



---

---

# **BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

COLEGIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

## **HIDROGELES A BASE DE POLISACÁRIDOS NATURALES APLICADOS PARA LA REMOCIÓN DE COLORANTES TEXTILES**

Tesis presentada para obtener el grado de:  
Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Presenta:

**ANDREA REYES ÁLVAREZ**

DIRECTOR:

**DRA. MARÍA TERESA ZAYAS PÉREZ**

Co DIRECTOR:

**DR. LEONARDO SALGADO JUÁREZ**



PUEBLA, NOVIEMBRE 2025

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	5
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	6
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	8
<b>2. JUSTIFICACIÓN</b> .....	9
<b>3. OBJETIVO GENERAL</b> .....	10
3.1. OBJETIVOS PARTICULARES .....	10
<b>4. HIPÓTESIS</b> .....	11
<b>5. MARCO TEÓRICO</b> .....	12
5.1. Colorantes .....	12
5.1.1. Clasificación .....	12
5.1.2. Colorantes textiles de interés y contaminación ambiental .....	13
5.1.2.1. Azul de metileno .....	13
5.1.2.2. Verde de malaquita .....	14
5.1.3. Espectrofotometría de Absorción Ultravioleta y visible (UV-Vis) .....	15
5.2. Contaminación del agua .....	17
5.2.1. Aguas residuales textiles .....	17
5.2.1.1. Impacto de las aguas residuales textiles coloreadas en la fauna, flora y seres humanos .....	18
5.2.1.2. Tratamientos utilizados para aguas residuales textiles coloreadas .....	18
5.2.1.2.1. Adsorción de colorantes en medios acuosos con hidrogeles .....	19
5.3. Hidrogeles y casos aplicados en la remoción de colorantes textiles .....	19
5.3.1. Hidrogeles sintéticos y naturales .....	20
5.3.1.1. Hidrogeles sintéticos .....	20
5.3.1.2. Hidrogeles naturales .....	21
5.3.1.2.1. Polisacáridos .....	22
5.3.1.2.1.1. Goma de xantana .....	22
5.3.1.2.1.2. Agar-agar .....	23
5.3.2. Clasificación de hidrogeles superabsorbentes .....	25
5.3.2.1. En relación con su origen .....	25
5.3.2.2. En relación con su carga iónica .....	26
5.3.2.3. En relación con su reticulación .....	27
5.3.2.4. En relación con su composición polimérica .....	27

5.3.2.5. En relación con su biodegradación .....	28
5.3.2.6. En relación con su tamaño de poro .....	28
5.3.2.7. Morfología de la red .....	29
5.3.2.8. Sensibilidad .....	29
5.3.3. Métodos de síntesis de hidrogeles .....	29
5.3.3.1. Reticulación física .....	31
5.3.3.2. Reticulación química .....	31
5.3.3.3. Polimerización por injerto .....	32
5.3.3.4. Polimerización por radiación .....	32
5.3.3.4.1. Irradiación por microondas .....	33
5.3.4. Caracterización de hidrogeles .....	34
5.3.4.1. pH .....	34
5.3.4.2. Análisis del hinchamiento .....	34
5.3.4.2.1. Índice de hinchamiento .....	34
5.3.4.2.2. Porcentaje de hinchamiento .....	35
5.3.4.2.3. Porcentaje de absorción de agua en el equilibrio .....	35
5.3.4.2.4. Porcentaje de gelación/contenido en gel .....	35
5.3.4.3. Espectroscopía Infrarroja .....	36
5.3.4.4. Morfología .....	36
5.3.4.5. Análisis térmico .....	36
5.3.5. Aplicaciones de los hidrogeles en aguas residuales .....	37
<b>6. PARTE EXPERIMENTAL .....</b>	<b>37</b>
6.1. Reactivos químicos y equipo .....	37
6.2. Preparación de hidrogeles a partir de goma de xantana .....	38
6.3. Purificación de hidrogeles .....	38
6.4. Secado de hidrogeles .....	39
6.5. Medida de hinchamiento .....	39
6.5.1. Determinación del índice de hinchamiento .....	39
6.5.2. Porcentaje de hinchamiento y porcentaje de absorción de agua en el equilibrio .....	39
6.5.3. Porcentaje de gelación/contenido en gel .....	40
6.6. Estudio de hidrogeles y xerogeles para remoción de colorantes textiles .....	40
6.6.1. Efecto de pH .....	40

<b>7.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	43
7.1.	Síntesis del hidrogel superabsorbentes (BHS).....	43
7.1.1.	Evaluación del volumen de disolvente de reacción.....	43
7.2.	Caracterización .....	45
7.2.1	Determinación del porcentaje de gel y porcentaje de índice de hinchamiento .....	45
7.2.2	Porcentaje de hinchamiento .....	45
7.2.2.1.	Volumen de disolvente de reacción: 90 mL .....	46
7.2.2.2.	Volumen de disolvente de reacción: 100 mL .....	48
7.2.2.3.	Volumen de disolvente de reacción: 110 mL .....	50
7.3.	Estudios de remoción de los colorantes azul de metileno (AZM) y verde de malaquita (VEM) en hidrogeles y xerogeles sintetizados con 100 y 110 mL .....	55
7.3.1.	Efecto del pH .....	55
7.3.2.	Espectros de absorción UV-Vis del colorante AZM .....	55
7.3.2.1.	Remoción del colorante AZM en hidrogel y xerogel sintetizados con 100 y 110 mL de agua.....	57
7.3.2.1.1.	pH = 4.0, 6.0, 8.0.....	57
7.3.3.	Espectros de absorción UV-Vis del colorante VEM .....	65
7.3.3.1.	Remoción del colorante VEM en hidrogeles y xerogeles sintetizados con 100 y 110 mL de agua (V2:100mL; V3:110mL) .....	66
7.3.3.1.1.	pH = 4.0, 6.0, 8.0.....	67
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	75
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	76

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Algunos grupos cromóforos y auxocromos en los colorantes textiles. ....	12
<b>Tabla 2.</b> Color absorbido y observado en una sustancia. ....	16
<b>Tabla 3.</b> Valores obtenidos para los BHS en función del volumen del disolvente. Masa de GX/AA 1.25 g; iniciador $K_2S_2O_8 = 9.954 \times 10^{-3} M$ ; agente entrecruzante MBA $= 3.007 \times 10^{-3} M$ ; monómero = AA $3.274 \times 10^{-2} M$ y tiempo de irradiación 80 s. ....	44
<b>Tabla 4.</b> Datos obtenidos de valores de eficiencia de BHS durante 48 h cada volumen de síntesis. ....	45
<b>Tabla 5.</b> Porcentaje de hinchamiento (%H) en función del tiempo (minutos) para los hidrogeles BHS sintetizados con un volumen de agua de 90 mL. ....	47
<b>Tabla 6.</b> Porcentaje de hinchamiento (%H) en función del tiempo (minutos) para los hidrogeles BHS sintetizados con un volumen de agua de 100 mL. ....	49
<b>Tabla 7.</b> Porcentaje de hinchamiento (%H) en función del tiempo (minutos) para los hidrogeles BHS sintetizados con un volumen de agua de 110 mL. ....	51
<b>Tabla 8.</b> Porcentaje de remoción de AZM en hidrogeles y xerogeles (V2: 100 mL) para valores de pH 4.0, 6.0, 8.0. ....	61
<b>Tabla 9.</b> Porcentaje de remoción de AZM en hidrogeles y xerogeles (V3: 110 mL) para valores de pH 4.0, 6.0, 8.0. ....	61
<b>Tabla 10.</b> Porcentaje de remoción de VEM en hidrogeles y xerogeles (V2: 100 mL) para valores de pH 4.0, 6.0, 8.0. ....	71
<b>Tabla 11.</b> Porcentaje de remoción de VEM en hidrogeles y xerogeles (V3: 110 mL) para valores de pH 4.0, 6.0, 8.0. ....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Estructura química del colorante azul de metileno. ....	14
<b>Figura 2.</b> Estructura química del colorante textil verde de malaquita.....	15
<b>Figura 3.</b> El espectro electromagnético. ....	16
<b>Figura 4.</b> Estructura de la goma de xantana. ....	23
<b>Figura 5.</b> Principales algas de las que se obtiene agar. ....	24
<b>Figura 6.</b> Estructura de la agarosa.....	25
<b>Figura 7.</b> Clasificación de los hidrogeles superabsorbentes. ....	30
<b>Figura 8.</b> Síntesis de hidrogeles mediante microondas. ....	33
<b>Figura 9.</b> Diagrama experimental para la remoción de los colorantes. ....	41
<b>Figura 10.</b> Porcentaje de hinchamiento (%H) en función del tiempo (minutos) para los hidrogeles BHS sintetizados con un volumen de agua de 90 mL. ....	48
<b>Figura 11.</b> Porcentaje de hinchamiento (%H) en función del tiempo (minutos) para los hidrogeles BHS sintetizados con un volumen de agua de 100 mL. ....	50
<b>Figura 12.</b> Porcentaje de hinchamiento (%H) en función del tiempo (minutos) para los hidrogeles BHS sintetizados con un volumen de agua de 110 mL. ....	53
<b>Figura 13.</b> Promedio del %H en función del tiempo (min) para los hidrogeles BHS sintetizados con diferentes volúmenes de agua. ....	54
<b>Figura 14.</b> Espectro de absorción del colorante azul de metileno a 25 ppm y banda con un máximo de absorción a 664 nm a diferentes valores de pH. ....	56
<b>Figura 15.</b> Espectro de absorción de solución acuosa de AZM a 25 ppm a pH 4.0, 6.0, 8.0 con hidrogel (a, b, c) y xerogel (d, e, f). ....	60
<b>Figura 16.</b> Comparación del porcentaje de remoción entre hidrogeles y xerogeles (V2:100 mL) del colorante AZM a valores de pH 4.0, 6.0 y 8.0. ....	62
<b>Figura 17.</b> Comparación del porcentaje de remoción entre hidrogeles y xerogeles (V3:110 mL) del colorante AZM a valores de pH 4.0, 6.0 y 8.0. ....	63
<b>Figura 18.</b> Comparación del porcentaje de remoción entre hidrogeles (V2:100 mL y V3:110 mL) del colorante AZM a valores de pH 4.0, 6.0 y 8.0. ....	64
<b>Figura 19.</b> Comparación del porcentaje de remoción entre xerogeles (V2:100 mL y V3:110 mL) del colorante AZM a valores de pH 4.0, 6.0 y 8.0. ....	65
<b>Figura 20.</b> Espectro de absorción del colorante verde de malaquita a 25 ppm y banda con un máximo de absorción a 664 nm a diferentes valores de pH. ....	66
<b>Figura 21.</b> Espectro de absorción de la solución de verde de malaquita a 25 ppm a valores de pH 4.0, 6.0, 8.0 con un máximo de absorción de 618 nm. ....	70
<b>Figura 22.</b> Comparación del porcentaje de remoción entre hidrogeles y xerogeles (V2:100 mL) del colorante VEM a valores de pH 4.0, 6.0 y 8.0. ....	72
<b>Figura 23.</b> Comparación del porcentaje de remoción entre hidrogeles y xerogeles (V3:110 mL) del colorante VEM a valores de pH 4.0, 6.0 y 8.0. ....	72

**Figura 24.** Comparación del porcentaje de remoción entre hidrogeles (V2:100 mL y V3:110 mL) del colorante VEM a valores de pH 4.0, 6.0 y 8. ....73

**Figura 25.** Comparación del porcentaje de remoción entre xerogeles (V2:100 mL y V3:110 mL) del colorante VEM a valores de pH 4.0, 6.0 y 8.0. ....74

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria textil es una de las más importantes en México. Sin embargo, es una de las industrias con mayor consumo de agua y es conocida por contaminar las aguas superficiales y subterráneas, ya que son receptoras de sustancias que ocupan en sus procesos de producción, sobresaliendo los colorantes como un problema fuertemente notable que altera la calidad del agua y perjudica el desarrollo de los seres vivos. Los colorantes textiles son sustancias que brindan color, al unirse de forma química o por atrapamiento físico, a un material como las fibras textiles (Towns, 2013). Estos se diseñan para ser altamente resistentes, e incluso a la degradación microbiana, por lo que son difíciles de eliminar en las plantas de tratamiento convencionales. Los colorantes se utilizan principalmente para teñir telas y otros materiales como cuero, pieles, cabello, ceras y plásticos. Aunque en México existe una normatividad respecto a este tema muchas empresas no lo implementan y en algunos casos descargan sus aguas en zonas no apropiadas, impactando de forma negativa y significativa para todo el ecosistema y, en última instancia, afectan la fauna acuática, los organismos terrestres y la salud de los seres humanos.

La literatura pertinente ha revelado que los efluentes que contienen colorantes textiles podrían afectar la biota acuática al interrumpir su crecimiento y reproducción. En dichos organismos (peces, plantas), los colorantes textiles afectan su desarrollo, comportamiento e inducen estrés oxidativo. Los seres humanos también están expuestos a los colorantes textiles a través de la cadena alimentaria y al beber agua contaminada. Los colorantes textiles y sus productos biotransformados forman aductos con el ADN y en proteínas en la fracción subcelular. Además, estos compuestos catalizan la producción de radicales libres y estrés oxidativo, y desencadenan las cascadas apoptóticas (serie de procesos moleculares en la célula que conducen a su muerte) para producir lesiones en múltiples órganos. También modulan factores epigenéticos como la ADN metiltransferasa y la histona desacetilasa para promover la carcinogénesis (Dutta *et al.*, 2024). Frente a la problemática de la contaminación del agua, por el uso de colorantes de todo tipo, se han considerado hidrogeles superabsorbentes para el tratamiento de aguas residuales, sintetizados a partir de polímeros naturales, sintéticos o combinados.

Los hidrogeles son polímeros hidrofílicos reticulados que tienen una red tridimensional que permanece insoluble en cualquier disolvente. Estas estructuras tridimensionales pueden absorber agua o fluidos biológicos y permanecer insolubles en el disolvente, por tanto, experimentan un proceso de hinchamiento.

Se llevó a cabo la síntesis de biohidrogeles superabsorbentes (BHS) aniónicos a base de goma xantana y agar-agar entrecruzados, modificando el volumen de

disolvente de reacción (agua desionizada), vía radiación por microondas. Los hidrogeles superabsorbentes se utilizarán en forma de hidrogel y xerogel (hidrogel deshidratado) para comparar su capacidad de remoción de los colorantes catiónicos: azul de metileno (AZM) y verde de malaquita (VEM), los cuales fueron capaces de remover.

## 2. JUSTIFICACIÓN

La industria textil genera efluentes altamente contaminantes que representan una amenaza significativa para el medio ambiente, principalmente por la presencia de colorantes sintéticos. Los colorantes, aún a bajas concentraciones, son altamente visibles y, dependiendo del proceso usado y de la normatividad vigente, es posible requerir de una reducción hasta del 98% de la concentración del colorante presente en el efluente industrial. Por esta razón, existe una fuerte demanda de tecnologías que permitan eliminar el color en estos efluentes y hacer posible reciclar el volumen de agua que se consume durante el proceso.

Se emplean diversos métodos para eliminar colorantes textiles, que incluyen oxidación química, fotoquímica, tratamientos biológicos, intercambio iónico, adsorción y tratamientos físicos. Entre estos tratamientos, la adsorción es una de las técnicas más prometedoras para la eliminación de colorantes de las aguas residuales y ha atraído interés en la investigación como en la industria debido a sus ventajas, como es un equipo de diseño simple, bajo costo, versátil frente a distintos contaminantes, fácil regeneración y efectividad. Por ello se continúa con el desarrollo de opciones más económicas de fácil aplicación que puedan atender el problema.

Los hidrogeles son materiales ampliamente estudiados como adsorbente para la eliminación de colorantes orgánicos de las aguas residuales debido a su excelente absorción de agua, alta porosidad, fácil manejo y fácil preparación, lo que da como resultado una red flexible de cadenas de polímeros que ayuda a la penetración de solutos en la red (Muya *et al.*, 2016). En la actualidad han surgido hidrogeles diseñados como adsorbentes efectivos para la eliminación de una amplia gama de colorantes de las aguas residuales. Por lo que la estructura principal del polímero en estos hidrogeles se puede diseñar con grupos funcionales hidrofílicos específicos, por ejemplo, ácidos carboxílicos, aminas o ácidos sulfónicos, que podrían emplearse como agentes acomplejantes para los colorantes que poseen carga opuesta (Makhado *et al.*, 2018; Hu *et al.*, 2018). Las estructuras tridimensionales de los hidrogeles pueden hincharse hasta varias veces su volumen original en soluciones acuosas, creando un área de contacto superficial muy grande para la adsorción de colorantes orgánicos (Shalla *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2003). Por lo tanto, los

hidrogeles superabsorbentes de origen natural o biohidrogeles aplicados a la remoción o eliminación de colorantes se considera como una alternativa menos costosa y agresiva con el ambiente en comparación con otros métodos.

Bajo este escenario, el presente trabajo se llevo a cabo la descontaminación de sistemas acuosos contaminados con colorantes textiles de tipo catiónicos, resaltando la aplicación de los biohidrogeles superabsorbente a partir de goma de xantana, agar, monómero acrilamida (AAM), el agente entrecruzante N,N'-metilenbisacrilamida (MBA), el iniciador persulfato de potasio (KPS) y agua desionizada como disolvente preparados vía radiación microondas mediante polimerización por radicales libres, para obtener un material adsorbente alternativo y eficaz. Los BHS fueron preparados a diferentes volúmenes de agua para producir biohidrogeles con carga negativa a lo largo de sus cadenas principales y fuertemente aniónico. Se relacionó la capacidad de hidratación de agua con su capacidad de hinchamiento o máxima absorción de agua. Los BHS fueron aplicados para la eliminación de colorantes catiónicos: azul de metileno (AZM) y verde de malaquita (VEM) como colorantes modelo.

### **3. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la eficacia de hidrogeles superabsorbentes formulados a partir de polisacáridos naturales mediante polimerización vía radicales libres asistida por radiación de microondas, en la remoción de colorantes catiónicos en soluciones acuosas, con el fin de proponer una alternativa ecológica en el tratamiento de aguas residuales.

#### **3.1. OBJETIVOS PARTICULARES**

- Determinar el volumen de agua más óptimo para obtener BHS en condiciones de máxima hidratación a base de goma de xantana y agar-agar.
- Calcular el porcentaje de gelación, porcentaje de absorción de agua en el equilibrio, índice de hinchamiento y el porcentaje de hinchamiento de los BHS sintetizados.
- Determinar la capacidad máxima de absorción (cinética de hinchamiento) de agua de los BHS obtenidos, evaluando la relación entre el volumen de agua absorbida y la masa de hidrogeles superabsorbentes.
- Evaluar la capacidad de remoción de colorantes catiónicos en soluciones acuosas a una concentración de 25 ppm mediante el uso de hidrogeles

superabsorbentes a base de goma de xantana y agar-agar, tanto en su forma de hidrogel como de xerogel, a diferentes valores de pH usando espectroscopía UV-Vis.

#### **4. HIPÓTESIS**

Los hidrogeles a base de goma de xantana y agar-agar tendrán una capacidad de absorción de agua superior al 100%, clasificándolos como superabsorbentes. Además, debido a sus largas cadenas poliméricas y la presencia de grupos funcionales, estos hidrogeles serán capaces de remover eficazmente a los colorantes catiónicos.

## 5. MARCO TEÓRICO

### 5.1. Colorantes

Un colorante es una sustancia que puede transferir color a un determinado sustrato (Marcano, 2018). Se utiliza principalmente en la industria textil, cosmética, plásticos, imprenta, farmacéutica y alimentaria (Sartape *et al.*, 2017).

