de pH resultan suficientes y en cuáles podrían presentar limitaciones?

En la siguiente instancia se les propondrá a los estudiantes la fabricación de su propio adsorbente natural a partir de diferentes residuos regionales: cáscaras de manzana, de pera, de nuez y yerba mate usada. La elaboración será presentada como un desafío de diseño: en grupos deberán seleccionar el residuo a utilizar y tomar decisiones fundamentadas acerca de las variables de preparación. Cada grupo diseñará su propio protocolo de trabajo, pondrá a prueba su producto en soluciones diluidas de azul de metileno previamente preparadas y, a partir de los resultados obtenidos, propondrá mejoras para una segunda iteración. Previamente se le presentará a los estudiantes, en clase, el azul de metileno como sustancia modelo: sus características, usos y toxicidad, y su rol como contaminante de aguas superficiales en contextos industriales.

7) I. En el laboratorio, para estudiar la remoción de colorantes del agua se utiliza frecuentemente el azul de metileno como sustancia modelo. ¿Por qué creen que en investigación se usan sustancias modelo en lugar del contaminante real?

II. Desafío de diseño: elaboración del adsorbente natural. Cada grupo diseñará y fabricará su propio adsorbente natural a partir de residuos regionales.

A) Selección del material. Cada grupo deberá escoger uno de los siguientes residuos naturales: cáscaras de manzana, cáscaras de pera, yerba mate usada, cáscaras de nuez.

B) Antes de comenzar con la preparación del bioadsorbente, responder las siguientes preguntas:

- ¿Qué material eligió el grupo? ¿Por qué?
- ¿Qué ventajas y desventajas podría tener el material elegido?

C) Diseño del protocolo de preparación. Antes de fabricar el adsorbente, el grupo deberá discutir y registrar las decisiones que tomará en función de las siguientes posibles variables de trabajo:

Variable	Opciones posibles	Decisión del grupo	Justificación
Temperatura de secado	50 °C / 60 °C / 70 °C		
Tiempo de secado	12 h / 24 h / 48 h		
Tamaño de partícula	Gruesa / media / fina		
Tiempo de trituración	5 min / 10 min / 15 min		

Una vez completada la tabla, redactar el protocolo de trabajo para la preparación del adsorbente. *Nota para el profesor: en este momento es fundamental la intervención sobre los grupos de trabajo para orientar en la redacción del protocolo y los pasos a seguir.*

III. Antes de comenzar el experimento, cada grupo formulará una hipótesis: ¿a qué pH creen que la adsorción será más efectiva? ¿Por qué? Registren su hipótesis por escrito.

IV. Se evaluará la adsorción de azul de metileno sobre el bioadsorbente fabricado por cada grupo. Para ello cada grupo de cuatro estudiantes contará con:

- Una solución ácida de azul de metileno de pH de alrededor de 2,5.
- Una solución neutra de azul de metileno.
- Una solución básica de azul de metileno de pH de alrededor de 11.

En primer lugar los estudiantes pesarán 1 g del adsorbente natural con la ayuda de una balanza y lo introducirán en un erlenmeyer de 250 mL. Luego, se introducirán 100 mL de la solución de azul de metileno y se tapaná el erlenmeyer. En este momento se tomará un primer registro del color de la solución utilizando la aplicación Physics Toolbox Suite (Vieyra Software, 2026) y, en simultáneo, con la aplicación phyphox (RWTH Aachen University, 2025), ambas disponibles en Play Store para su descarga. Physics Toolbox Suite permite tomar registros de color, lo cual permitirá evaluar cualitativamente la adsorción a través de cambios en la coloración de la solución. Para evaluar datos cuantitativos se utilizará la herramienta Color (Hue Saturation Value) de phyphox. Para ello, se debe registrar el valor de saturación (S) de la solución antes y después de la agitación, y calcular el porcentaje de cambio de color: $\% \text{ cambio} = ((S_{\text{inicial}} - S_{\text{final}}) / S_{\text{inicial}}) \times 100$. Luego, cada grupo construirá un gráfico de barras simple (pH vs. porcentaje de remoción).