Los colorantes textiles cuentan con grupos funcionales insaturados llamados grupos cromóforos, que absorben la luz de la región UV o visible (Sánchez *et al.*, 2018). Algunos grupos cromóforos son: azo, azoxi, carbonilo, ceto, ciano, metino, nitroso, nitro, tio, etileno (Raman y Kanmani, 2016). También tienen grupos conocidos como auxocromos que mejoran la afinidad de los colorantes en las fibras y aumentan la intensidad (Sánchez *et al.*, 2018). Por ejemplo: amina, amino, hidroxilo, carboxilo, ácido sulfónico, metilamino, dimetilamino, alcoxi (Raman y Kanmani, 2016). El resumen de los grupos cromóforos y auxocromos se presenta en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Algunos grupos cromóforos y auxocromos en los colorantes textiles.

Grupo funcional	Fórmula general	Tipo	Grupo funcional	Fórmula general	Tipo
<b>Azo</b>	(-N=N-)	Cromóforo	<b>Ácido sulfónico</b>	(-SO <sub>3</sub> H)	Auxocromo
<b>Azoxi</b>	(-N(O)=N-)	Cromóforo	<b>Alcoxi</b>	(-O-R)	Auxocromo
<b>Carbonilo</b>	(-C=O)	Cromóforo	<b>Amina</b>	(R-NH <sub>2</sub> , R <sub>2</sub> -NH, R <sub>3</sub> -N)	Auxocromo
<b>Ceto</b>	(-C=O-)	Cromóforo	<b>Amino</b>	(-NH <sub>2</sub> )	Auxocromo
<b>Ciano</b>	(-C≡N)	Cromóforo	<b>Carboxilo</b>	(-COOH)	Auxocromo
<b>Metino</b>	(=CH-)	Cromóforo	<b>Dimetilamino</b>	(-N(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	Auxocromo
<b>Nitroso</b>	(-N=O)	Cromóforo	<b>Hidroxilo</b>	(-OH)	Auxocromo
<b>Nitro</b>	(-NO <sub>2</sub> )	Cromóforo	<b>Metilamino</b>	(-NHCH <sub>3</sub> )	Auxocromo
<b>Etileno</b>	(-CH=CH-)	Cromóforo	<b>Tio</b>	(-S-)	Auxocromo

#### 5.1.1. Clasificación

Los colorantes naturales se obtienen de flores, raíces, minerales, moluscos, conchas, insectos y animales, sin embargo, no mantienen el color tras lavados y la exposición a la luz solar (Sharma *et al.*, 2023). Se conocen como colorantes sustantivos a los que no requieren un producto químico para adherirse a la fibra,

mientras que los adjetivos necesitan una sal metálica para evitar la pérdida de color. De acuerdo con su estructura química pueden clasificarse como polifenoles, isoprenoides, compuestos heterocíclicos, melanina y tetrapirroles (Che y Yang, 2022).

Desde 1956 se empezaron a crear compuestos orgánicos insaturados, complejos, solubles en agua o en aceite que tras la absorción de luz el color resiste, los cuales se clasifican de acuerdo con su estructura química en: azo, antraquinona, acridina, oxazina, difenilmetano, trifenilmetano, ftalocianina, azina, indigoide, nitroso, nitro, metina, tiazina y xanteno, por otro lado, según sea su aplicación son conocidos como ácidos, básicos, dispersos, reactivos, directos y mordientes (Sharma *et al.*, 2023). Gran parte de los colorantes sintéticos cuentan con estructuras aromáticas estabilizadas por resonancia, por lo que son difíciles de degradar (Rahul y Jindal, 2024). La estabilidad del colorante ante la luz disminuye dependiendo de la estructura química de la siguiente forma: quinolinas > antraquinonas > trifenilmetanos > azo > fluoran > pirenos (Marcano, 2018).

### **5.1.2. Colorantes textiles de interés y contaminación ambiental**

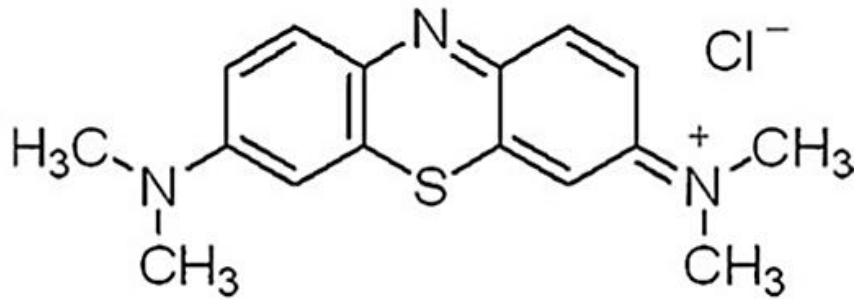
Los colorantes sintéticos son problemáticos por sus estructuras difíciles de romper, por lo que persisten en el medio ambiente perjudicando a los seres vivos que se exponen a estos en aguas residuales (Ahmaruzzaman *et al.*, 2023).

#### **5.1.2.1. Azul de metileno**

El azul de metileno (Figura 1), es un colorante que contiene el anillo tiazina catiónico aromático heterocíclico (Njuguna y Schönherr, 2022). Es conocido como cloruro de 3,7-bis(dimetilamino)-fenotiazina-5-ilo (Choudhary *et al.*, 2020). Se usa como indicador químico, en la industria textil, cosmética, papel, plásticos y en medicamentos (Yang *et al.*, 2022). En la industria textil se utiliza principalmente para el algodón, lana y seda (Khan *et al.*, 2022). Su fórmula molecular es  $C_{16}H_{18}N_3SCl$ .

El azul de metileno puede filtrarse en las células aprovechando que la superficie de las membranas está cargada negativamente (Choudhary *et al.*, 2020). En las personas es capaz de generar problemas respiratorios, náuseas, vómitos, formación de cuerpo de Heinz, sudoración excesiva, ictericia, shock, confusión mental y metahemoglobinemia (Sivakumar y Lee, 2022; Choudhary *et al.*, 2020). Las inyecciones con dosis más altas a 5 mg/Kg de peso corporal pueden provocar

metahemoglobinemia, también puede competir con la monoaminooxidasa y provocar el síndrome de serotonina (Yang *et al.*, 2022).



**Figura 1.** Estructura química del colorante azul de metileno.

*Nota:* Obtenido de Khan *et al.*, 2022.

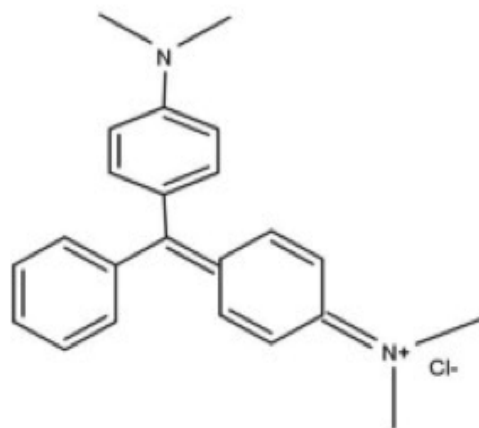
Los anillos presentes en el azul de metileno lo convierten en una sustancia difícil de degradar, además de que puede generar especies reactivas de oxígeno por acción de la luz solar que pueden destruir las células de los organismos por su alta reactividad química (Yang *et al.*, 2022).

#### 5.1.2.2. Verde de malaquita

El verde malaquita (Figura 2), es un colorante diaminotrifetilmetano ligeramente básico hidrosoluble que está completamente ionizado a pH 4, a pH 6.9 un 50% ionizado, en pH 7.4 solo 25% ionizado y 0% a pH 10.1 (Sharma *et al.*, 2023). Su fórmula molecular es  $C_{23}H_{25}N_2Cl$ .

Aunque es considerado tóxico sigue siendo utilizado por su bajo costo y efectividad (Choudhary *et al.*, 2020). Se emplea como colorante para yute, papel, algodón, lana, seda, fibras acrílicas y cuero, en tinción, medicina forense y en medicina veterinaria como antifúngico, además en acuicultura se aplica como antimicrobiano y antiparasitario desde 1930 (Pramanik *et al.*, 2024; Sharma *et al.*, 2023).

El verde malaquita en humanos puede causar irritación ocular, cutánea, problemas respiratorios, así como efectos adversos en el sistema nervioso, el corazón, el hígado, los riñones, el bazo, el cerebro y los huesos, además de que cuenta con propiedades mutagénicas, teratogénicas y cancerígenas (Pramanik *et al.*, 2024; Sharma *et al.*, 2023; Sartape *et al.*, 2017).



**Figura 2.** Estructura química del colorante textil verde de malaquita.

*Nota:* Obtenido de *Sharma et al., 2023.*

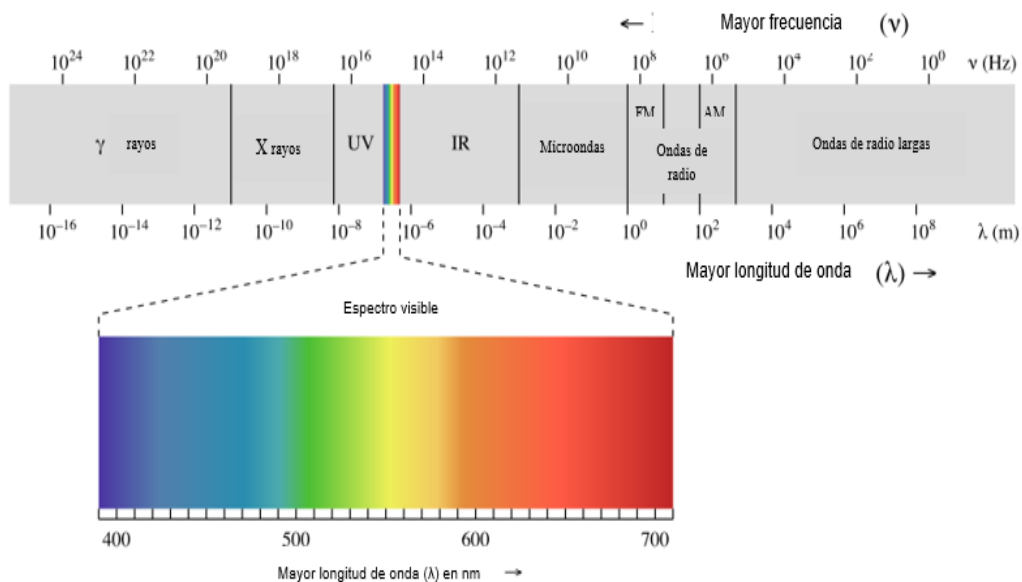
En el medio ambiente, el verde de malaquita es persistente y bioacumulativo (Rahul y Jindal, 2024). En los peces es persistente en los tejidos grasos en la forma de verde de leucomalaquita tras su metabolización (Pramanik *et al.*, 2024). Ocurren tres reacciones importantes: N-desmetilación, hidroxilación y escisión de la estructura conjuntiva que genera derivados de benzofenona (Sharma *et al.*, 2023).

### 5.1.3. Espectrofotometría de Absorción Ultravioleta y visible (UV-Vis)

La radiación electromagnética es energía que viaja en forma de onda y el ser humano sólo puede percibir una parte: el espectro visible (Figura 3), el cual va de 380 a 780 nanómetros, se divide en rojo, naranja, amarillo, verde, azul, índigo y violeta (Harris, 2007). En sí, cuando un objeto refleja todas las longitudes de onda se percibe como blanco, mientras que si las absorbe todas se percibe el negro.

Cuando la luz choca en una superficie esta absorbe una parte y refleja otra que percibimos de un color determinado. Una forma de analizar una muestra coloreada, de forma cualitativa y cuantitativa, es incidirla con radiación ultravioleta y visible. Cuando la molécula es expuesta a ese tipo de energía los electrones pasan a orbitales de mayor energía y se mide la cantidad de luz absorbida (Skoog *et al.*, 2014; Harris, 2007).

El aparato utilizado para mediar la absorción es el espectrofotómetro, el cual cuenta con: una fuente de luz, un selector de longitud de onda, un contenedor de muestra, un detector de radiación y un hardware que interprete la energía radiante en señal eléctrica para recolectar la información en una gráfica de absorbancia frente a la longitud de onda, conocido como espectro de absorción (Skoog *et al.*, 2014).



**Figura 3.** El espectro electromagnético.

Nota: Obtenido de ChemWiki de UC Davis (Universidad de California en Davis). Chemistry LibreText. Bajo licencia CC-BY-NC-SA 3.0.

El color observado (Tabla 2), se conoce como complementario del absorbido (Harris, 2007). Es importante que al analizar una muestra se utilice la longitud de onda complementaria al color de la muestra (Skoog *et al.*, 2014).

**Tabla 2.** Color absorbido y observado en una sustancia.

$\lambda$ (nm)	Color absorbido	Complementario Color observado
380-420	Violeta	amarillo-verde
420-440	azul-violeta	Amarillo
440-470	Azul	Naranja
470-500	verde-azul	Rojo
500-520	Verde	Púrpura
520-550	amarillo-verde	Violeta
550-580	Amarillo	azul-violeta
580-620	Naranja	Azul
620-680	Rojo	verde-azul
680-780	Púrpura	Verde

Nota: Adaptado de Harris, 2007.

## 5.2. Contaminación del agua

De acuerdo con datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés), de toda el agua que hay en el planeta, solo 2.5 % es dulce, de la cual 99% en estado líquido es subterránea. Esta es utilizada un 12% para hogares y servicios, las industrias ocupan el 16% y el resto con destino para la agricultura (FAO, 2023). Tras ser utilizada en diferentes actividades humanas, se generan aguas residuales de composición variada (pueden contener aceites, detergentes, pesticidas, herbicidas, metales pesados, desechos radiactivos, colorantes, aromáticos y derivados, microplásticos, drogas, fármacos, hormonas, virus, bacterias, hongos, protozoos y helmintos), las cuales suelen ser recolectadas mediante drenajes o son vertidas en cuerpos de aguas naturales, lo que provoca el deterioro de los ecosistemas, ya que estos, aunque cuentan con procesos físicos, químicos y biológicos que se encargan de mantener el equilibrio, los altos niveles de contaminantes superan su capacidad de regulación (SEMARNAT, 2016; Hossain *et al.*, 2023).

Ante los retos que conlleva el uso del agua dulce ante el crecimiento de la población, la contaminación, la extracción excesiva y la mala gestión del recurso hidráulico, la FAO, sigue recomendando a los gobiernos la implementación de políticas que permitan el uso eficiente y la economía circular, de la mano de la inversión, innovación, investigación e infraestructura (FAO, 2023).

### 5.2.1. Aguas residuales textiles

La industria textil requiere de 215 billones de litros al año y se desperdicia un 20% del agua total a nivel mundial (ONU, 2019). En México, la industria textil utiliza 7,600 litros por cada kilogramo de producto terminado (Valderrama *et al.*, 2020). Se reporta que sólo un 11.3% de las aguas generadas por el sector de fabricación de insumos, acabados textiles y prendas de vestir recibieron algún tratamiento (INEGI, 2021).

Anualmente, a nivel mundial se producen aproximadamente  $7 \times 10^7$  toneladas de colorantes sintéticos destinados para la industria textil, en cuya elaboración se pueden utilizar metales como mercurio, cromo, cadmio, plomo y arsénico (Al-Tohamy *et al.*, 2022). El incorrecto manejo de los colorantes durante el proceso de teñido y acabado se refleja en hasta 200,000 toneladas anuales de colorantes vertidos en aguas residuales (Islam *et al.*, 2023). Esto genera un problema de gran relevancia, ya que el agua es un disolvente ideal para sustancias polares e iónicas,

por lo que cuando se vierten aguas residuales en cuerpos naturales, se facilita la dispersión y persistencia de los contaminantes.

#### **5.2.1.1. Impacto de las aguas residuales textiles coloreadas en la fauna, flora y seres humanos**

En muchas regiones del mundo, los cuerpos de agua naturales cercanos a las industrias textiles se han ido convirtiendo en vertederos de aguas residuales, donde los colorantes reaccionan y generan productos más tóxicos (Sharma *et al.*, 2023). En sí, muchos de los colorantes y subproductos son cancerígenos, mutagénicos y teratogénicos (Islam *et al.*, 2023). Por lo que, las personas expuestas a estas aguas residuales pueden presentar irritación en la piel, mutaciones genéticas, problemas digestivos, cáncer, trastornos cerebrales, daños en el sistema reproductivo, entre otros (Rahul y Jindal, 2024). Además, en varios países no se tratan las aguas residuales industriales antes de utilizarlas en los cultivos, por lo que los productos tóxicos reducen la fertilidad del suelo (Al-Tohamy *et al.*, 2022).

En general, los colorantes impiden la entrada de los rayos del sol dentro de los cauces, favoreciendo variaciones de pH y temperatura, dificultando procesos de fotosíntesis e impactando en el desarrollo de los seres vivos. También favorecen a niveles altos de demanda biológica de oxígeno, demanda química de oxígeno, carbono orgánico total, sólidos en suspensión y sólidos disueltos, que pueden dificultar la oxigenación de los ambientes acuáticos y en el proceso de ventilación branquial de los peces, provocándoles un bajo crecimiento o la muerte, además que el consumo de estos organismos puede ser perjudicial para la salud (Al-Tohamy *et al.*, 2022).

#### **5.2.1.2. Tratamientos utilizados para aguas residuales textiles coloreadas**

El principal problema en el tratamiento de aguas residuales coloreadas es la existencia de métodos que son específicos para ciertos contaminantes, y aunque son eficientes, los costos son elevados, además de que algunas técnicas son ineficaces al descomponer a los cromóforos y generar residuos (Choudhary *et al.*, 2020). Las plantas de tratamiento de aguas textiles generan lodos concentrados que deben ser tratados de forma adecuada (Al-Tohamy *et al.*, 2022).

Entre los métodos más utilizados está la filtración por membrana, oxidación química, coagulación, floculación, degradación catalítica, electrólisis, fotodegradación, intercambio iónico, adsorción y métodos biológicos con plantas, hongos, algas, bacterias y levaduras (Sharma *et al.*, 2023). Cada método tiene sus inconvenientes,

los métodos químicos son caros y los métodos biológicos usan organismos que requieren de entornos específicos (Pramanik *et al.*, 2024). Por otro lado, los altos niveles de DBO, DQO, variación de pH, mezcla de colorantes y metales pesados dificultan su tratamiento por métodos físicos (Al-Tohamy *et al.*, 2022).

En el proceso de adsorción las moléculas dispersas en un medio acuoso se adhieren a la superficie de un material por interacciones físicas o químicas. (Sivakumar y Lee, 2022). Este proceso aplicado al tratamiento de las aguas residuales se ha considerado mejor en comparación con la oxidación biológica y química (Yang *et al.*, 2022). Las fuerzas de interacción entre el material y las moléculas de colorante (fuerzas de Van der Waals, puentes de hidrógeno, interacciones hidrofóbicas y electrostáticas) favorecen la remoción de colorantes orgánicos (Islam *et al.*, 2023).

#### **5.2.1.2.1. Adsorción de colorantes en medios acuosos con hidrogeles**

La afinidad de los hidrogeles por el agua, su porosidad y redes reticuladas permiten que el material pueda incrementar su tamaño por rápida adsorción de los solutos mediante difusión, donde los grupos funcionales con  $-NH_2$ ,  $-OH$ ,  $-COOH$  portan pares de electrones libres que interaccionan con las cargas positivas de los colorantes (Sivakumar y Lee, 2022; Yang *et al.*, 2022). La presencia de los grupos:  $-SO_3H$ ,  $-CONH_2$  y  $-COOH$  en las redes de los hidrogeles favorece las interacciones con iones metálicos y colorantes en aguas residuales (Choudhary *et al.*, 2020).