Una vez tomado el primer registro, se agitará la solución durante 30 minutos. Finalmente se tomará un segundo registro para comparar el cambio en la coloración del

sistema. Una atenuación en el color de la solución indicará un resultado positivo en la adsorción del colorante tal como se observa en las imágenes.

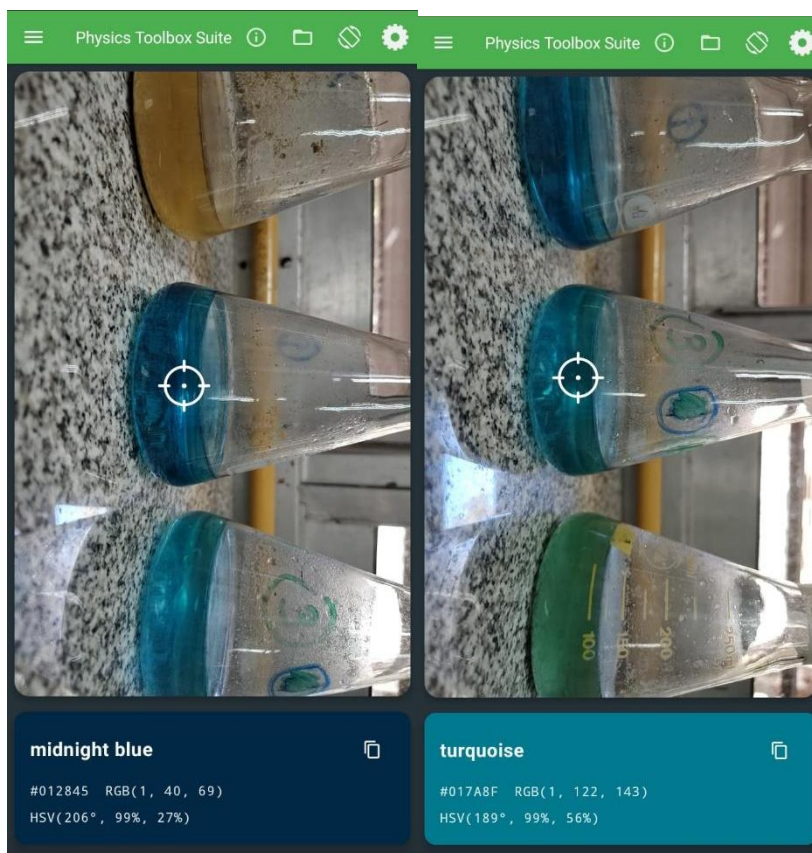


Figura 52. De izquierda a derecha: antes y después de la adsorción de azul de metileno sobre cáscaras de manzana desecadas. *Nota.* Captura de pantalla tomada de *Physics Toolbox Sensor Suite* (Versión 2026.03.04)

[Aplicación móvil], por Vieyra Software, 2026

(<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.chrystianvieyra.physicstoolboxsuite>).

Realizar el mismo procedimiento con las tres soluciones (ácida, neutra, básica). Registrar el color inicial y final en cada caso por cada solución. Luego, comparar:

- Para una misma solución el resultado antes y después de la agitación.
- Entre soluciones: comparar los colores finales luego de la agitación.

A partir de la comparación visual, responder las siguientes preguntas:

1. ¿Qué diferencias se observan entre las soluciones?
2. ¿A qué pH la adsorción fue más efectiva? ¿Hubo algún caso en el que el color no haya cambiado?

3. ¿Creen que el adsorbente pueda utilizarse en situaciones reales de remediación de aguas contaminadas por colorantes? ¿De qué manera?
4. ¿El adsorbente fabricado funcionó como se esperaba? ¿Por qué sí o por qué no?
5. ¿Qué variable cambiarían en una segunda fabricación para mejorar la adsorción? ¿Por qué?

V. Con los valores de % de cambio de color obtenidos para cada solución, construir un gráfico de barras donde el eje horizontal represente el pH (ácido, neutro, básico) y el eje vertical el porcentaje de cambio de color. ¿Qué conclusión pueden extraer a partir del gráfico?