Los hidrogeles a base de polímeros sintéticos han dado buenos resultados en la remoción de colorantes textiles, sin embargo, las investigaciones actuales han centrado su atención en obtener hidrogeles fácilmente degradables, por lo cual se ha implementado la síntesis de hidrogeles superabsorbentes a base de polímeros naturales (Rahul y Jindal, 2024). Algunos polisacáridos naturales para la síntesis de hidrogeles superabsorbentes son: goma guar, goma karaya, goma arábica, el quitosano y la goma xantana (Choudhary *et al.*, 2020). Esas estructuras químicas (polisacáridos) conllevan principalmente grupos hidroxilo y otros grupos funcionales propios de los polisacáridos naturales, los cuales brindan a los hidrogeles de una cadena polimérica flexible y alta reactividad química, para la adsorción de sustancias contaminantes (Resende *et al.*, 2023).

### **5.3. Hidrogeles y casos aplicados en la remoción de colorantes textiles**

Los hidrogeles son redes de polímeros, con estructuras lineales o ramificadas, unidas por enlaces covalentes o interacciones físicas (Ortíz *et al.*, 2021; Qureshi *et*

*al.*, 2020). Cuentan con grupos funcionales que son afines con el agua como: carboxilo ( $-\text{COOH}$ ), amina ( $-\text{NH}_2$ ), amida ( $-\text{CONH}_2$ ), hidroxilo ( $-\text{OH}$ ) y sulfónico ( $-\text{SO}_3$ ) (Resende *et al.*, 2023). Los hidrogeles superabsorbentes son capaces de absorber grandes cantidades de agua porque generalmente cuentan con monómeros iónicos y tienen bajo grado de reticulación, por lo que pueden aumentar hasta 1000 veces su propio peso mientras que los convencionales alcanzan hasta 10 veces su peso seco (Mignon *et al.*, 2019).

Dada su resistencia mecánica son utilizados para diversos fines en medios acuosos, ya que pueden retener sustancias que se adsorben y absorben a la estructura del hidrogel.

Al estar en contacto con el agua la estructura pasa por fluctuaciones de crecimiento, es decir, se hidratan y por tanto se lleva a cabo un proceso de hinchamiento. El líquido que entra por los poros disuelve algunas cadenas lineales hidrofílicas, por la compatibilidad termodinámica, mientras que los puntos de reticulación tratan de compensar la solubilidad con la fuerza de retracción elástica hasta lograr un balance con las fuerzas osmóticas y llegar a un equilibrio fisicoquímico (Ramírez *et al.*, 2016; Ullah *et al.*, 2015).

Hay factores que repercuten en el hinchamiento que puede alcanzar el hidrogel. La difusión de los fluidos en el interior de la estructura depende de la libertad de las cadenas para moverse, además de que puede verse afectada por factores fisicoquímicos como la temperatura, la luz, la presión o por estímulos químicos como el pH, la fuerza iónica, las especies moleculares y la naturaleza del disolvente (Ortiz *et al.*, 2021; Ahmed, 2015). El material obtenido tras secar el hidrogel se le conoce como xerogel.

### **5.3.1. Hidrogeles sintéticos y naturales**

#### **5.3.1.1. Hidrogeles sintéticos**

Los seres humanos a través de la observación y la experimentación han logrado obtener avances en la ciencia gracias a la imitación, réplica y aprovechamiento de características encontradas en la naturaleza. En 1938, Kern polimerizó una solución de ácido acrílico y divinilbenceno, iniciando así con los polímeros superabsorbentes (El Idrissi *et al.*, 2024). En el campo médico, en la búsqueda de un material blando, resistente a la degradación enzimática y que no dejará residuos en los tejidos de contacto, Wichterle y Lim en 1960 obtuvieron, por medio de polimerización de radicales libres de metacrilato de 2-hidroxietilo en solución acuosa con dimetacrilato

de etilenglicol como reticulante, un hidrogel que se usó como lentes de contacto (Buwalda *et al.*, 2014; Bashir *et al.*, 2020).

Las investigaciones para mejorar los métodos de síntesis se desarrollaron mediante la sustitución e incorporación de reactivos de tipo sintético, seminaturales y naturales, para lograr propiedades específicas, entre ellas la resistencia y durabilidad a los hidrogeles. Alrededor de los años de 1970, se utilizaron diferentes reactivos para desarrollar hidrogeles con mayor biocompatibilidad mediante la incorporación de acrilamidas, N-vinilpirrolidona y acetato de vinilo para mejorar a biocompatibilidad (Dodda *et al.*, 2023).

### **5.3.1.2. Hidrogeles naturales**

Los hidrogeles naturales, que utilizan como base polisacáridos naturales obtenidos de conchas de crustáceos marinos, algas, plantas y animales, se forman mediante la unión de monosacáridos por medio de enlaces glucosídicos. Se pueden utilizar proteínas como el colágeno, la elastina y otros derivados de animales. El aumento de su uso se debe a que estos polímeros suelen ser de alto peso molecular, óptima solubilidad, estables en diferentes rangos de pH, no tóxicos, biocompatibles y biodegradables (El Idrissi *et al.*, 2024; Dodda *et al.*, 2023). Además, la abundancia de estos, hacen que los costos de elaboración sean bajos.

Dado que los hidrogeles se caracterizan por su consistencia blanda y gomosa tienen un parecido con el tejido vivo, por lo que pueden mantener su estructura en ambientes húmedos (Resende *et al.*, 2023). Gracias a los grupos funcionales reactivos presentes, de acuerdo con los polímeros naturales utilizados, pueden reaccionar a diferentes factores externos, permitiendo que sean adecuados en la liberación o retención de sustancias (Zhang y Zhao, 2020; Ullah *et al.*, 2015).

En 1973 se elaboró el primer hidrogel superabsorbente implementado con almidón. Es uno de los polímeros más utilizados en la elaboración de hidrogeles superabsorbentes por su abundancia de grupos hidroxilo. Entre los métodos más comunes en la síntesis de hidrogeles con este polímero está el injerto y la copolimerización (Rather *et al.*, 2022).

El quitosano es un polisacárido lineal que cuenta con grupos funcionales favorables para el tratamiento de aguas residuales como amino e hidroxilo (Sivakumar y Lee, 2022). Además, los grupos mencionados son clave para la elaboración de hidrogeles superabsorbentes mediante reacciones específicas de injerto y reticulación con otras identidades químicas hidrofílicas (Rather *et al.*, 2022).

### 5.3.1.2.1. Polisacáridos

En la naturaleza se encuentran polímeros producidos por seres vivos. Los biopolímeros son materiales abundantes, altamente estables, biodegradables, que cuentan en sus estructuras con grupos funcionales como hidroxilo, amida, sulfónico, amino y carboxilo, que los hacen ideales para ser la columna vertebral en la síntesis de hidrogeles (Resende *et al.*, 2023; Mehta *et al.*, 2023). Entre los polímeros naturales utilizados en la elaboración de estos materiales se encuentra: goma guar, quitosano, tapioca, goma xantana, celulosa, goma ghatti, alginato, colágeno, fibrina, almidón, ácido hialurónico, entre otros (Dooda *et al.*, 2023; Mehta *et al.*, 2023).

#### 5.3.1.2.1.1. Goma de xantana

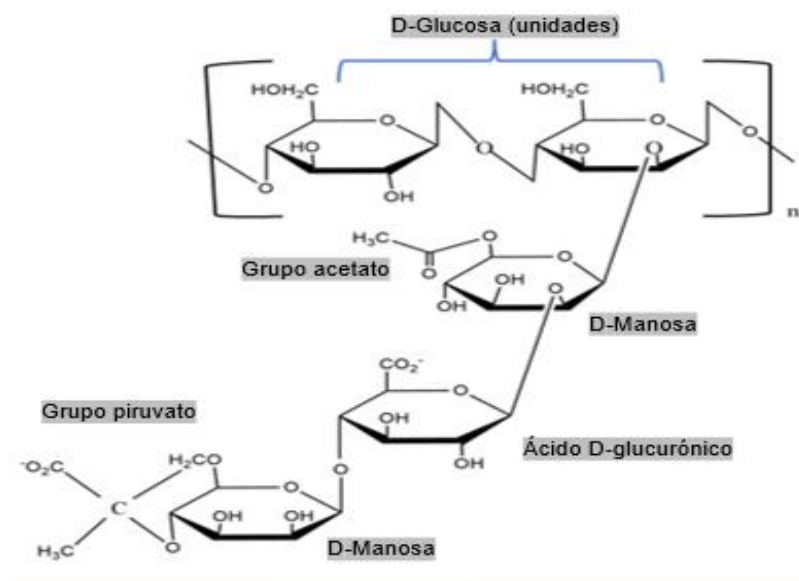
La goma de xantana fue descubierta en 1950, producida de forma industrial en 1960, empezó a ser comercializada en 1964 y en 1968 fue aprobada para uso alimenticio (García *et al.*, 2000; Bhat *et al.*, 2022). Este polisacárido extracelular se obtiene por fermentación aeróbica, principalmente de caña de azúcar o maíz y sus derivados, con la bacteria gramnegativa *Xanthomonas campestris* y es comúnmente utilizada como agente espesante, emulsionante y estabilizante en alimentos, ya que, soporta variaciones de pH entre 1 a 13, resiste a la degradación enzimática y aunque su viscosidad se ve afectada por encima de los 65°C es fácil de recuperar al enfriarse (Feiner, 2006; McArdle y Hamill, 2011; Pathak *et al.*, 2021; Bueno *et al.*, 2013). Otras especies que pueden producir goma xantana son *X. axonopodis*, *X. arboricola*, *X. fragaria*, *X. citri*, *X. gummisudans*, *X. phaseoli*, *X. juglandis*, *X. malvacearum*, *X. vascolorium* y *X. carotae* (Murad *et al.*, 2019; Nasrollahzadeh *et al.*, 2021). La obtención de este polímero depende de las condiciones óptimas para la fermentación: sistema, fuentes de carbono y nitrógeno, especie a cultivar, pH, temperatura y concentración de oxígeno disuelto (Murad *et al.*, 2019).

Como se observa en la Figura 4, la goma de xantana está formada por una columna vertebral lineal de  $\beta$ -D-glucosa, donde cada dos unidades hay una unión en el C-3 con un trisacárido formado por dos manosas separadas por un ácido glucurónico con proporciones variables de O-acetilo y piruvilo (Krasaekoopt y Bhandari, 2012; Nsengiyumva *et al.*, 2024; Kumar *et al.*, 2018). El enlace que une a la glucosa con la manosa es glicosídico  $\beta$ -(1  $\rightarrow$  4) y los enlaces entre las manosas y el ácido glucurónico son glicosídicos  $\beta$ -(1  $\rightarrow$  2) (Hassanisaadi *et al.*, 2025).

La estabilidad se relaciona con la estructura primaria de las cadenas y de la identidad en la manosa externa, viéndose más estable con la acetilación (Bhat *et al.*, 2022). Las cadenas de la goma pueden estar desordenadas y flexibles o en hélice

simple o doble dependiendo de la temperatura y la fuerza iónica, por lo que la molécula se encuentra estable y mejor protegida cuando mantiene la estructura helicoidal orientada (Bueno *et al.*, 2013; Mehvari *et al.*, 2024).

La GX es polianiónica, ya que el ácido pirúvico a mitad de la manosa terminal otorga a la molécula de una carga negativa, independientemente del pH, además de que cuenta con grupos carboxilo en las cadenas laterales de la molécula (Fallourd y Viscione, 2009; Feiner, 2006). A un pH aproximado a 4.5 ocurre una desprotonación en el O-acetilo y piruvil, lo que aumenta la densidad de carga de la molécula, pero si el pH es mayor a 4.5 se comporta como un polianión (Bueno *et al.*, 2013; Kumar *et al.*, 2018). La concentración de piruvil influye en la calidad del gel, por lo que la viscosidad es favorecida ante altas cantidades (Bhat *et al.*, 2022).



**Figura 4.** Estructura de la goma de xantana.

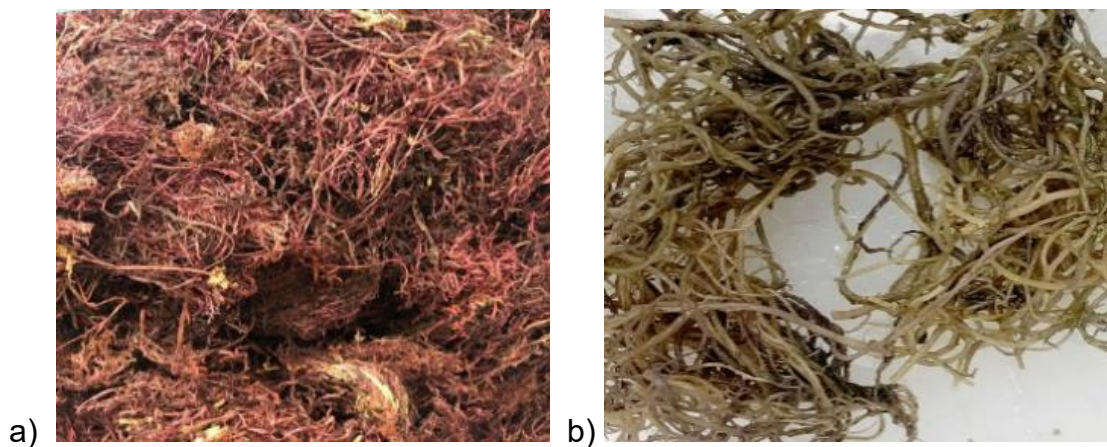
*Nota:* Tomado de Jadav *et al.*, 2023.

### 5.3.1.2.1.2. Agar-agar

El agar tiene sus orígenes en Japón donde se utilizaba como ingrediente para preparar alimentos (Shah *et al.*, 2024). En 1859 se empezó a utilizar en Europa y para 1882 se aplicó en medios de cultivo bacteriológico (Armisen y Gaiatas, 2009). Se encuentra en las paredes celulares de algunas algas de la familia Rhodophyceae como *Gelidium*, *Gelidiella*, *Pterocladia* y *Ahnfeltia* (Rani *et al.*, 2014). La Figura 5, muestra las dos principales algas de las que se obtiene agar, siendo de mejor calidad el que se extrae de *Gelidium* pero su reserva natural es limitada, por lo que

se recurre a *Gracilaria* que es más fácil de cultivar en varios países (Shah *et al.*, 2024).

Los dos polímeros que conforman al agar están formados por los mismos monómeros, pero tienen diferente estructura (Bertasa *et al.*, 2020). Araki fue quien determinó que la estructura química del agar está compuesta principalmente por agarosa y agarpectina (Shah *et al.*, 2024). La agarosa (Figura 6), es de naturaleza neutra y está formada por unidades lineales repetidas de  $\beta$ -D-galactosa y 3,6-anhidro- $\alpha$ -L-galactosa. La agarpectina es una fracción ramificada y sulfatada no gelificante que se suele eliminar en gran medida durante la fabricación comercial de agar para obtener polvos altamente gelificantes (Mostafavi y Zaeim, 2020). En sí, la parte 3,6-anhidro-L-galactosa de la agarpectina puede ser sustituida por grupos L-galactosa-6-sulfato, metoxi o piruvato (Khoobakht *et al.*, 2024).



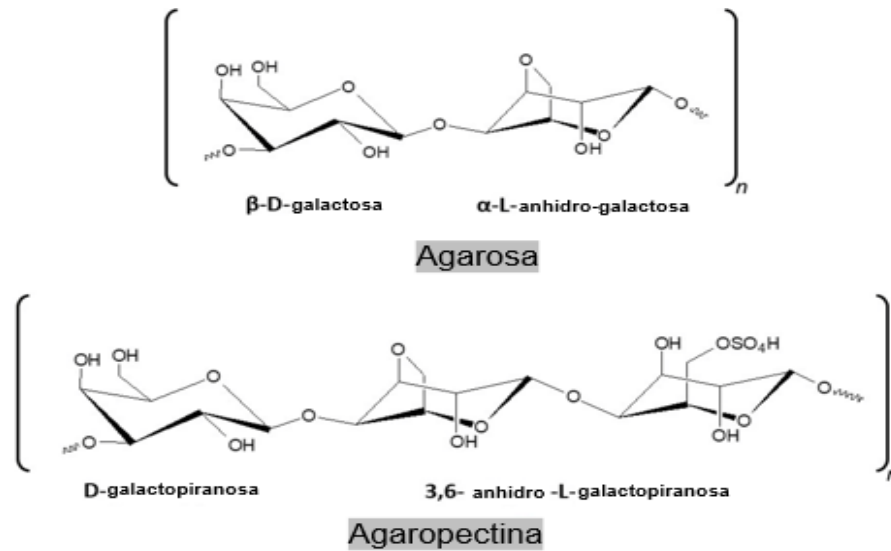
**Figura 5.** Principales algas de las que se obtiene agar.

*Nota:* a) Gelidium, b) Gracilaria. Tomado de [cybercolloids.net](http://cybercolloids.net)

El agar contiene un 70% de agarosa (Shah *et al.*, 2024). La agarosa es la fracción que más influye en las propiedades gelificantes del agar, mientras que la agarpectina tiene grupos laterales en su estructura que dificultan la formación de geles (Bertasa *et al.*, 2020; Khoobakht *et al.*, 2024).

El agar es un material versátil que soporta tratamientos térmicos mayores a 100°C y que al enfriarse por debajo de 35 a 45 °C forma geles firmes y estables que se mantienen hasta cerca de los 85°C (Sudha *et al.*, 2014; Shah *et al.*, 2024). Al gelificarse, los enlaces de hidrógeno formados entre las moléculas de agarosa generan una red de dobles hélices que se estabiliza con las moléculas de agua, permitiendo así que pueda almacenar grandes cantidades de agua (Mostafavi y Zaeim, 2020). Se pueden obtener geles desde una concentración de 0.1%, por lo que se utiliza en diversas formulaciones como estabilizador, gelificante y anticongelante en alimentos procesados, cosméticos, productos farmacéuticos y

medios de cultivo (Yuan *et al.*, 2024; Shah *et al.*, 2024). Dependiendo del tipo de alga, condiciones ambientales durante su crecimiento, factores fisiológicos y métodos de extracción, la cantidad de sulfatos y unidades anhidras variarán y por ende se verá reflejado en las propiedades mecánicas de los geles (Bertasa *et al.*, 2020).



**Figura 6.** Estructura de la agarosa.

*Nota:* Tomado de Belattmania *et al.*, 2021.

### 5.3.2. Clasificación de hidrogeles superabsorbentes

Los hidrogeles se clasifican de acuerdo con el tipo de polímero utilizado como columna vertebral, el método de preparación, el tipo de reticulación, las cargas de los grupos presentes, a su respuesta ante factores inducidos, aspectos físico y degradación (Mehta *et al.*, 2023; Dodda *et al.*, 2023). En la Figura 7, se muestra un esquema de la clasificación de los hidrogeles.

#### 5.3.2.1. En relación con su origen

Los hidrogeles de origen natural se hacen a base de polímeros obtenidos de plantas, algas, microorganismos o animales como lo son las proteínas y los polisacáridos, por lo que son biodegradables y pueden ser biocompatibles (Mehta *et al.*, 2023). Los polisacáridos son moléculas poliméricas de carbohidratos que cuentan con un gran número de grupos funcionales que los vuelven altamente reactivos mientras que las proteínas cuentan con una o más cadenas largas de residuos de aminoácidos que se utilizan como protección ante el pH, la luz y el vapor de agua (Resende *et al.*,

2023). También se utilizan aceites de plantas y animales como precursores de cadenas monoméricas de varios polímeros (Mehta *et al.*, 2023).

En general, los hidrogeles naturales son sensibles a estímulos externos, por lo que son considerados como materiales inteligentes, aunque sus propiedades mecánicas son bajas (Resende *et al.*, 2023). Dado que las propiedades de los polímeros naturales pueden variar debido a los procesos de extracción, fuente, ubicación y otras condiciones al momento de su elaboración, siguen en desarrollo en busca de que sean competentes en el mercado (El Idrissi *et al.*, 2024). Por otro lado, los hidrogeles elaborados con polímeros sintéticos tienen una vida útil controlada, son altamente puros, tienen alta capacidad de absorción, cuentan con estructuras definidas y sus propiedades mecánicas estables hacen que resistan a las variaciones de pH, temperatura y presión (Sennakesavan, 2020; Ullah, 2015).

Algunos polímeros sintéticos utilizados en la síntesis de hidrogeles son: alcohol polivinílico (PVA); ácido poliláctico conocido como PLA; polietilenglicol por sus iniciales: PEG; el ácido poli(láctico-co-glicólico) también reconocido como PLGA; poli (metacrilato de metilo) por sus siglas: PMMA (Mehta *et al.*, 2023; Resende *et al.*, 2023).

En los hidrogeles híbridos se mejoran las propiedades mecánicas poliméricas de los materiales naturales mediante la implementación de polímeros sintéticos (Elsayed, 2019). Principalmente se suele recurrir al injerto de monómeros de un tipo sobre la columna vertebral de otro o mediante la reticulación de las cadenas poliméricas naturales y sintéticas (Mehta *et al.*, 2023). El PEG es ampliamente utilizado por ser soluble en agua, biocompatible y biodegradable, por lo que se suele conjugar con péptidos y proteínas o injertar en algunos polímeros naturales para mejorar propiedades específicas y obtener hidrogeles que sirvan como matriz y vehículo de administración de fármacos (Bashir *et al.*, 2020; Lin y Anseth, 2009). Otro material utilizado por ser degradable y mejorar las propiedades mecánicas de los hidrogeles es el PVA (Mehta *et al.*, 2023).

### **5.3.2.2. En relación con su carga iónica**

Dependiendo de la carga de la cadena polimérica los hidrogeles se pueden clasificar como catiónicos, aniónicos, neutros y anfóteros (Dodda *et al.*, 2023). Si es neutro las interacciones entre el agua y el polímero se encargarán de la expansión del material, los que tienen carga positiva (aminas) responden mejor en medios acuosos de pH bajos, mientras que los aniónicos (ácido carboxílico) se disocian mejor entre más alto sea el pH, en el caso de los anfóteros con sus grupos ácidos y bases son

sensibles a variaciones mínimas de pH que repercuten en su estructura (Mehta *et al.*, 2023; Thakur *et al.*, 2018).

### **5.3.2.3. En relación con su reticulación**

Los hidrogeles de reticulación física son considerados reversibles, ya que las moléculas se unen por medio de enlaces iónicos, puentes de hidrógeno y por interacciones hidrofóbicas (Mehta *et al.*, 2023). Son fáciles de elaborar, modificar y no son tóxicos a comparación con los reticulados químicamente, además, en algunos casos no es necesario agregar iniciador (Ullah *et al.*, 2015; Qureshi *et al.*, 2020).

En los hidrogeles con reticulación química, los enlaces suelen ser más fuertes y estables, ya que entre los métodos más empleados ocurren reacciones químicas entre las cadenas y grupos funcionales fomentados por la técnica, el reticulante y el tipo de energía empleado (Dodda *et al.*, 2023). Los reticulantes de bajo peso molecular, como bórax o 3,3'-ditiobis(propionohidrazida) conocido como DTP, fomentan la formación de enlaces covalentes entre los grupos hidroxilo y amino con otras moléculas de la cadena (Han *et al.*, 2024; Ullah *et al.*, 2015).

### **5.3.2.4. En relación con su composición polimérica**

Los hidrogeles homopoliméricos son redes poliméricas entre unidades de un solo tipo de monómero (Ullah *et al.*, 2015). La estructura depende del método de polimerización, así como de los monómeros y reticulantes agregados (Mehta *et al.*, 2023).

Se conoce como tipo copolimérico a los materiales compuestos por diferentes especies de monómero, donde uno debe ser hidrofílico para que el material tenga la capacidad de hincharse (Thakur *et al.*, 2018; Ahmed, 2015). La configuración de las cadenas puede ser en bloque, injerto, alternante o aleatoria dependiendo de la reactividad de los monómeros y se utiliza para incorporar o mejorar, en alguno de los monómeros, una propiedad en particular de respuesta ante un factor físico o químico (Ramírez *et al.*, 2016; Mehta *et al.*, 2023).

Los hidrogeles interpenetrados (IPN) se obtienen al mezclar dos o más redes poliméricas diferentes, sin la formación de enlaces covalentes, más bien se entrelazan (Soto y Oliva, 2012; Afrin *et al.*, 2022). El producto cuenta con una combinación de propiedades brindadas por cada red, por lo que suelen tener buena resistencia mecánica y química (Seyrig *et al.*, 2023; Zoratto y Matricardi, 2018). La

primera red ya formada se hincha en el monómero de la segunda red en la que ocurrirá la reticulación del segundo polímero (Mehta *et al.*, 2023). Los hidrogeles semi-interpenetrados se elaboran al incorporar un polímero lineal que no está entrecruzado químicamente a una red reticulada por medio de entrelazamiento físico (Zhu *et al.*, 2015; Soto y Oliva, 2012). Se puede utilizar para mejorar propiedades de un biopolímero, ya que se incorporan características de un polímero sintético para brindar al material de una mayor estabilidad mecánica (Ramírez *et al.*, 2016; Afrin *et al.*, 2022).

#### **5.3.2.5. En relación con su biodegradación**

Por lo general los hidrogeles elaborados a base de polímeros naturales son degradados por acción de las enzimas, microorganismos, humos y moléculas de agua, además de factores como la temperatura y el pH pueden promover el desenredo de cadenas, la hidrólisis o la proteólisis, por lo que no se generan residuos tóxicos que dañen al medio ambiente (Resende *et al.*, 2023; Mehta *et al.*, 2023; Dinu y Dragan, 2018).

Por otro lado, la mayoría de los hidrogeles sintetizados con polímeros sintéticos son de naturaleza químicamente inerte e hidrofóbica, por lo que no son biodegradables, volviendo su eliminación algo tardado y costoso (Mehta *et al.*, 2023). Claro que hay algunos de naturaleza biodegradable como el PVA, PLA y PLGA que se utilizan en el área médica (Mehta *et al.*, 2023). Además, se puede lograr esta característica al formar enlaces lábiles en la cadena polimérica principal o en los enlaces cruzados para que se puedan romper por métodos químicos o enzimáticos (Dodda *et al.*, 2023).

#### **5.3.2.6. En relación con su tamaño de poro**

El tamaño del poro juega un papel importante en el hinchamiento del hidrogel. Entre los factores que impactan en la porosidad y tamaño del poro está la temperatura, la concentración de polímeros y monómeros, la reticulación, la velocidad de congelación y el tipo de disolvente (Dinu y Dragan, 2018). Conforme el poro de la red sea menor, la cantidad de agua almacenada en el hidrogel disminuye (Ramírez *et al.*, 2016). Se clasifican en: no porosos con una abertura de entre 1 a 10 nm, microporosos o de poro cerrado de entre 10 y 100 nm, macroporosos con un tamaño de 100 nm a 1  $\mu\text{m}$  y superporosos con poros interconectados mayores a 100  $\mu\text{m}$  (Foudazi *et al.*, 2023).

Entre las técnicas más usadas para elaborar hidrogeles macroporosos o para crear poros en materiales no porosos es la liofilización en donde el hidrogel se congela, para que el disolvente dentro de las cadenas se cristalice, y se continua con sublimación, sin embargo con este proceso suelen ser débiles en cuanto a resistencia mecánica (Foudazi *et al.*, 2023; Dinu y Dragan, 2018).

#### **5.3.2.7. Morfología de la red**

La morfología de la red superficial se puede categorizar en amorfo si las moléculas están en desorden, pero si las cadenas se agrupan ordenadamente son cristalinos y si tienen secciones de ambas son semicristalinos (Coreño y Méndez, 2010). Estos últimos se obtuvieron mediante reticulación química en 1994 (Ho *et al.*, 2022).

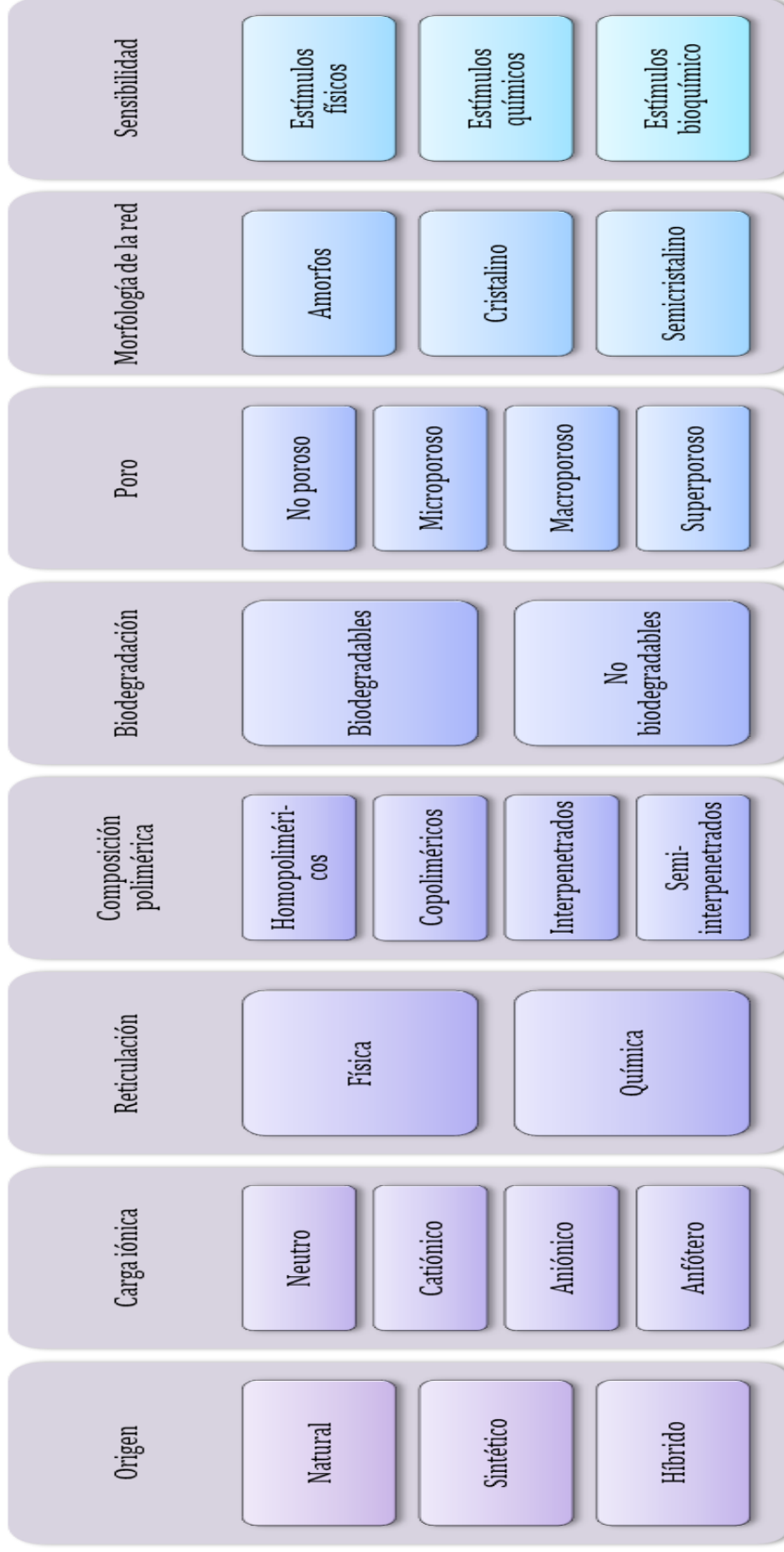
#### **5.3.2.8. Sensibilidad**

Se pueden obtener hidrogeles sensibles que respondan de cierta forma a un estímulo físico, químico o biológico (Ullah *et al.*, 2015; Mehta *et al.*, 2023). Son capaces de cambiar de volumen o hasta degradarse ante una modificación en el entorno, por ello se les conoce como “inteligentes” (Soto y Oliva, 2012).

#### **5.3.3. Métodos de síntesis de hidrogeles**

Los métodos de síntesis de hidrogeles son: reticulación física, reticulación química, polimerización por injerto y reticulación por radiación (Gulrez *et al.*, 2011). Dependiendo del método de síntesis, los hidrogeles pueden requerir de componentes sintéticos como el iniciador, el monómero y el reticulante (Thakur *et al.*, 2018). Los iniciadores químicos se utilizan para iniciar reacciones, por lo que liberan radicales libres al someterse a calentamiento y los entrecruzantes pueden tener dos dobles enlaces polimerizables; doble enlace polimerizable y un grupo funcional reactivo con el monómero; dos grupos funcionales reactivos con el monómero o metales polivalentes para formar entrecruzamientos iónicos (Soto y Oliva, 2012). Los iniciadores que se suelen utilizar son: persulfato de potasio (KPS), nitrato de amonio cérico, sulfato de amonio ferroso y peróxido de benzoilo (Bashir *et al.*, 2020). El monómero empleado suele ser una molécula de baja masa molecular con un doble enlace, soluble en agua, como el ácido acrílico, acrilamida o vinilpirrolidona (Zhang *et al.*, 2022). Entre los reticulantes más utilizados está N, N'-metilenebisacrilamida (MBA), dimetacrilato de etilenglicol (EGDMA), melamina trimetilacrilamida y melamina triacrilamida (Bashir *et al.*, 2020).

## CLASIFICACIÓN DE LOS HIDROGELES SUPERABSORBENTES



**Figura 7.** Clasificación de los hidrogeles superabsorbentes.

*Nota:* Elaboración propia. Adaptado de Mehta et al., 2023; Resende et al., 2023.

### 5.3.3.1. Reticulación física

Algunos procesos para obtenerlos son: cristalización, congelación-descongelación, interacciones electrostáticas, asociación hidrofóbica, interacciones proteínicas y por enlaces de hidrógeno (Dodda *et al.*, 2023).

La interacción electrostática surge entre las cargas opuestas entre un polímero y un monómero o entre dos polímeros, por lo que el hidrogel es susceptible a los cambios de pH (Soto y Oliva, 2012). Un ejemplo de reticulación por interacción electrostática es el hidrogel formado por quitosano y sal disódica de fosfato de glicerol, donde las aminos cargadas positivamente del polímero natural se reticulan con los grupos fosfatos cargados negativamente de la sal (Dodda *et al.*, 2023).

Los puentes de hidrógeno se generan entre el átomo de hidrógeno de un enlace polar y un átomo muy electronegativo, como oxígeno, por lo que sus fuerzas de atracción son más fuertes que las de Van der Waals que involucran interacciones dipolo-dipolo, dipolo-dipolo inducido y fuerzas de dispersión (Coreño y Méndez, 2010). Los métodos para obtener hidrogeles con estas interacciones son: temperatura crítica inferior de la solución (LCST), temperatura crítica superior de la solución (UCST) y tratamiento ultrasónico (Dodda *et al.*, 2023).

Las interacciones hidrofóbicas ocurren entre moléculas o regiones que se agrupan para formar una estructura cohesiva que las mantenga protegidas de las moléculas del agua (Han *et al.*, 2024). Esto ocurre porque el microdominio hidrófobo es un punto de reticulación que se conecta a otras cadenas para rearticularse con las respectivas hidrofílicas y formar la red (Jiang *et al.*, 2019).

### 5.3.3.2. Reticulación química

En la reticulación química se forman enlaces covalentes mediante radicales libres, enzimas, reacciones de base de Schiff, de clic de Diels-Alder, de oxima y adición de Michael (Dodda *et al.*, 2023).

En la técnica por radicales libres el reactivo iniciador es una especie de radical libre que se une a un monómero para formar un nuevo radical y así progresivamente hasta que ocurra una recombinación de dos especies radicales o desproporción dando fin a la polimerización (Buwalda *et al.*, 2014). Los radicales libres se activan por medio de energía térmica, reacciones redox o por la descomposición por luz de las moléculas iniciadoras (Lin y Anseth, 2009).

Las reacciones que involucran enzimas favorecen cambios químicos de oxidación, por lo que es posible que ocurran enlaces covalentes. La transglutaminasa es de las más utilizadas, ya que promueve la unión del grupo amida con grupos carboxamida y amina (Dodda *et al.*, 2023).

### **5.3.3.3. Polimerización por injerto**

Se utiliza para modificar polímeros naturales y elaborar materiales híbridos (Nayak *et al.*, 2018). Por medio de enlaces covalentes se une un monómero a la estructura principal por medio de reactivos químicos o radiación de alta energía (Gulrez *et al.*, 2011). Para generar puntos activos en la columna vertebral se suele recurrir al tratamiento con plasma, radiación ultravioleta o iniciadores químicos (Nasef *et al.*, 2021).

Hay tres formas de sintetizar un injerto. El tipo “grafting to” involucra que la cadena principal cuente con terminales activas para enlazarse con cadenas prepolimerizadas (Purohit *et al.*, 2023). En cuanto a “grafting from”, se requiere que la matriz polimérica disponga de grupos funcionales que propicien la reacción de polimerización o que contenga un iniciador para favorecer el crecimiento de las cadenas (Wohlhauser *et al.*, 2018). También se puede por “grafting through”, donde el enlace ocurre directamente entre la estructura principal con otro monómero por medio de los grupos funcionales polimerizables (Wohlhauser *et al.*, 2018).

### **5.3.3.4. Polimerización por radiación**

La producción de hidrogeles de la forma clásica puede ser tardada y algo costosa, los productos pueden retener aditivos y generar residuos que requieran altas temperaturas y vacío para su eliminación (Wu *et al.*, 2021). La tecnología de la radiación ha sido utilizada en la síntesis de hidrogeles para crear productos de alta pureza y estériles (More y Chapekar, 2024).

El tipo de radiación y dosis afecta el rendimiento de los hidrogeles, ya que influyen en la densidad, porosidad y tamaño de la malla (More y Chapekar, 2024; Han *et al.*, 2024). La irradiación con microondas requiere bajas cantidades de iniciador y limita las reacciones secundarias, logrando una síntesis en poco tiempo y a bajo costo (Iqbal *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2021). Al utilizar radiación ionizante se pueden sintetizar hidrogeles sin añadir iniciador o reticulante, pues al recurrir a los rayos gamma o haz de electrones la columna vertebral del polímero absorbe la energía, por lo que se generan radicales libres que posteriormente participan en reacciones químicas entre las moléculas, dando

como resultado un producto con resistencia mecánica, resistencia química y propiedades antimicrobianas (More y Chapekar, 2024; Sivakumar y Lee, 2022). El injerto por irradiación UV se logra al generar especies inestables en la columna vertebral del polisacárido para el posterior ataque del monómero en ella (Elsayed, 2019).

### 5.3.3.4.1. Irradiación por microondas

Las reacciones con irradiación de microondas son veloces por la rápida rotación de los dipolos y la generación de calor inherente en los materiales (Wu *et al.*, 2021). Los microondas generan calor por las oscilaciones del campo magnético a alta frecuencia, por lo que la cantidad de agua influye en la velocidad de calentamiento, ya que entre más moléculas más fricción hay (Elsayed, 2019). Las microondas son adecuadas para elaborar injertos de alto rendimiento con la mayoría de los polisacáridos (Batouti *et al.*, 2023).