VI. En grupo, reflexionar acerca del funcionamiento y las limitaciones del software utilizado:

- ¿Cómo detecta la aplicación el color de la solución? ¿Qué diferencia hay entre lo que percibe el ojo humano y lo que registra la cámara del celular?
- Si tuviéramos un espectrofotómetro, ¿en qué cambiarían nuestras mediciones?

Nota para el profesor: sobre las condiciones de medición con Physics Toolbox Suite. Para que los valores de color (RGB) registrados con la aplicación sean comparables entre las distintas muestras, es fundamental que todas las fotografías se tomen bajo las mismas condiciones de iluminación. Se recomienda:

- Elegir un punto fijo del laboratorio con luz uniforme (preferentemente cerca de una ventana con luz natural indirecta o bajo una lámpara fija). Evitar la luz solar directa, ya que genera reflejos y sombras que alteran los valores de color.
- Colocar cada muestra en el mismo lugar exacto y a la misma distancia de la cámara para todas las mediciones. Puede marcarse la posición sobre la mesada con cinta de papel.
- Mantener el fondo constante: apoyar los recipientes sobre una hoja blanca para estandarizar el contraste.
- Tomar la medición inicial (antes de agregar el adsorbente) y la final (después del filtrado) en la misma sesión y posición siempre que sea posible. Si no fuera posible, registrar las condiciones de luz para tenerlas en cuenta al interpretar los resultados.
- Desactivar el flash de la cámara, ya que introduce una fuente de luz variable que distorsiona los valores RGB.

Estas precauciones son parte del control de variables del experimento: la luz ambiental es una variable que, si no se controla, puede hacer que diferencias aparentes de color se deban a cambios en la iluminación y no a la eficiencia de la adsorción.

- **Etapa de cierre: socialización, divulgación y metacognición**

8) Síntesis y conclusión grupal

Una vez finalizada la experimentación, cada grupo organizará sus registros en una [tabla comparativa](#) con las siguientes columnas: pH de la solución, color inicial y final, saturación inicial y final, porcentaje de cambio, y una interpretación cualitativa del nivel de adsorción (alta, media, baja o nula). A partir de la tabla y del gráfico de barras construido durante la experimentación, redactarán una conclusión grupal breve que explicita la relación observada entre el pH y la eficiencia del adsorbente natural, reconociendo además las limitaciones metodológicas del proceso: la medición del color mediante observación visual, el uso de tiras indicadoras o de la aplicación Physics Toolbox Sensor Suite frente a instrumentación de laboratorio convencional, y el contraste con los resultados obtenidos mediante el simulador digital.

9) Producto de divulgación

Cada grupo seleccionará y producirá uno de los siguientes formatos de comunicación científica, según sus intereses y habilidades:

- Infografía digital sobre la problemática y la solución propuesta.
- Reel o video corto explicativo del proceso experimental y los resultados.
- Póster científico en formato de congreso escolar.
- Propuesta de remediación dirigida a autoridades municipales u ONGs ambientales locales.

En todos los casos, el producto deberá comunicar claramente el problema ambiental, el procedimiento experimental, los resultados obtenidos y las recomendaciones derivadas.

10) Cierre metacognitivo individual

Para cerrar el proyecto, cada estudiante retomará la ficha de indagación inicial completada al comienzo de la secuencia y responderá individualmente las siguientes preguntas de reflexión:

- ¿Qué sabía al comenzar y qué sé ahora?
 - ¿Cuál fue el momento del proyecto donde más aprendí?
 - ¿Qué dificultades encontré y cómo las resolví?
 - ¿Cómo se relaciona lo aprendido con mi entorno y mi vida cotidiana?
-
- **Evaluación de la etapa de cierre**