Las moléculas de agua liberan radicales hidroxilos ( $\cdot\text{OH}$ ) al exponerlas a la radiación del microondas. Estos arrancan hidrógenos de las cadenas del polímero base (PB) y se forman los radicales del mismo ( $\text{PB}_0^{\cdot}$ ). El calor también afecta a los iniciadores, por lo que liberan radicales ( $\text{In}^{\cdot}$ ) que pueden reaccionar con el monómero (M) para que ocurra homopolimerización ( $\text{M}_1^{\cdot}$ ) o quitar hidrógenos de los hidroxilos reactivos en el PB para formar el radical del polímero base ( $\text{PB}_0^{\cdot}$ ), que al interactuar con el M inicia el crecimiento del radical de injerto ( $\text{PB-M}_1^{\cdot}$ ). La cadena crece mediante la unión sucesiva de moléculas de monómero que van creando un extremo activo para que continúe la reacción hasta que se combinen dos radicales (Soto y Oliva, 2012). La Figura 8 muestra las reacciones que ocurren durante la irradiación.



**Figura 8.** Síntesis de hidrogeles mediante microondas.

Nota: Adaptado de Soto y Oliva, 2012.

### 5.3.4. Caracterización de hidrogeles

Al caracterizar un hidrogel principalmente se evalúa el grado de reticulación, resistencia, composición, morfología, capacidad de hinchamiento, propiedades térmicas y mecánicas, para así diseñar materiales específicos (Dodda *et al.*, 2023).

#### 5.3.4.1. pH

La capacidad de hinchamiento del hidrogel puede verse afectada por la protonación del medio, la estructura del hidrogel y de los grupos funcionales del mismo, si el material posee grupos aniónicos le favorecerá el aumento de pH, en caso contrario de ser de naturaleza catiónica, y si no cuenta con grupos funcionales ionizables la variación del pH no le afectará (Ramírez *et al.*, 2016). Los hidrogeles sensibles al pH responden de acuerdo con los grupos  $-NH_2$  y  $-COOH$  presentes en la matriz. Cuando los grupos colgantes iónicos cambian de carga ocurre la repulsión electrostática entre los grupos ionizados, lo que aumenta el hinchamiento osmótico (Ullah *et al.*, 2015; Mehta *et al.*, 2023).

#### 5.3.4.2. Análisis del hinchamiento

La difusión hace que el hidrogel se hinche, por lo que suceden cambios de peso y volumen, que al analizarlos brindan información sobre su estructura interna, propiedades mecánicas, degradación, estabilidad física, el grado de reticulación y tamaño de poro (Dinu y Dragan, 2018; Dodda *et al.*, 2023).

A continuación, se mencionan algunas propiedades que se pueden determinar al llevar un registro del peso del hidrogel en función al tiempo, resaltando que antes de pesar el hidrogel se seca el agua excedente de la superficie (Rahman *et al.*, 2022).

##### 5.3.4.2.1. Índice de hinchamiento

El índice de hinchamiento se calcula de la siguiente manera (Rahman *et al.*, 2022):

$$SR = \left( \frac{[W_t - W_1]}{W_1} \right)$$

(Ecuación 1)

donde:

$W_t$ : peso del hidrogel hinchado en un tiempo determinado.

$W_1$ : peso del hidrogel seco (xerogel).

#### 5.3.4.2.2. Porcentaje de hinchamiento

Para conocer el porcentaje de absorción de agua, el xerogel se sumerge en agua desionizada a temperatura ambiente y se pesa cada determinado tiempo. Con los datos obtenidos se ocupa la siguiente fórmula (Rahman *et al.*, 2022):

$$\%H = \left( \frac{[W_t - W_1]}{W_1} \right) \times 100$$

(Ecuación 2)

donde:

$W_t$ : peso del hidrogel hinchado en un tiempo determinado.

$W_1$ : peso del hidrogel seco (xerogel).

#### 5.3.4.2.3. Porcentaje de absorción de agua en el equilibrio

El porcentaje de absorción de agua en el equilibrio se calcula con la siguiente ecuación (Rahman *et al.*, 2022):

$$EWC = \left( \frac{[W_2 - W_1]}{W_2} \right) \times 100$$

(Ecuación 3)

donde:

$W_1$ : peso del xerogel

$W_2$ : peso del hidrogel hinchado en el equilibrio.

#### 5.3.4.2.4. Porcentaje de gelación/contenido en gel

El porcentaje de gelación de un hidrogel es un indicador clave de su estructura y capacidad para retener líquidos, lo que influye directamente en sus propiedades y aplicaciones potenciales. Se calcula de la siguiente forma (Rahman *et al.*, 2022):

$$\%G = \left[ \frac{W_1}{W_0} \right] \times 100$$

(Ecuación 4)

donde:

$W_0$ : peso del xerogel inicial.

$W_1$ : peso del xerogel final.

### 5.3.4.3. Espectroscopía Infrarroja

Los grupos funcionales en los hidrogeles influyen en la capacidad de hinchamiento, propiedades térmicas, resistencia mecánica y la degradación (Dodda *et al.*, 2023). Es importante identificar las identidades químicas presentes y las interacciones para entender el comportamiento del hidrogel. Por ejemplo, la Espectroscopía Infrarroja por Transformadas de Fourier (FTIR, siglas en inglés) es una técnica, que se usa para identificar grupos funcionales y reconocer identidades químicas (Raghuwanshi y Garnier, 2019). Está técnica es útil para ver las interacciones entre el contaminante y la matriz reticulada después de la absorción de colorante (Ramírez *et al.*, 2016).

### 5.3.4.4. Morfología

La Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, por su siglas en inglés) se ha empleado frecuentemente para conseguir información sobre la topografía superficial de la muestra, su composición y otras propiedades, como la conductividad eléctrica. La magnificación en SEM puede controlarse en un rango de hasta 6 órdenes de magnitud, desde aproximadamente 10 hasta 500.000 veces. Es una técnica potente y ampliamente utilizada para capturar la morfología o topografía de la superficie, característica de los hidrogeles (Syed *et al.*, 2011).

### 5.3.4.5. Análisis térmico

La estabilidad térmica se analiza al someter a los hidrogeles a una temperatura controlada. Por análisis termogravimétrico (TGA), el cambio de masa ocurre conforme al aumento constante de la temperatura (1-10°C/min) y mediante calorimetría de diferencial de barrido (DSC), se miden los cambios de temperatura y el flujo de calor entre la muestra y la referencia (Raghuwanshi y Garnier, 2019; Ghanbari *et al.*, 2023). Los resultados son proyectados en gráficas que muestran cambios en curvas y picos como respuesta del material al modificar la temperatura en determinado tiempo. De esta

forma se obtiene información como la temperatura de transición vítrea, la temperatura de descomposición inicial, el grado de cristalinidad y la fusión (Dodda *et al.*, 2023).

### **5.3.5. Aplicaciones de los hidrogeles en aguas residuales**

Se han desarrollado materiales capaces de absorber metales pesados, fármacos y colorantes (Ahmaruzzaman *et al.*, 2023). Además de que se han realizado materiales acoplados a grupos catalíticos o reactivos para identificar contaminantes como medicamentos y petróleo (Resende *et al.*, 2023). Entre ellos, los hidrogeles elaborados con almidón se han utilizado como adsorbentes de colorantes textiles, nitrobenzeno y metales pesados (Dong *et al.*, 2024).

En cuanto a la remoción de colorantes, como el azul de metileno, en 2015 por Gomez *et al.*, produjeron un producto por medio de polimerización simple por injerto de radicales libres de almidón, ácido acrílico y celulosa, y Tang *et al.*, en 2018 sintetizaron un hidrogel (quitosano/PAMPS/PAAM) mediante el método de injerto de radicales libres (Sivakumar y Lee, 2022). También existen varios artículos científicos que reportan el porcentaje de remoción de colorantes textiles con hidrogeles a base de goma de xantana. Njuguna y Schönherr sintetizaron un hidrogel a base de goma de xantana capaz de remover hasta 99% el colorante violeta de genciana y en el año 2022 informaron la síntesis de otro hidrogel con la misma goma por esterificación con anhídrido maleico que logró una remoción de 95% de azul de metileno (Njuguna y Schönherr, 2021; Njuguna y Schönherr, 2022).

## **6. PARTE EXPERIMENTAL**

### **6.1. Reactivos químicos y equipo**

Goma de Xantana (GX), el agente entrecruzante N,N'-metilenbisacrilamida ( $C_7H_{10}N_2O_2$ ), el monómero acrilamida ( $C_5H_9NO$ ), el iniciador persulfato de potasio ( $K_2S_2O_8$ ), fueron grado analítico y obtenidos de Sigma-Aldrich. El agar-agar (AA) de la marca Química Mercurio. Los colorantes catiónicos azul de metileno (AZM) y verde malaquita (VEM) fueron marca Hycel y Sigma-Aldrich, respectivamente. Para modificar el pH de las soluciones coloreadas se utilizó hidróxido de sodio y ácido clorhídrico a una concentración de 0.1 M.

El equipo de microondas de marca General Electric, modelo (JES1036PWH) con las siguientes especificaciones: 120 V, 60Hz y 1100 W fue usado para efectuar la reacción de síntesis de los hidrogeles. El deshidratador de alimentos marca Excalibur, modelo 3900B fue utilizado para el secado de los hidrogeles sintetizados. Para evaluar la

capacidad de hinchamiento se utilizó una balanza analítica de la marca VELAB, modelo VE-300. Una parrilla de calentamiento con agitación magnética marca Thermo Scientific, modelo SP131325 fue utilizada para la dispersión de reactivos. Se empleó un potenciómetro marca Conductronic modelo PH10 para la medición del pH. Se dispuso de un espectrómetro UV-Vis modelo Lambda 20 Marca Perkin Elmer, para dar seguimiento de la remoción de los colorantes catiónicos.

## **6.2. Preparación de hidrogeles a partir de goma de xantana**

Para la formación de los hidrogeles se realizó en una sola etapa y el procedimiento fue el siguiente:

1. Se pesó cada uno de los reactivos químicos en la balanza analítica.
2. En un vaso de precipitados de 600 mL se colocó 50 mL de agua desionizada, se adicionó la goma de xantana y se mantuvo en agitación constante hasta una máxima dispersión y posteriormente se agregó agar-agar. Se mantuvo la agitación constante hasta que los compuestos se dispersaron completamente.
3. En agua desionizada se solubilizó el iniciador KPS, el agente entrecruzante por separado y se agregaron al vaso de precipitado que contenía la goma de xantana/agar-agar completamente dispersa y se continuó agitando hasta homogeneizar la mezcla.
4. Posteriormente se solubilizó el monómero AM en agua desionizada y se agregó gota a gota a la mezcla, manteniéndose en agitación continua por varios minutos o hasta obtener una mezcla uniforme.
5. Finalmente, la mezcla homogénea obtenida se sometió a irradiación vía microondas, para obtener un hidrogel superabsorbente. Es importante mencionar no detener el proceso de agitación constante durante la adición de cada reactivo.
6. El hidrogel superabsorbente obtenido se dejó enfriar a temperatura ambiente y luego se pesó en la balanza analítica. Se registró su peso (hidrogel crudo) y finalmente se llevó a cabo la purificación.
7. La reacción de síntesis fue optimizada en función de la variable de reacción: volumen de disolvente de reacción con el objetivo de obtener un hidrogel con alto porcentaje de hinchamiento o capacidad de absorción de agua.

## **6.3. Purificación de hidrogeles**

La purificación de los hidrogeles obtenidos consistió en lavarlos con 200 mL de agua desionizada por cuatro veces para eliminar los residuos a partir de la reacción de polimerización. Después se mantuvieron por 24 horas en aproximadamente 250 mL de agua desionizada, después del tiempo señalado los hidrogeles se lavaron cinco veces con agua desionizada y se midió el pH hasta obtener un valor neutro.

#### **6.4. Secado de hidrogeles**

Después de purificados, cada uno de los hidrogeles, se colocaron en un deshidratador a una temperatura de 60°C aproximadamente 24 horas o hasta obtener un xerogel (hidrogel seco). Luego se pesaron y se registró el peso final de los hidrogeles superabsorbentes obtenidos.

#### **6.5. Medida de hinchamiento**

Se llevarón a cabo las medidas de hinchamiento de los hidrogeles sintetizados a base de goma de xantana a partir del método gravimétrico.

##### **6.5.1. Determinación del índice de hinchamiento**

Se pesó una masa de xerogel conocida (0.20 g) y se adicionó 100 mL de agua desionizada a temperatura ambiente. Se pesó la masa del hidrogel en la balanza analítica a diferentes intervalos de tiempo definidos, en cada pesada se removió el exceso de agua de los hidrogeles por medio de papel filtro. El índice de hinchamiento se calculó de la siguiente manera:

$$SR = \left( \frac{[W_t - W_1]}{W_1} \right) \quad \text{(Ecuación 1)}$$

en donde:

$W_t$ : peso del hidrogel hinchado en un tiempo determinado.

$W_1$ : peso del hidrogel seco (xerogel).

##### **6.5.2. Porcentaje de hinchamiento y porcentaje de absorción de agua en el equilibrio**

Las muestras de xerogel de un peso conocido, se sumergieron en agua desionizada a temperatura ambiente y después a distintos intervalos de tiempo se pesan usando una balanza analítica. Con los datos obtenidos se ocupa la siguiente fórmula:

$$\%H = \left( \frac{[W_t - W_1]}{W_1} \right) \times 100 \quad \text{(Ecuación 2)}$$

en donde:

$W_t$ : peso del hidrogel hinchado en un tiempo determinado.

$W_1$ : peso del hidrogel seco (xerogel).

Para calcular el porcentaje de agua absorbido:

$$EWC = \left( \frac{[W_2 - W_1]}{W_2} \right) \times 100$$

(Ecuación 3)

en donde:

$W_2$ : peso del hidrogel hinchado en un tiempo determinado.

$W_1$ : peso del hidrogel seco (xerogel).

### 6.5.3. Porcentaje de gelación/contenido en gel

El contenido de hidrogel de un material determinado se obtiene midiendo la fracción insoluble de una muestra seca (xerogel) después de su inmersión en agua desionizada durante 16 h o 48 h a temperatura ambiente. La muestra debe prepararse a una concentración diluida aproximadamente ~1% para garantizar que el hidrogel se disperse completamente en agua (Gulrez *et al.*, 2011, Syed *et al.*, 2011). La fracción de gel se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$\%G = \left[ \frac{W_1}{W_0} \right] \times 100$$

(Ecuación 4)

en donde:

$W_0$ : peso inicial de la muestra seca.

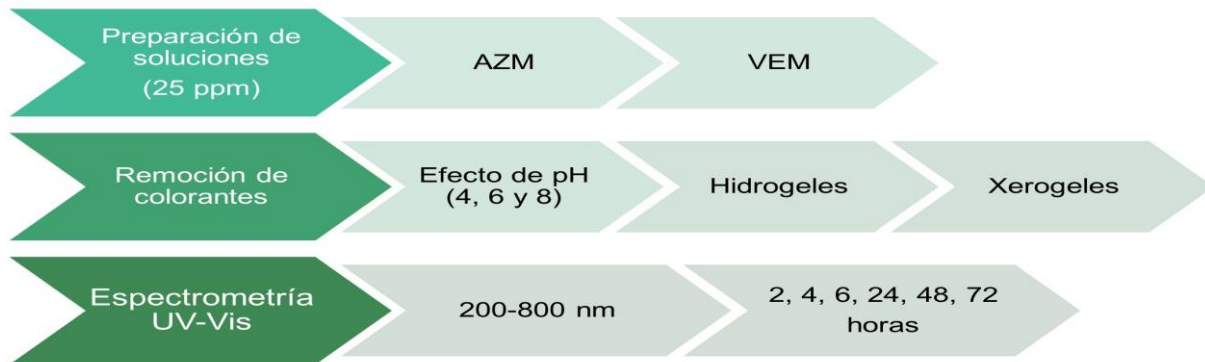
$W_1$ : peso de la parte insoluble seca de la muestra después de la extracción del agua.

## 6.6. Estudio de hidrogeles y xerogeles para remoción de colorantes textiles

### 6.6.1. Efecto de pH

Se prepararon disoluciones en agua desionizada de cada colorante (25 ppm) a partir de una solución madre de 100 ppm, a valores de pH de 4, 6, 8. Se adicionaron muestras

de xerogel o hidrogel sintetizados a 100 mL (BHSV2100) y 110 mL (BHSV3110) como disolvente de reacción, de masa conocida en las soluciones acuosas de los colorantes a una concentración de 25 ppm. En el caso de los hidrogeles, se colocaron 0.400 g en 10 mL de soluciones acuosas contaminado y para el caso de xerogeles, se pesó 0.010 g y se sumergió en 50 mL de solución coloreada. La cantidad de colorante residual en la solución acuosa se determinó mediante espectroscopia UV-Vis periódicamente, es decir, cada 2, 4, 6, 24, 48 y 72 horas (ver Figura 9).



**Figura 9.** Diagrama experimental para la remoción de los colorantes.

La capacidad de adsorción de los hidrogeles y xerogeles sintetizados de los colorantes catiónicos azul de metileno y verde de malaquita se determinarán por la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left( \frac{[A_t - A_0]}{A_t} \right) \times 100$$

(Ecuación 5)

en donde:

$A_0$  : absorbancia inicial.

$A_t$  : absorbancia correspondiente al tiempo t.

# Capítulo 7. Resultados y discusión



## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1. Síntesis del hidrogel superabsorbentes (BHS)

#### 7.1.1. Evaluación del volumen de disolvente de reacción

Se estudio la preparación de hidrogeles de goma de xantana (GX) y agar-agar (A-A) utilizando un equipo de irradiación por microondas y se analizó el efecto del volumen agua como disolvente de reacción. Los volúmenes de disolvente (agua) fueron 90, 100 y 110 mL, manteniendo constantes los parámetros: masa de GX/A-A, monómero AA, iniciador KPS, agente entrecruzante MBA y tiempo de irradiación. Las variables de reacción en la síntesis de BHS juegan un papel crucial para encontrar las condiciones óptimas para la obtención de BHS (Dinu y Dragan, 2018). La mayoría de los BHS obtenidos fueron insolubles en agua, permaneciendo en estado gel y presentaron una consistencia suave, blanda y elástica.

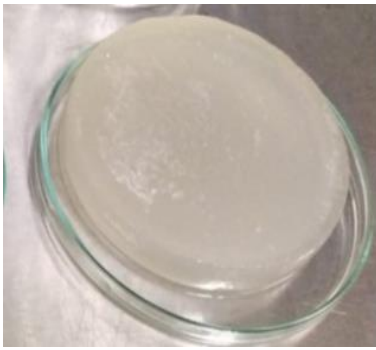
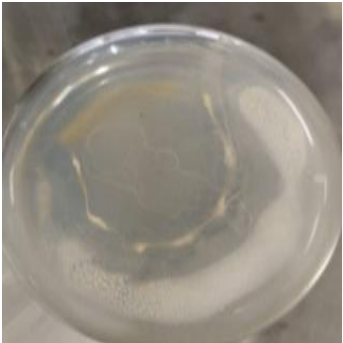
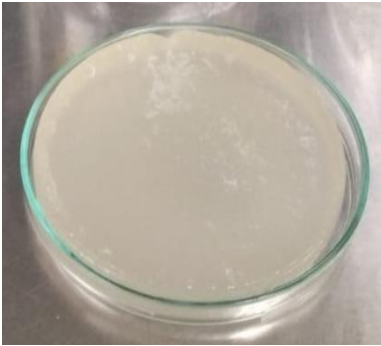



En la Tabla 3, se presentan los datos experimentales para cada uno de los volúmenes de disolvente utilizados en la síntesis de reacción de BHS, incluyendo la masa y el porcentaje de hinchamiento posterior al proceso de purificación. En cuanto a la masa de los BHS, después de la purificación, los valores registrados fueron de 79.97 g para un volumen de 90 mL, 94.47 g para 100 mL y 107.46 g para 110 mL. Asimismo, la cantidad de xerogel obtenida se reporta como 2.074 g en 90 mL, 2.076 g para 100 mL y 2.182 g para 110 mL, lo que permite analizar la relación entre disolvente y la producción de xerogel en el proceso de síntesis.

El análisis de los datos obtenidos revela que el porcentaje de hinchamiento varía en función del volumen de agua empleado. Para volumen de 90 mL, se registro un porcentaje de hinchamiento del 3755.88 %, mientras que, al aumentar a 100 mL, dicho porcentaje, alcanzó un valor de 4450.58 %. Finalmente, con un volumen de 110 mL, se obtuvo un porcentaje máximo de 4824.89 %. Estos resultados indican una relación directa entre el incremento del volumen de agua y el aumento en el porcentaje de hinchamiento, evidenciando que la mayor absorción se produce con un volumen de agua de reacción de 110 mL (Călina *et al.*, 2024).

En el proceso de síntesis, el disolvente de reacción es uno de los parámetros fundamentales, el cual desempeña un papel esencial en la regulación del calor de polimerización y en la determinación de las propiedades finales del hidrogel. Para este propósito, se emplean comúnmente disolventes como agua u otras soluciones acuosas, ya que permiten un control eficiente de las condiciones del proceso y contribuyen a la obtención de materiales con características óptimas. La elección y cantidad del

disolvente, genera una fuerte influencia en la forma y porosidad del hidrogel (Dinu y Dragan, 2018; Alsaid *et al.*, 2021).

**Tabla 3.** Valores obtenidos para los BHS en función del volumen del disolvente. Masa de GX/AA 1.25 g; iniciador  $K_2S_2O_8 = 9.954 \times 10^{-3}$  M; agente entrecruzante MBA =  $3.007 \times 10^{-3}$  M; monómero = AA  $3.274 \times 10^{-2}$  M y tiempo de irradiación 80 s.

Volumen de agua (mL)	BHS Purificado (g)	%H	BHS	Xerogeles
90	79.97	3759.88		
100	94.47	4450.58		
110	107.46	4824.89		

El disolvente aplicable debe ser miscible con todos los componentes de la síntesis; y una dosis adecuada puede garantizar las buenas propiedades del hidrogel, puesto que, se ha informado que una mínima dosis de disolvente da generalmente como resultado una porosidad cerrada y baja área superficial específica, mientras un exceso de disolvente causa una porosidad abierta y algunas veces una mala resistencia mecánica (Alsaid *et al.*, 2021).

## 7.2. Caracterización

### 7.2.1 Determinación del porcentaje de gel y porcentaje de índice de hinchamiento

En el presente estudio se determinó el porcentaje de gelación y el porcentaje de hinchamiento en función del volumen de agua de reacción utilizado. En la Tabla 4, se observan los valores obtenidos para un volumen de 90 mL, 100 y 110 mL. Estos resultados evidencian una relación directa entre el aumento del volumen de agua de reacción y la formación de la red de gel. Un mayor porcentaje de gelación (50% para un volumen de reacción de 110 mL) indica una mayor estructuración de dicha red, lo que se traduce en una optimización de la capacidad de retención de agua (14300 % de hinchamiento). Así también se observa que, del peso total alcanzado por el BHS, 99.30 % es respecto al agua en el V3, seguido por 98.84 % en V2 y 96.96 % de V1.

Asimismo, los valores registrados muestran una concordancia, con el porcentaje de hinchamiento presente en los BHS tras el proceso de síntesis y purificación, evidenciando que un mayor volumen de agua en la síntesis resulta en un incremento del porcentaje de hinchamiento.

**Tabla 4.** Datos obtenidos de valores de eficiencia de BHS durante 48 h cada volumen de síntesis.

Volumen de agua (mL)	90 mL	100 mL	110 mL
Porcentaje de gelación	30.0 %	40.0 %	50.0 %
% de Hinchamiento	3200 %	8550 %	14300 %
Porcentaje de absorción de agua (48 h)	96.96 %	98.84 %	99.30 %
Índice de hinchamiento	32 g/g	85.5 g/g	143 g/g

### 7.2.2 Porcentaje de hinchamiento

Se llevó a cabo un estudio del porcentaje de hinchamiento o hidratación en función del tiempo (minutos) de hidrogeles basados en goma de xantana y agar-agar (BHS), derivados de la síntesis empleando volúmenes de agua de 90, 100 y 110 mL. Para

cada uno de estos volúmenes, se realizaron tres repeticiones, identificadas respectivamente como: V1.A, V1.B y V1.C para 90 mL; V2.A, V2.B y V2.C para 100 mL; y V3.A, V3.B y V3.C para 110 mL. A partir de estos estudios, se procedió al análisis de los datos experimentales obtenidos con el fin de evaluar el comportamiento de hinchamiento de las distintas series de BHS.

#### **7.2.2.1. Volumen de disolvente de reacción: 90 mL**

En la Tabla 5 se presentan los datos experimentales del porcentaje de hinchamiento (%H) en función del tiempo (minutos) correspondientes a los BHS sintetizados utilizando un volumen de agua de 90 mL para todas las repeticiones, asignadas como series V1.A, V1.B y V1.C.

Los resultados revelan un incremento general en el porcentaje de hinchamiento de los BHS con el tiempo (estado inicial o relajación del polímero), aunque con diferencias notables entre las réplicas experimentales. El %H tiende a incrementarse conforme transcurre el tiempo hasta el minuto 1400 no obstante, en la serie V1.A, los valores de %H oscilan desde 3615.00 a los 120 minutos hasta 9375.00 a los 4800 minutos. En la serie V1.B, los valores van desde 1257.143 a los 120 minutos hasta 3738.000 a los 4800 minutos, mientras que en la serie V1.C se registran valores desde 2671.429 hasta 5638.000 en los mismos intervalos de tiempo.

Por su parte, la Figura 10 ilustra la evolución del %H respecto al tiempo a partir de los datos de la Tabla 4, para todas las repeticiones de la condición con 90 mL de agua (series V1.A, V1.B y V1.C). En dicha Figura, se destaca un incremento del %H hacia los 1400 minutos, seguido de una disminución en torno a los 1560 minutos, fenómeno observado de manera consistente en las tres series de 90 mL analizadas. La serie V1.A alcanzó el %H más elevado (9375.00) a los 4800 minutos, mientras que V1.B mostró los niveles más bajos (3738.000) en todo el intervalo.

De igual forma, los datos obtenidos para las series V1.A, V1.B y V1.C permiten concluir que no se alcanza un estado de hinchamiento en equilibrio dentro del intervalo de tiempo evaluado (1560 a 4800 minutos). Esta afirmación se fundamenta en la observación de fluctuaciones continuas en los valores del porcentaje de hinchamiento (%H), lo cual indica que el sistema aún no ha estabilizado su capacidad de absorción.

En condiciones de equilibrio, se esperaría una meseta en la curva de hinchamiento, reflejando una absorción máxima constante; sin embargo, el comportamiento dinámico registrado sugiere que los hidrogeles continúan interactuando con el medio acuoso, posiblemente debido a una estructura interna con porosidades de distinto tamaño o una reorganización progresiva de la red polimérica (Soto y Oliva, 2012; Dinu y Dragan,

2018). Esta falta de estabilización puede tener implicaciones importantes sobre el tiempo de aplicación o la eficiencia funcional del material en sistemas reales .

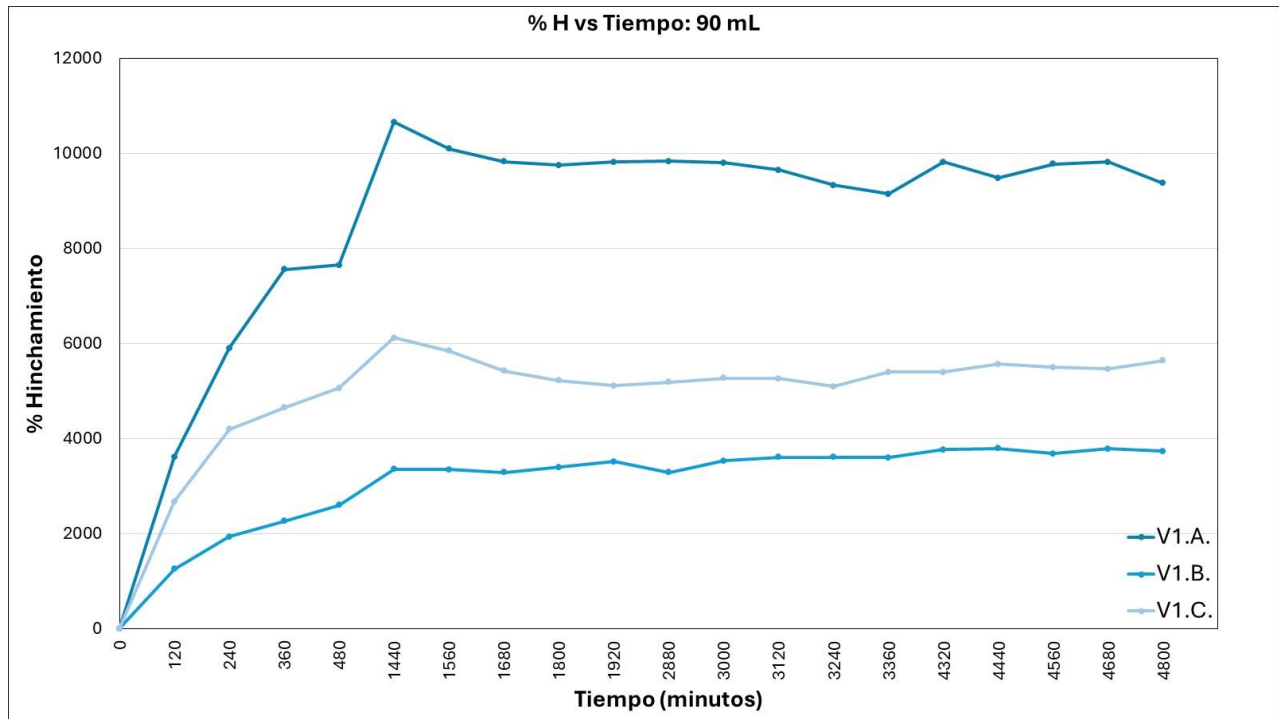
Los resultados obtenidos en la Tabla 5 y la Figura 10 evidencian que el comportamiento de hinchamiento de los BHS, sintetizados con un volumen de agua de 90 mL, presentan una tendencia general de incremento del porcentaje de hinchamiento (%H) a medida que transcurre el tiempo. Sin embargo, esta tendencia no presenta similitud entre las distintas series replicadas (V1.A, V1.B y V1.C), lo cual sugiere una variabilidad estructural entre las muestras, posiblemente derivada de factores intrínsecos al proceso de síntesis, como la distribución de la red polimérica o la homogeneidad de la mezcla inicial.

Específicamente, la muestra V1.A mostró los valores más altos de hinchamiento, alcanzando hasta 9375.000 %H a los 4800 minutos, lo que podría estar asociado a una estructura más porosa o mayor disponibilidad de grupos hidrofílicos expuestos. En contraste, la serie V1.B evidenció los valores más bajos de %H, lo que sugiere una menor capacidad de absorción o una red polimérica más densa.

**Tabla 5.** Porcentaje de hinchamiento (%H) en función del tiempo (minutos) para los hidrogeles BHS sintetizados con un volumen de agua de 90 mL.

Tiempo (minutos)	%H V1: 90mL		
	V1.A.	V1.B.	V1.C.
<b>0</b>	0.000	0.000	0.000
<b>120</b>	3615.000	1257.143	2671.429
<b>240</b>	5900.000	1938.095	4195.238
<b>360</b>	7560.000	2266.667	4647.619
<b>480</b>	7650.000	2600.000	5061.905
<b>1440</b>	10660.000	3352.381	6123.810
<b>1560</b>	10095.000	3347.619	5847.619
<b>1680</b>	9825.000	3290.476	5423.810
<b>1800</b>	9750.000	3400.000	5219.048
<b>1920</b>	9820.000	3519.048	5114.286
<b>2880</b>	9835.000	3290.476	5185.714
<b>3000</b>	9800.000	3533.333	5271.429
<b>3120</b>	9650.000	3604.762	5261.905
<b>3240</b>	9335.000	3609.524	5100.000
<b>3360</b>	9145.000	3600.000	5400.000
<b>4320</b>	9820.000	3766.667	5400.000
<b>4440</b>	9485.000	3795.238	5566.667
<b>4560</b>	9775.000	3685.714	5500.000
<b>4680</b>	9820.000	3785.714	5461.905
<b>4800</b>	9375.000	3738.095	5638.095

Igualmente, se identificó un comportamiento atípico en todas las series alrededor de los 1400 y 1560 minutos, donde se observó un aumento del %H seguido de una disminución posterior. Este fenómeno puede atribuirse a un reajuste interno de la red del hidrogel o al inicio de un proceso de relajación estructural y liberación de agua absorbida, común en este tipo de materiales cuando se alcanzan niveles de saturación parcial (Soto y Oliva, 2012).



**Figura 10.** Porcentaje de hinchamiento (%H) en función del tiempo (minutos) para los hidrogeles BHS sintetizados con un volumen de agua de 90 mL.

### 7.2.2.2. Volumen de disolvente de reacción: 100 mL

En la Tabla 6 se presentan los datos experimentales correspondientes al porcentaje de hinchamiento (%H) en función del tiempo (minutos) para hidrogeles elaborados a partir de goma xantana, sintetizados empleando un volumen constante de agua (100 mL) en todas las repeticiones, designadas como serie V2.A, V2.B y V2.C.

El análisis de los datos presentados en la Tabla 6 revela una clara tendencia al incremento del porcentaje de hinchamiento (%H) en función del tiempo en los hidrogeles elaborados. Este comportamiento podría ser consistente con la naturaleza hidrófila del material y la dinámica de absorción de agua en la matriz polimérica. No obstante, se identifican diferencias significativas entre las tres series evaluadas (V2.A,

V2.B y V2.C), a pesar de haber sido sintetizadas bajo condiciones constantes de volumen de agua (100 mL).

La serie V2.A mostró un aumento progresivo del %H desde 3560.000 a los 120 minutos hasta alcanzar 5885.000 a los 4800 minutos, indicando una cinética de hinchamiento moderadamente sostenida. En contraste, la serie V2.B, aunque presentó valores iniciales superiores (4630.000), exhibió una menor variación en el intervalo observado, llegando hasta 5550.000, lo que podría sugerir una saturación más temprana de su capacidad de absorción. Por su parte, la serie V2.C evidenció el intervalo más amplio de hinchamiento, con valores entre 3257.895 hasta 6126.316, lo que podría indicar una mayor heterogeneidad estructural o una red polimérica menos compacta.

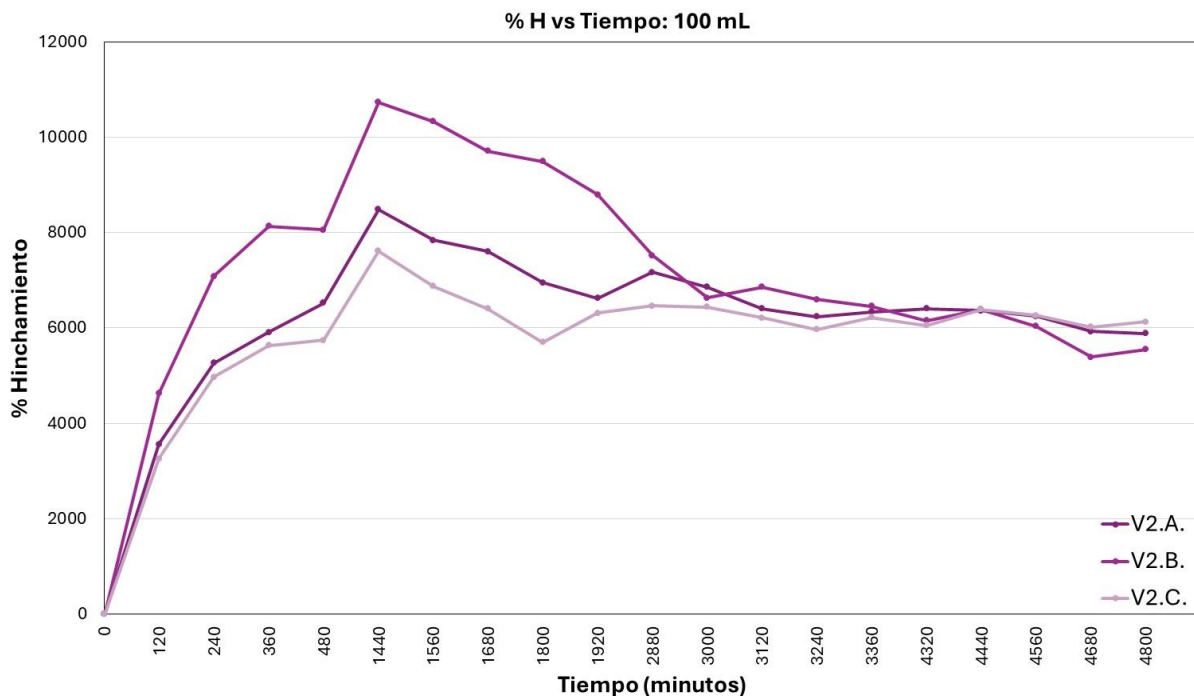
Estas variaciones entre las series reflejan diferencias en la microestructura de los hidrogeles, posiblemente derivadas de ligeras modificaciones en los parámetros de síntesis tales como el grado de reticulación, la viscosidad inicial de la goma xantana o las condiciones de mezcla. En consecuencia, las propiedades de absorción observadas subrayan la sensibilidad del %H frente a la conformación interna del hidrogel, lo cual es relevante para aplicaciones donde el control de la capacidad de hinchamiento resulta esencial.

**Tabla 6.** Porcentaje de hinchamiento (%H) en función del tiempo (minutos) para los hidrogeles BHS sintetizados con un volumen de agua de 100 mL.

Tiempo (minutos)	% H V2: 100 mL		
	V2.A.	V2.B.	V2.C.
120	3560.000	4630.000	3257.895
240	5265.000	7085.000	4973.684
360	5910.000	8135.000	5631.579
480	6525.000	8055.000	5747.368
1440	8490.000	10735.000	7610.526
1560	7840.000	10335.000	6873.684
1680	7605.000	9710.000	6405.263
1800	6955.000	9490.000	5705.263
1920	6625.000	8795.000	6310.526
2880	7170.000	7520.000	6468.421
3000	6855.000	6630.000	6436.842
3120	6405.000	6860.000	6210.526
3240	6240.000	6595.000	5968.421
3360	6335.000	6460.000	6221.053
4320	6405.000	6158.000	6057.895
4440	6365.000	6390.000	6389.474
4560	6250.000	6040.000	6263.158
4680	5930.000	5395.000	6021.053
4800	5885.000	5550.000	6126.316

Por su parte, la Figura 11 ilustra la evolución del %H respecto al tiempo para todas las repeticiones de la condición con 100 mL de agua (series V2.A, V2.B y V2.C). En dicho gráfico, se destaca un incremento del %H hacia los 1400 minutos, seguido de una notable disminución en torno a los 1560 minutos, fenómeno observado de manera consistente en todos los demás casos. Por ejemplo, en la serie V2.B alcanzó el %H (10735.000) más elevado a los 1440 minutos, y desciende a medida que aumenta el tiempo hasta 5550.000 a los 4800 minutos, mientras que V2.A y V2.C alcanzaron %H del orden de 8490.000 y 7610.526, respectivamente.