La evaluación de esta etapa se realiza mediante una [rúbrica integral](#) que contempla tanto la trayectoria como el producto final. La rúbrica organiza los criterios de evaluación en cuatro dimensiones. Las dos primeras (proceso experimental y producto de divulgación) se evalúan de forma grupal, reconociendo el carácter colaborativo del proyecto. Las dos restantes (actitudes y metacognición) se evalúan individualmente mediante la observación docente a lo largo de la secuencia y la ficha metacognitiva que cada estudiante completa al cierre, retomando sus respuestas iniciales. Cada criterio se valora en una escala de cuatro niveles (inicial, en proceso, satisfactorio y avanzado), con un puntaje máximo de 32 puntos. La rúbrica es compartida con los estudiantes al inicio del proyecto, de modo que funcione también como guía orientadora del proceso y no solo como instrumento de calificación. A su vez, el docente contará con una [lista de cotejo](#) para completar clase a clase en función del trabajo y participación de los estudiantes. Esto permite llevar un registro más ordenado de la clase para poder sostener una evaluación consistente con los cuatro niveles diferenciados de la rúbrica al finalizar el proyecto.

Capítulo 7

Referencias

7. Referencias

- Acevedo-Díaz, J. A. (2004). Reflexiones sobre las finalidades de la enseñanza de las ciencias: educación científica para la ciudadanía. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias*, 1(1), 3-16.
- Atkins, P. W., & De Paula, J. (2008). *Química física* (8.ª ed.). Editorial Médica Panamericana.
- Barron, B. J. S., Schwartz, D. L., Vye, N. J., Moore, A., Petrosino, A., Zech, L., Bransford, J. D., & The Cognition and Technology Group at Vanderbilt University. (1998). *Doing with understanding: Lessons from research on problem- and project-based learning. The Journal of the Learning Sciences*, 7(3-4), 271-311. <https://doi.org/10.1080/10508406.1998.9672056>
- Bayomie, O. S., Kandeel, H., Shoeib, T., Yang, H., Youssef, N., & El-Sayed, M. M. H. (2020). Novel approach for effective removal of methylene blue dye from water using fava bean peel waste. *Scientific Reports*, 10(1), 7824. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64727-5>
- Bell, S. (2010). Project-based learning for the 21st century: Skills for the future. *The Clearing House: A Journal of Educational Strategies, Issues and Ideas*, 83(2), 39-43. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00098650903505415>
- Blumenfeld, P. C., Soloway, E., Marx, R. W., Krajcik, J. S., Guzdial, M., & Palincsar, A. (1991). Motivating project-based learning: Sustaining the doing, supporting the learning. *Educational Psychologist*, 26(3-4), 369-398. <https://doi.org/10.1080/00461520.1991.9653139>
- Bollinger, J. C., Lima, E. C., Mouni, L., et al. (2025). Molecular properties of methylene blue, a common probe in sorption and degradation studies: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 23, 1403-1424. <https://doi.org/10.1007/s10311-025-01856-1>

- Bryan, L. A., Moore, T. J., Johnson, C. C., & Roehrig, G. H. (2015). Integrated STEM education. En *STEM Road Map: A Framework for Integrated STEM Education* (pp. 23-37). Routledge.
- Bybee, R. W. (2013). *The case for STEM education: Challenges and opportunities*. National Science Teachers Association. <https://static.nsta.org/pdfs/samples/PB337Xweb.pdf>
- English, L. D. (2016). STEM education K-12: Perspectives on integration. *International Journal of STEM Education*, 3(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s40594-016-0036-1>
- Enniya, I., & Jourani, A. (2017). Study of Methylene Blue Removal by a biosorbent prepared with Apple peels. *J. Mater. Environ. Sci*, 8(12), 4573-4581.
- Fernández-Pérez, A., Valdés-Solís, T., & Marbán, G. (2018). Visible light spectroscopic analysis of Methylene Blue in water; the resonance virtual equilibrium hypothesis. *Dyes and Pigments*, 161, 448–456. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2018.09.083>
- Fundación Telefónica. (s. f.). *Monográfico: aprendizaje basado en problemas (PBL)*. <https://publicaciones.fundaciontelefonica.com/api/view/publication/monografico-aprendizaje-basado-en-problemas-pbl/656?country=null>
- Gregg, S. J., & Sing, K. S. W. (1982). *Adsorption, surface area and porosity*. Academic Press.
- Guo, P., Saab, N., Post, L. S., & Admiraal, W. (2020). A review of project-based learning in higher education: Student outcomes and measures. *International Journal of Educational Research*, 102, 101586. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883035519325704>
- Gupta, S. A., Vishesh, Y., Sarvshrestha, N., Bhardwaj, A. S., Kumar, P. A., Topare, N. S., Raut-Jadhav, S., Bokil, S. A., & Khan, A. (2021). Adsorption isotherm studies of Methylene blue using activated carbon of waste fruit peel as an adsorbent. *Materials Today Proceedings*, 57, 1500–1508. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.044>

- Hamad, H. N., & Idrus, S. (2022). Recent Developments in the Application of Bio-Waste-Derived Adsorbents for the Removal of Methylene Blue from Wastewater: A Review. *Polymers*, 14(4), 783. <https://doi.org/10.3390/polym14040783>
- Hernández, J. H. L., & Jiménez, M. A. (2019). Aprendizaje Basado en Problemas (ABP) como estrategia para promover la formación Educativa Ambiental en estudiantes universitarios: una aproximación desde la Didáctica. *Revistas de Investigación*, 43(98)
- Hernando Calvo, A. (2015). *Viaje a la escuela del siglo XXI: Así trabajan los colegios más innovadores del mundo*. Fundación Telefónica. <https://publicaciones.fundaciontelefonica.com/api/view/publication/viaje-a-la-escuela-del-siglo-xxi/897?country=null>
- Hipperdinger, S. (2025, 6 de febrero). *Arroyo Sarandí, en Avellaneda, teñido de rojo* [Fotografía]. En E. Iriarte, Alerta por un arroyo que se tiñó de rojo en el conurbano: impactantes imágenes. *La Nación*. <https://www.lanacion.com.ar/sociedad/alerta-por-un-arroyo-que-se-tino-de-rojo-en-el-conurbano-nid06022025/>
- Ho, S. (2022). Low-Cost Adsorbents for the Removal of Phenol/Phenolics, Pesticides, and Dyes from Wastewater Systems: A Review. *Water*, 14(20), 3203. <https://doi.org/10.3390/w14203203>
- Honey, M., Pearson, G., & Schweingruber, H. (Eds.). (2014). *STEM integration in K–12 education: Status, prospects, and an agenda for research*. National Academies Press. <https://www.middleweb.com/wp-content/uploads/2015/01/STEM-Integration-in-K12-Education.pdf>
- Hou S.X., *Adv. Mater. Res.* 634–638 (2013) 178–181
- Hulupi, M., Keryanti, K., Rahmawati, K. A., Dewi, W. T., & Abdilah, F. (2023). Validation of methylene blue analysis method in wastewater samples by UV-VIS spectrophotometry. *EKUILIBIUM*, 7(2), 101. <https://doi.org/10.20961/equilibrium.v7i2.75807>
- Iriarte, E. (2025, 7 de febrero). Alerta por un arroyo que se tiñó de rojo en el conurbano: impactantes imágenes. *LA NACIÓN*. <https://tinyurl.com/adu4tjbr>

- Kannan, N., & Sundaram, M. M. (2001). Kinetics and mechanism of removal of methylene blue by adsorption on various carbons—a comparative study. *Dyes and pigments*, 51(1), 25-40.
- Keller, J. U., & Staudt, R. (2005). *Gas adsorption equilibria: experimental methods and adsorptive isotherms*. Boston, MA: Springer US.
- Kelley, T. R., & Knowles, J. G. (2016). A conceptual framework for integrated STEM education. *International Journal of STEM Education*, 3(1), 1-11.
<https://doi.org/10.1186/s40594-016-0046-z>
- Kennedy, T. J., & Odell, M. R. L. (2014). Engaging students in STEM education. *Science Education International*, 25(3), 246-258.
- Kennedy, T. J., & Odell, M. R. L. (2023). STEM education as a meta-discipline. En *Handbook of Research on Science Teacher Education* (pp. 1-25). IntechOpen.
- Khalifaoui A., Meniai Abdeslam H., Derbal K., *Energy Procedia*. 19 (2012) 286–295.
- Khan, I., Saeed, K., Zekker, I., Zhang, B., Hendi, A. H., Ahmad, A., Ahmad, S., Zada, N., Ahmad, H., Shah, L. A., Shah, T., & Khan, I. (2022). Review on Methylene Blue: Its Properties, Uses, Toxicity and Photodegradation. *Water*, 14(2), 242.
<https://doi.org/10.3390/w14020242>
- Kim, H., & Chae, D. H. (2016). The development and application of a STEAM program based on traditional Korean culture. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 12(7), 1925–1936. <https://tinyurl.com/3d6r4yte>
- Kishor, R., Purchase, D., Saratale, G. D., Saratale, R. G., Ferreira, L. F. R., Bilal, M., Chandra, R., & Bharagava, R. N. (2021). Ecotoxicological and health concerns of persistent coloring pollutants of textile industry wastewater and treatment approaches for environmental safety. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105012. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105012>