También se muestra que en las tres series (V2.A, V2.B y V2.C), los porcentajes de hinchamiento son cercanos entre ellos a partir 3000 hasta 4800 minutos. Sin embargo, es claro que no se alcanza un estado de hinchamiento en equilibrio dentro del intervalo de tiempo evaluado.



**Figura 11.** Porcentaje de hinchamiento (%H) en función del tiempo (minutos) para los hidrogeles BHS sintetizados con un volumen de agua de 100 mL

### 7.2.2.3. Volumen de disolvente de reacción: 110 mL

Los datos presentados en la Tabla 7 muestran el porcentaje de hinchamiento (%H) en función del tiempo para hidrogeles elaborados a partir de goma xantana y agar, utilizando un volumen constante de agua de 110 mL en todas las repeticiones experimentales (series V3.A, V3.B y V3.C). En general, se observa una tendencia

creciente del %H a medida que transcurre el tiempo, lo que corresponde al comportamiento esperado en matrices poliméricas con alta afinidad por el agua.

A pesar de que las V3.A, V3.B y V3.C exhiben patrones de hinchamiento similares, se identifican diferencias relevantes en cuanto a los valores máximos alcanzados. En la serie V3.A, el %H pasó de 4365.000 a los 120 minutos a 9110.000 a los 4800 minutos, lo que sugiere una capacidad de absorción progresiva y sostenida.

La serie V3.B mostró valores inferiores, con un incremento de 4609.524 a 7880.952 en el mismo intervalo, lo que podría indicar una estructura más compacta o una menor disponibilidad de sitios activos para el hinchamiento.

Por otro lado, la serie V3.C presentó el rango más amplio de valores, desde 5625.000 hasta 9425.000, con respecto al tiempo, lo que podría reflejar una mayor porosidad o una red polimérica más abierta favoreciendo el ingreso del agua.

**Tabla 7.** Porcentaje de hinchamiento (%H) en función del tiempo (minutos) para los hidrogeles BHS sintetizados con un volumen de agua de 110 mL.

Tiempo (minutos)	% H V3:110 mL		
	V3.A.	V3.B.	V3.C.
<b>0</b>	0.000	0.000	0.000
<b>120</b>	4365.000	4609.524	5625.000
<b>240</b>	5800.000	6238.095	7645.000
<b>360</b>	6370.000	7533.333	7975.000
<b>480</b>	7055.000	7957.143	7805.000
<b>1440</b>	9545.000	10142.857	10515.000
<b>1560</b>	9270.000	10357.143	10680.000
<b>1680</b>	8760.000	10166.667	10280.000
<b>1800</b>	8720.000	9814.286	9985.000
<b>1920</b>	8815.000	9814.286	10195.000
<b>2880</b>	9140.000	9452.381	10875.000
<b>3000</b>	9095.000	8814.286	10455.000
<b>3120</b>	8720.000	9057.143	10585.000
<b>3240</b>	9095.000	8771.429	9780.000
<b>3360</b>	8715.000	8423.810	9680.000
<b>4320</b>	9195.000	8642.857	10280.000
<b>4440</b>	8985.000	8476.190	9790.000
<b>4560</b>	8985.000	8100.000	9775.000
<b>4680</b>	8855.000	7866.667	9370.000
<b>4800</b>	9110.000	7880.952	9425.000

Estas diferencias en el comportamiento de las muestras pueden estar vinculadas a variaciones en la interacción molecular entre la goma xantana y el agar durante el proceso de síntesis, afectando parámetros como la densidad de entrecruzamiento, la viscosidad del sistema inicial o la formación de dominios hidrofílicos.

El análisis comparativo permite inferir que la composición y organización interna del hidrogel juegan un papel determinante en su capacidad de hinchamiento, aspecto crucial en aplicaciones orientadas, por ejemplo, en la eliminación de contaminantes en la purificación de agua o algunas otras aplicaciones como biomedicina, agricultura, nanocompuestos, etc.

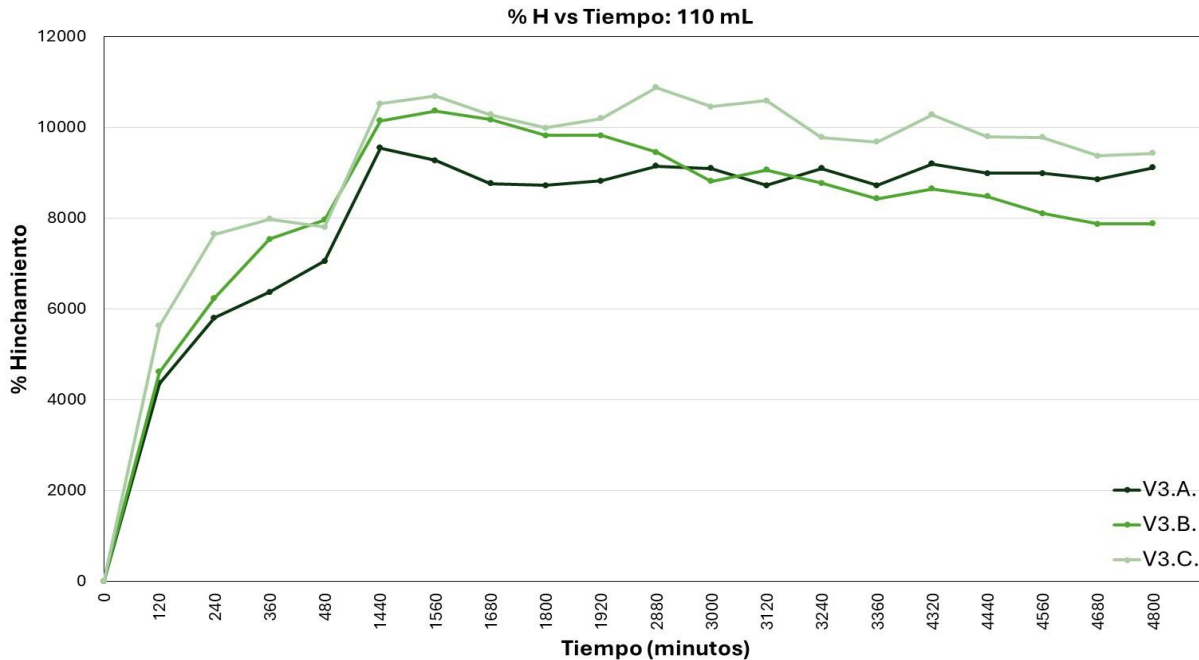
La Figura 12 revela el desenvolvimiento del %H respecto al tiempo para todas las repeticiones (V3.A, V3.B y V3.C) de la síntesis con 110 mL de agua. La Figura 12 además permite visualizar el comportamiento de hinchamiento (%H) de los hidrogeles en función del tiempo, con un enfoque particular en el intervalo comprendido entre los 1560 y 4800 minutos.

Destaca que la serie V3.C alcanzó el valor más alto de %H, con un máximo de 10875.000 a los 2880 minutos. Posteriormente, el hinchamiento presenta una ligera oscilación, descendiendo progresivamente hasta 9425.000, lo que sugiere una fase de estabilización sin llegar a un equilibrio fisicoquímico definitivo.

En contraste, las series V3.A y V3.B exhibieron comportamientos de hinchamiento significativamente inferiores. La serie V3.A varió entre 9545.000 y 9110.000, mientras que la serie V3.B presentó un descenso más pronunciado desde 10357.143 hasta 7880.592. Estos valores sugieren que dichas muestras poseen una menor capacidad de absorción, posiblemente asociada a una red polimérica más densa y compacta que restringe la movilidad del agua en el sistema.

La ausencia de un equilibrio fisicoquímico evidente en las tres series indica que el proceso de absorción continúa activo, aunque con una tasa reducida conforme avanza el tiempo. Esta condición podría estar influenciada por factores como la estructura tridimensional del hidrogel, la interacción entre los componentes poliméricos (goma xantana y agar-agar), y la distribución de poros dentro de la matriz.

En particular, el desempeño superior de la serie V3.C puede estar relacionado con una conformación microestructural más abierta, que facilita la penetración y retención de agua, favoreciendo un mayor %H incluso en fases prolongadas del experimento.

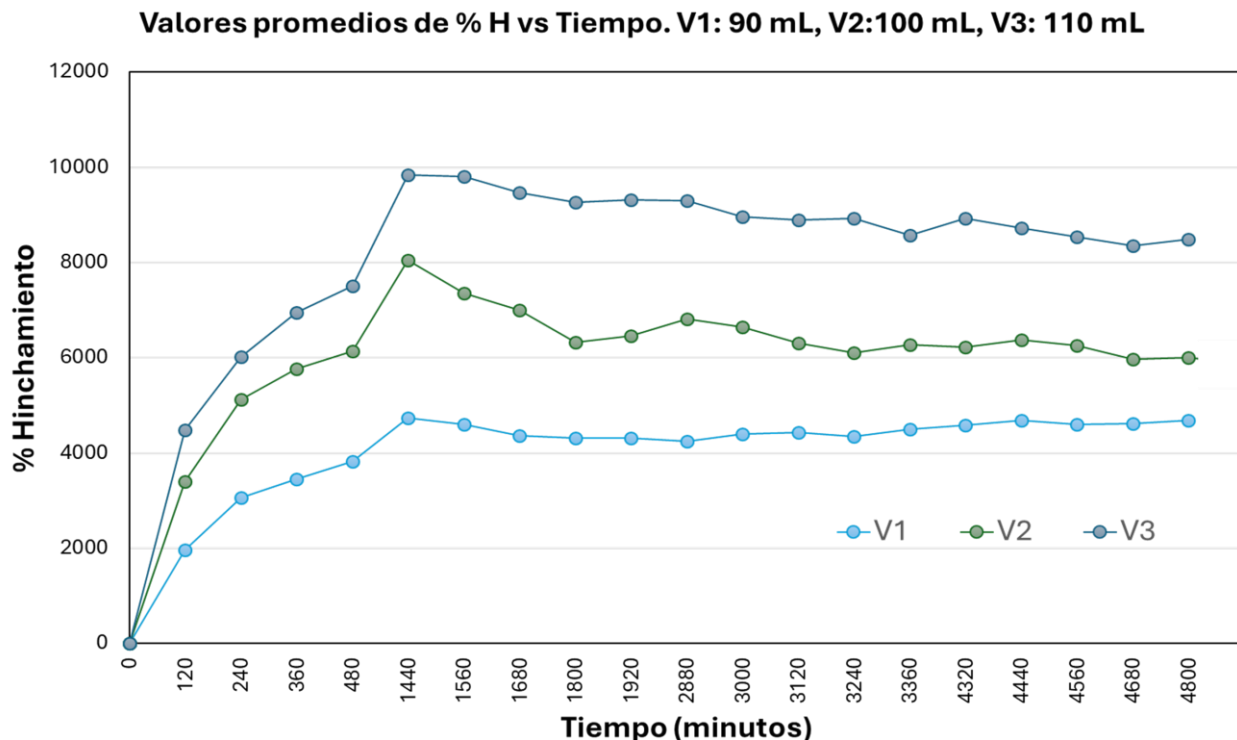


**Figura 12.** Porcentaje de hinchamiento (%H) en función del tiempo (minutos) para los hidrogeles BHS sintetizados con un volumen de agua de 110 mL.

La Figura 13 muestra los valores promedio de los porcentajes de hinchamiento (%H) correspondientes a las tres series evaluadas (V1.A, V1.B, V1.C; V2.A, V2.B, V2.C; V3.A, V3.B, V3.C), excluyendo los valores atípicos. Se observa que todas las series —V1 (90 mL), V2 (100 mL) y V3 (110 mL)— presentan un comportamiento similar en términos de hinchamiento a lo largo del tiempo.

En todos los casos, el máximo porcentaje de hinchamiento se alcanza a los 1400 minutos, seguido de una ligera disminución, tras la cual los valores se estabilizan y permanecen prácticamente constantes con el incremento del tiempo.

Asimismo, el gráfico revela que los hidrogeles correspondientes a la serie V3 presentan los valores más elevados de %H, en un rango de 9843.929 a 8495.476. Le siguen los hidrogeles de la serie V2, cuyos valores fluctúan entre 8050.263 y 6006.658. Finalmente, los valores más bajos se registran en la serie V1, con un rango de 4738.095 a 4688.095.



**Figura 13.** Promedio del %H en función del tiempo (min) para los hidrogeles BHS sintetizados con diferentes volúmenes de agua.

El presente estudio permitió evaluar el comportamiento de hinchamiento de hidrogeles elaborados a partir de mezclas de goma xantana y agar-agar, usando diferentes volúmenes de agua, bajo condiciones controladas de síntesis. Los resultados evidenciaron que el porcentaje de hinchamiento (%H) presenta una tendencia creciente con el tiempo en todas las series analizadas, reflejando la capacidad de absorción progresiva de agua por parte de la matriz polimérica.

Se observaron diferencias cuantitativas entre las series, atribuibles a variaciones en la composición y microestructura de todas las series estudiadas V1.A, V1.B y V1.C; V2.A, V2.B y V2.C; V3.A, V3.B y V3.C. Las diferencias observadas en el comportamiento de hinchamiento pueden atribuirse, en primer lugar, a variaciones en la red polimérica (grado de entrecruzamiento, densidad de poros y organización tridimensional), que modulan la penetración del agua.

En segundo lugar, la interacción entre los grupos hidrofílicos de la goma xantana ( $-OH$ ,  $-COOH$ ) y las moléculas de agua establece enlaces de hidrógeno que favorecen la absorción sostenida. La incorporación de agar introduce dominios adicionales que pueden abrir o restringir la matriz, generando sinergias estructurales que impactan el %H (Bhat *et al.*, 2022).

### **7.3. Estudios de remoción de los colorantes azul de metileno (AZM) y verde de malaquita (VEM) en hidrogeles y xerogeles sintetizados con 100 y 110 mL**

#### **7.3.1. Efecto del pH**

Los experimentos de adsorción de hidrogeles y en estado de xerogel sintetizados con un volumen de agua en la síntesis de reacción de 100 y 110 mL (V2:100 y V3:110 mL) fueron estudiados, por sus valores de mayor %H, en soluciones acuosas de los colorantes colorante AZM y VEM a 25 ppm.

#### **7.3.2. Espectros de absorción UV-Vis del colorante AZM**

Uno de los materiales de mayor consumo en la industria de los colorantes es el colorante básico heterocíclico aromático azul de metileno (AZM), comúnmente utilizado para teñir seda, algodón y papel. En procesos industriales, las concentraciones de azul de metileno varían según el uso específico, pero generalmente se utilizan intervalos que van desde partes por millón (ppm) hasta cientos de ppm. Es un colorante tiazina, catiónico y primario bien conocido. Altamente soluble en agua y, por lo tanto, forma una solución estable con agua a temperatura ambiente.

El AZM es un compuesto orgánico que contiene grupos amino y un átomo de azufre. Su capacidad de absorber luz está relacionada con su estructura electrónica, especialmente con la conjugación de enlaces  $\pi$ .

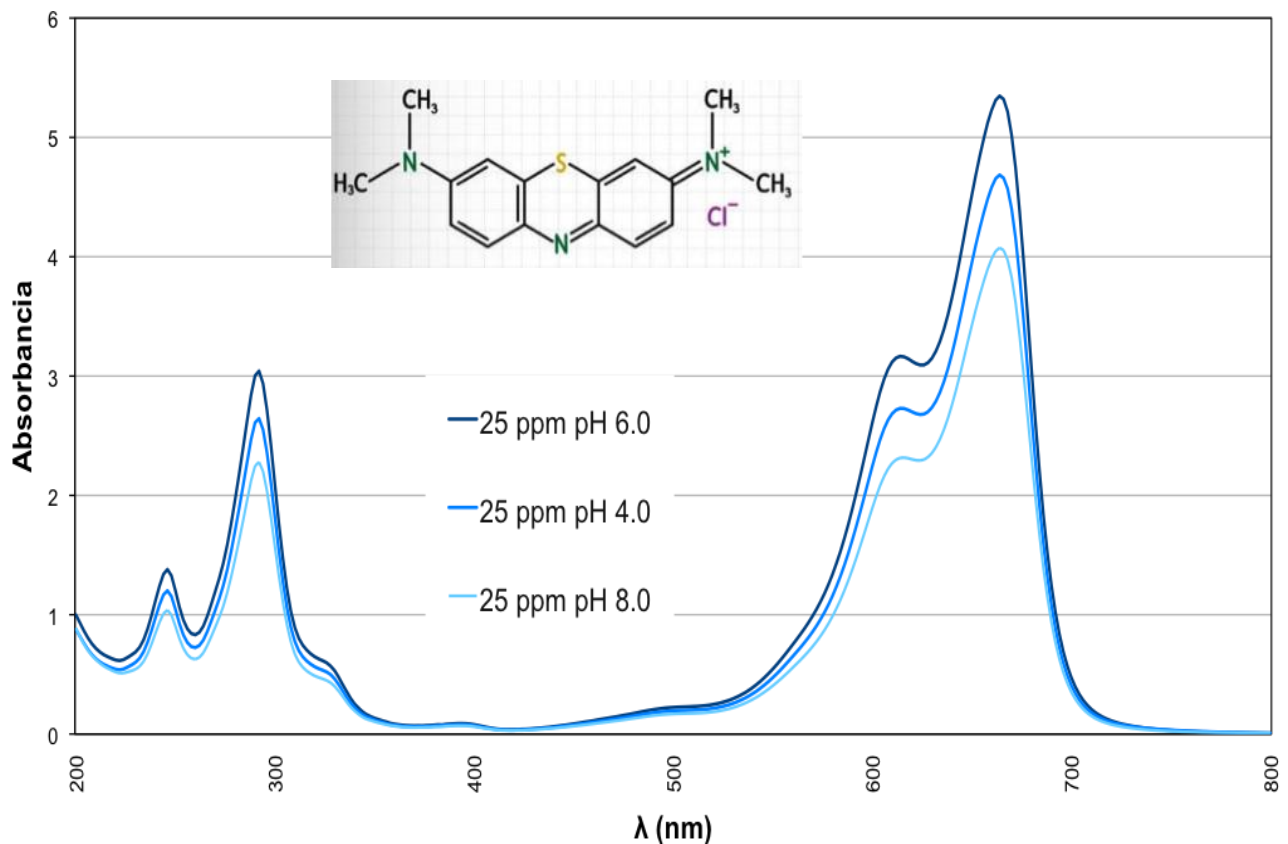
La Figura 14, nos muestra el espectro de absorción del colorante AZM a una concentración de 25 ppm y distintos valores de pH (4.0, 6.0, 8.0). Los espectros de absorción del AZM revelan un pico de absorción intenso alrededor de 664 nm, con un hombro aproximadamente en 614 nm, en la región visible. También parecen dos bandas adicionales en la región UV con picos alrededor de 292 y 245 nm asociados con los anillos de bencenos sustituidos (Mondal *et al.*, 2017).

El espectro de absorción del colorante AZM muestra cambios en la intensidad de las bandas de absorción a diferentes valores de pH (4.0, 6.0, 8.0), debido a la estructura molecular del colorante y, por lo tanto, en su capacidad de absorber luz a la longitud de onda característica.