- Kokotsaki, D., Menzies, V., & Wiggins, A. (2016). Project-based learning: A review of the literature. *Improving Schools*, 19(3), 267–277.
<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1365480216659733>
- Krajcik, J. S., & Blumenfeld, P. C. (2006). Project-based learning. In R. K. Sawyer (Ed.), *The Cambridge handbook of the learning sciences* (pp. 317–334). Cambridge University Press.
- Levine, I. (2014). *Principios de fisicoquímica* (6.^a ed.). McGraw-Hill.
- Madden, M. E., Baxter, M., Beauchamp, H., Bouchard, K., Habermas, D., Huff, M., Ladd, B., Pearson, J., & Plague, G. (2013). Rethinking STEM education: An interdisciplinary STEAM curriculum. *Procedia Computer Science*, 20, 541–546.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050913011162>
- Marcano, D. (1990). *Introducción a la Química de los Colorantes*. Reverte Venezolana.
- Markula, A. E., & Aksela, M. (2022). The key characteristics of project-based learning: How teachers implement projects in K-12 science education. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 4, 2. <https://doi.org/10.1186/s43031-021-00042-x>
- Meili, L., Lins, P., Costa, M., Almeida, R., Abud, A., Soletti, J., Dotto, G., Tanabe, E., Sellaoui, L., Carvalho, S., & Erto, A. (2018). Adsorption of methylene blue on agroindustrial wastes: Experimental investigation and phenomenological modelling. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 141, 60–71.
<https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2018.07.011>
- Ministerio de Educación de la Provincia del Neuquén. (2018). *Diseño Curricular Nueva Escuela Secundaria*. Resolución N° 1463/18. Recuperado de <https://www.neuquen.edu.ar/disenio-curricular-nueva-escuela-secundaria/>
- Mohammed, M. A., Shitu, A., & Ibrahim, A. (2014). Removal of methylene blue using low cost adsorbent: A review. *Research Journal of Chemical Sciences*, 4(1), 91–102.

- Moore, T. J., Stohlmann, M. S., Wang, H.-H., Tank, K. M., Glancy, A. W., & Roehrig, G. H. (2014). Implementation and integration of engineering in K–12 STEM education. In Ş. Purzer, J. Strobel, & M. Cardella (Eds.), *Engineering in pre-college settings: Synthesizing research, policy, and practices* (pp. 35–60). Purdue University Press.
<https://tinyurl.com/3eemfu2v>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2019). *Science and engineering for grades 6–12: Investigation and design at the center*. The National Academies Press.
<https://doi.org/10.17226/25216>
- National Research Council. (2012). *A framework for K–12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. The National Academies Press.
<https://doi.org/10.17226/13165>
- Oktem Y.A., Soylu S.G.P., Aytan N., *J. Sci. Ind. Res.* 71 (2012) 817–821
- Oladoye, P. O., Ajiboye, T. O., Omotola, E. O., & Oyewola, O. J. (2022). Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater. *Results in Engineering*, 16, 100678. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100678>
- Özer, D., Dursun, G., & Özer, A. (2006). Methylene blue adsorption from aqueous solution by dehydrated peanut hull. *Journal of Hazardous Materials*, 144(1–2), 171–179.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.092>
- Pamenang, F. D. N., Wibowo, R. S., & Marlinda, F. B. (2024). *Project-Based Learning in Teaching Adsorption Isotherm: The Implementation and Students' Opinion*. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 10(4), 1941–1949.
<https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i4.5543>
- PhET Interactive Simulations, Universidad de Colorado Boulder. (2002). *pH Scale* [Simulador interactivo]. https://phet.colorado.edu/sims/html/ph-scale/latest/ph-scale_all.html
- Prieto, A. B. (2025, abril–junio). *Introducción a la enseñanza de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas – STEM* [Material del curso de posgrado]. Maestría en

Enseñanza de Ciencias Exactas y Naturales, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue.

- Ramos, E. E., & Ruz, T. P. (2010). Problemas socio-científicos y enseñanza-aprendizaje de las ciencias. *Revista Investigación en la Escuela*, 71, 17-24.
- Rorissa, G. L., Tesema, E. A., M, R. P. D., Hundu, A. R., Beyena, S. Y., Biru, M. A., Mekonnen, D. T., & Adnuallem, T. L. (2025). Removal of methylene blue dye from textile industry wastewater using green synthesized Teff straw assisted ZnO nanoparticle. *Scientific Reports*, 15(1), 26230. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11746-9>
- RWTH Aachen University. (2025). *phyphox* (Versión 1.2.0) [Aplicación móvil]. Google Play Store. https://play.google.com/store/apps/details?id=de.rwth_aachen.phyphox
- Salunke, A. S., Gund, N. N., Marmat, B. M., Sonar, J. P., Dokhe, S. A., Zine, A. M., Thore, S. N., & Pardeshi, S. D. (2020). Adsorptive removal of amido black from aqueous solution using economical adsorbent: Kinetic and isotherm study. *International Journal of Chemical and Physical Sciences*, 9(5).
- Sanders, M. (2009). STEM, STEM education, STEMmania. *The Technology Teacher*, 68(4), 20–26. <https://tinyurl.com/bdd3e457>
- Sethi, A., & Kaushal, R. (2024). Resin selection for steviol glycoside extraction from stevia leaf. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 11(6), 69–72. <https://www.irjet.net/archives/V11/i6/IRJET-V11I613.pdf>
- Shahinyan, G. A., Amirbekyan, A. Y., & Markarian, S. A. (2019). Photophysical properties of methylene blue in water and in aqueous solutions of dimethylsulfoxide. *Spectrochimica Acta Part a Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 217, 170–175. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.03.079>
- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2014). *Fundamentos de química analítica* (9.^a ed.). Cengage.

- Uddin, M. T., Islam, M. A., Mahmud, S., & Rukanuzzaman, M. (2008). Adsorptive removal of methylene blue by tea waste. *Journal of Hazardous Materials*, 164(1), 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.131>
- UNESCO. (2019). *Exploring STEM competences for the 21st century*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000368485>
- Vasquez, J. A., Sneider, C., & Comer, M. (2013). *STEM lesson essentials, grades 3–8: Integrating science, technology, engineering, and mathematics*. Heinemann.
- Vieyra Software. (2026). *Physics Toolbox Sensor Suite* (Versión 2026.03.04) [Aplicación móvil]. Google Play Store. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.chrystianvieyra.physicstoolboxsuite>
- Wade, L. G., & Simek, J. W. (2017). *Organic Chemistry* (9th ed.). Pearson.
- Yagub, M. T., Sen, T. K., & Ang, H. M. (2012). Equilibrium, kinetics, and thermodynamics of methylene blue adsorption by pine tree leaves. *Water Air & Soil Pollution*, 223(8), 5267–5282. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1277-3>
- Yakman, G. (2008). *STEAM education: An overview of creating a model of integrative education* [Conference presentation]. PATT-19 Conference, Salt Lake City, UT, United States. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8025669/>
- Yakman, G., & Lee, H. (2012). Exploring the exemplary STEAM education in the US as a practical educational framework for Korea. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 32(6), 1072-1086. <https://tinyurl.com/4bnshjfd>
- Zambrano Briones, M. A., Hernández Díaz, A., & Mendoza Bravo, K. L. (2022). El aprendizaje basado en proyectos como estrategia didáctica. *Revista Conrado*, 18(84), 172-182.