A valores de pH bajos (ácidos), el azul de metileno tiende a protonarse en sus grupos amino, lo que altera la distribución de carga en la molécula, y puede afectar su capacidad de absorber la luz en la intensidad y/o longitud de onda característica de su máxima absorción (alrededor de 668 nm). A niveles de pH más altos (neutro básicos), el

azul de metileno puede experimentar hidrólisis, alterando su estructura, lo que también afecta su capacidad de absorción. Y puede llevar a una disminución en la absorbancia (Khan *et al.*, 2022).

La absorbancia de una solución es directamente proporcional de la especie que absorbe la luz. Por lo tanto, si la estructura del colorante AZM cambia de manera que ya no absorbe luz a la longitud de onda medida, la absorbancia disminuirá. En resumen, los cambios de pH afectan la estructura molecular del AZM, lo que a su vez influye en su capacidad para absorber luz a la longitud de onda característica. Esto se manifiesta como una disminución en la absorbancia a medida que el pH se desplaza hacia valores ácidos o básicos.



**Figura 14.** Espectro de absorción del colorante azul de metileno a 25 ppm y banda con un máximo de absorción a 664 nm a diferentes valores de pH

### **7.3.2.1. Remoción del colorante AZM en hidrogel y xerogel sintetizados con 100 y 110 mL de agua.**

La banda de absorción máxima del colorante AZM a 664 nm, se utilizó como referencia para determinar la capacidad de adsorción a una concentración de 25 ppm a distintos valores de pH = 4, 6, 8, a partir de la ecuación 5 (ver página 41).

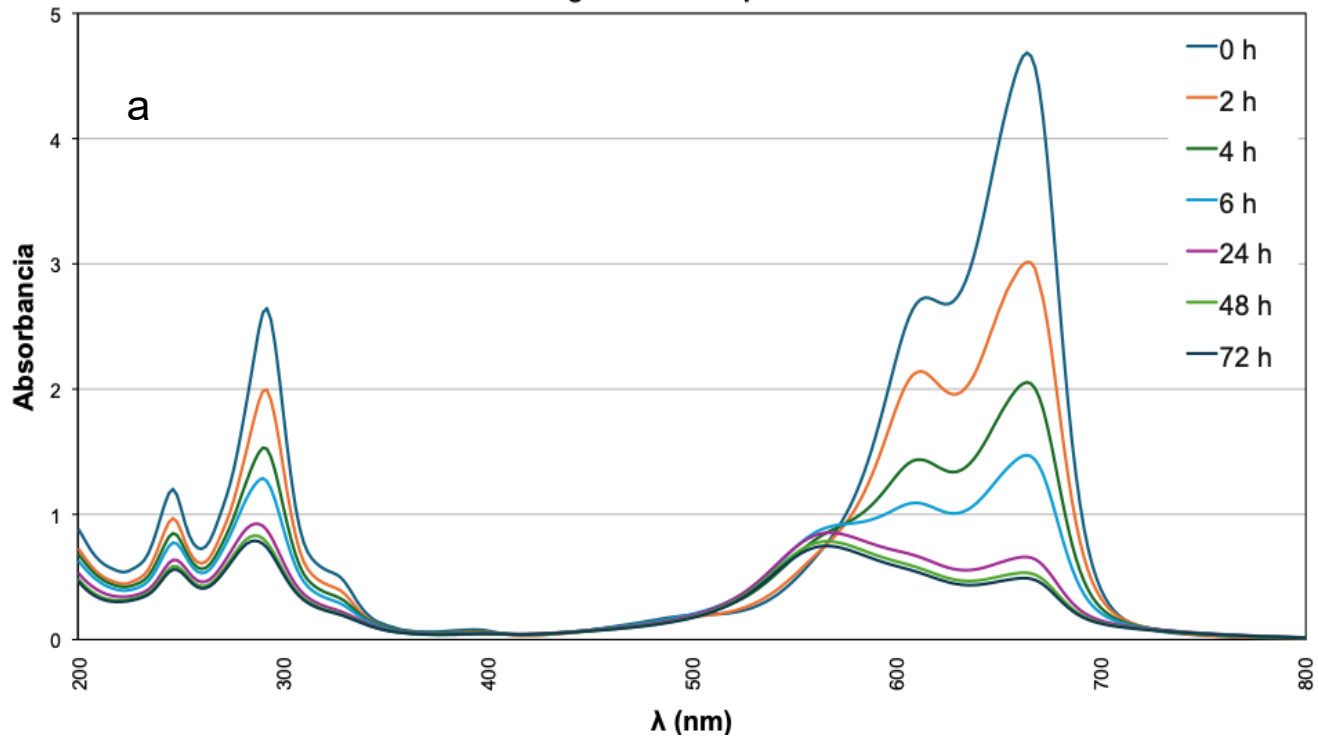
#### **7.3.2.1.1. pH = 4.0, 6.0, 8.0**

En la Figura 15 (a, b, c, d, e, f) se muestran los espectros absorción en la región UV-Vis de las soluciones acuosas del colorante AZM antes y después del tratamiento con hidrogeles (Figuras 15. a, b, c) y xerogeles (Figuras 15. d, e, f) a pH 4.0, 6.0 y 8.0 exclusivamente de V2:100 mL en donde es claro que la banda característica de máxima absorción a 664 nm disminuye notablemente con respecto al tiempo desde 2 hasta 72 h. De igual manera la banda aproximadamente a 614 nm, también disminuye, pero de manera más significativa en el caso de hidrogeles en comparación con las muestras de xerogeles.

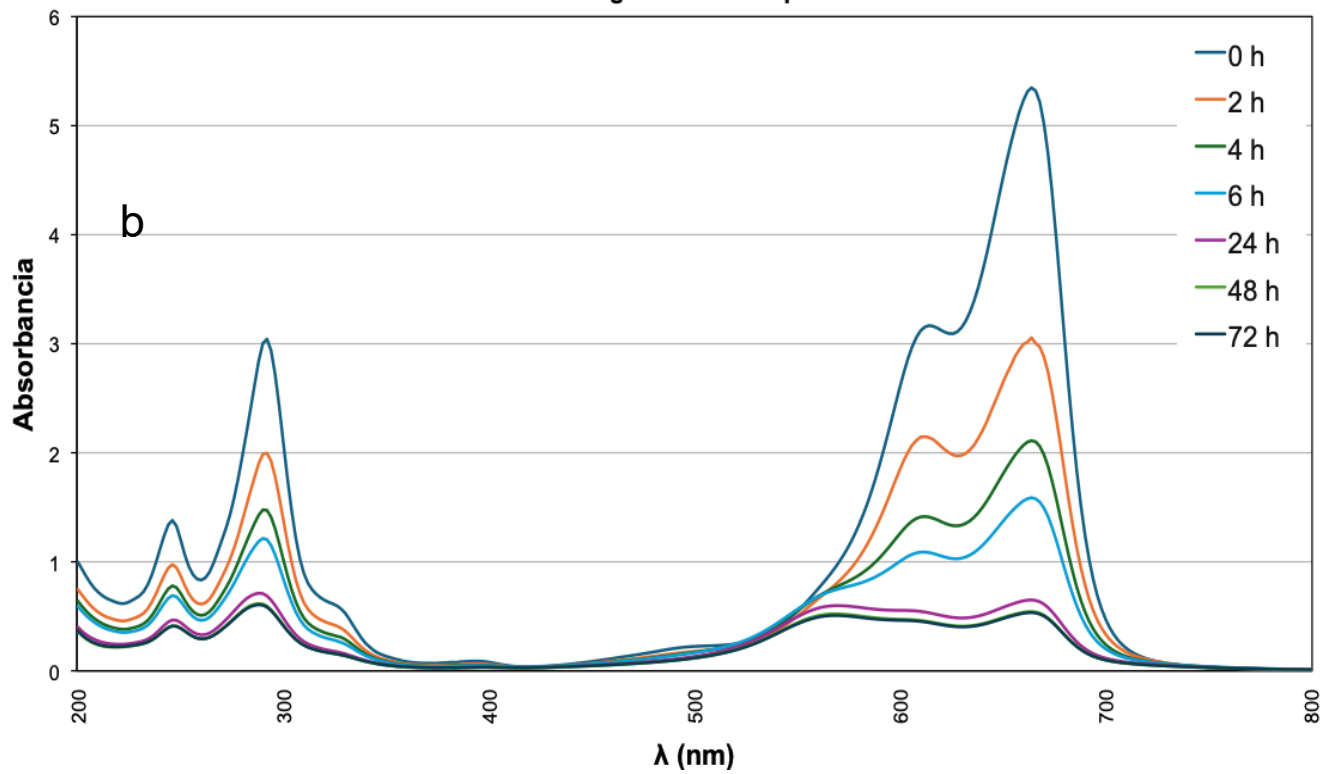
Tanto en muestras de hidrogeles como en xerogeles se muestra que la banda característica a 664 nm, después de 6 h de tratamiento por adsorción del colorante AZM disminuyen los valores de absorbancia de forma importante. A pH 4, el xerogel registra 2.251 de absorbancia, mientras que las muestras de hidrogeles presentan una absorbancia a 1.587; al incrementar el valor del pH (pH 6), el valor de absorbancia registrado con xerogel fue 2.156 y con hidrogel 1.472 y en medio básico, el valor de la absorbancia obtenida con la muestra de hidrogel es igual a 0.959 y en xerogel igual a 1.952.

En todos los casos tanto en hidrogeles como de xerogeles, la absorbancia es muy similar a partir de 24 h hasta 72 h de tratamiento, como se puede observar en las Figura 15.

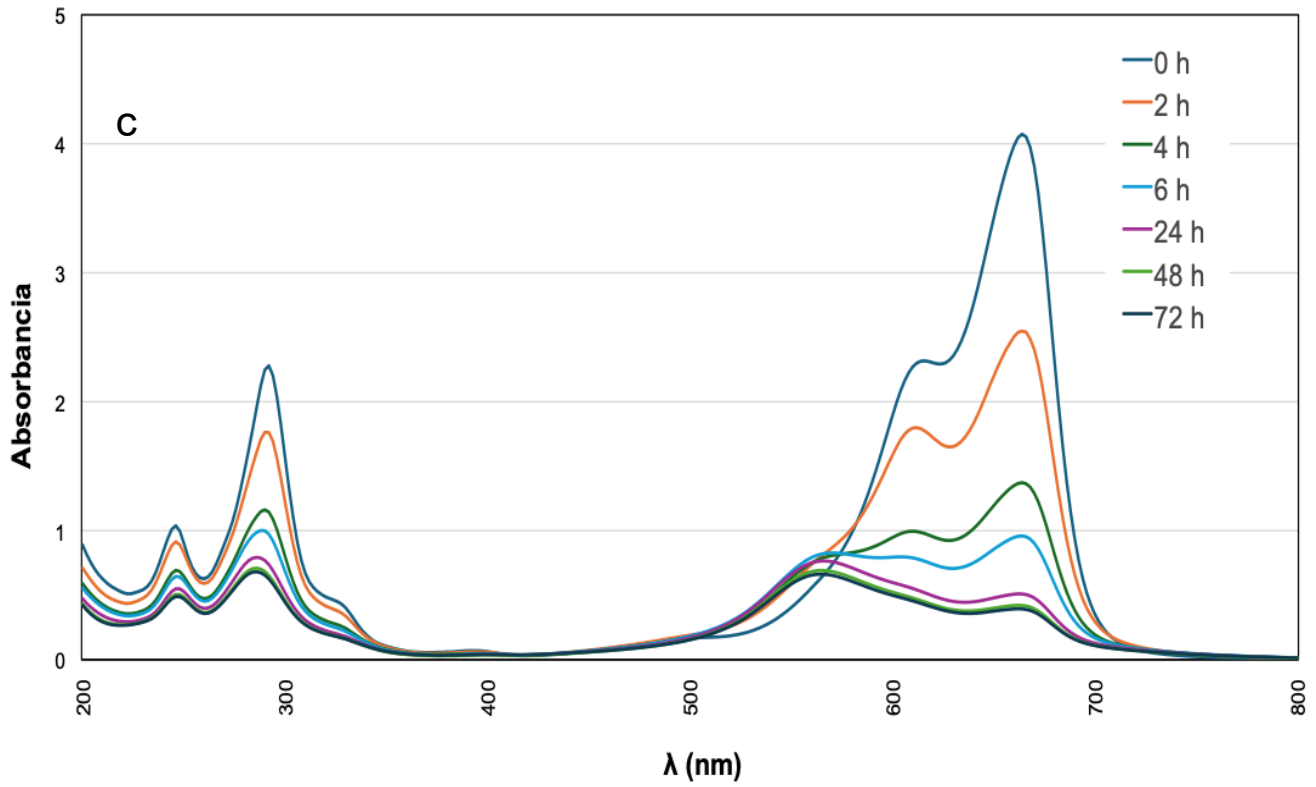
Hidrogel V2: 100 mL pH 4.0



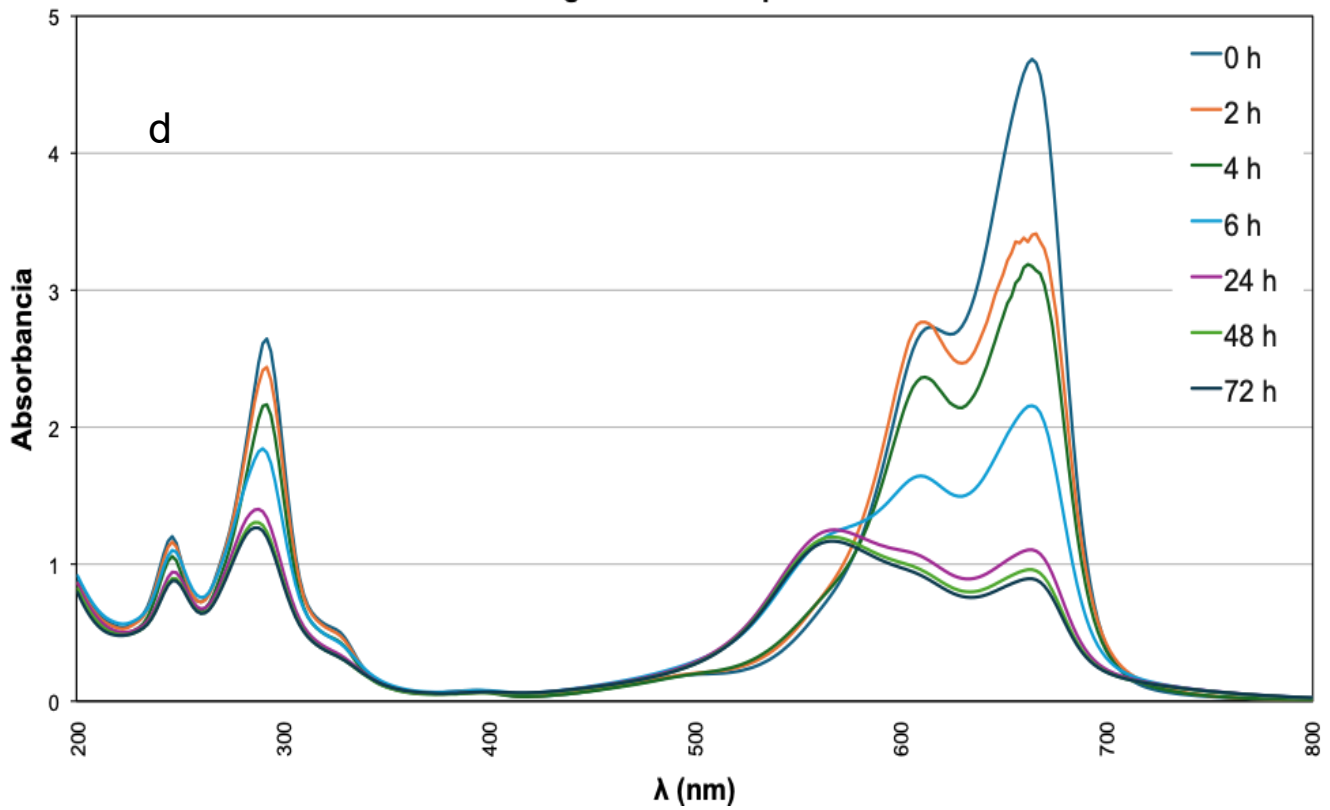
Hidrogel V2: 100 mL pH 6.0

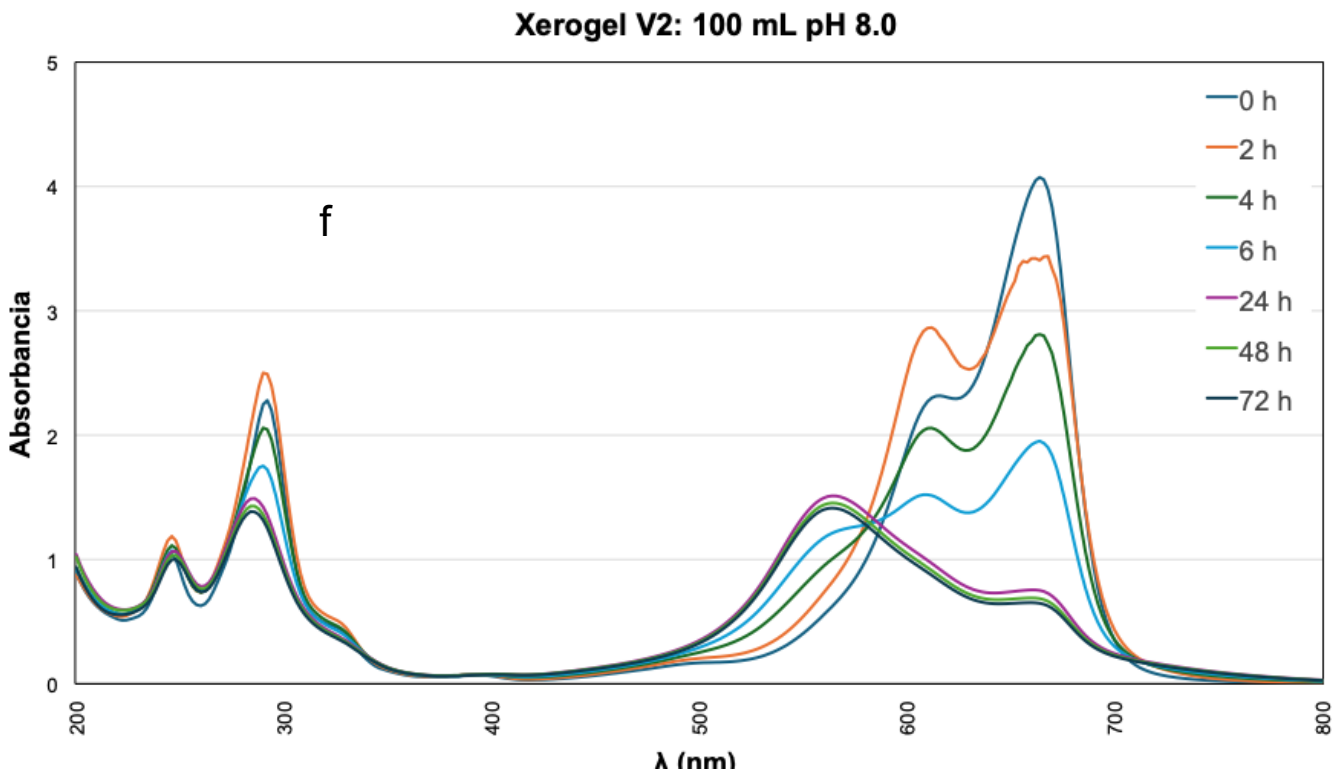
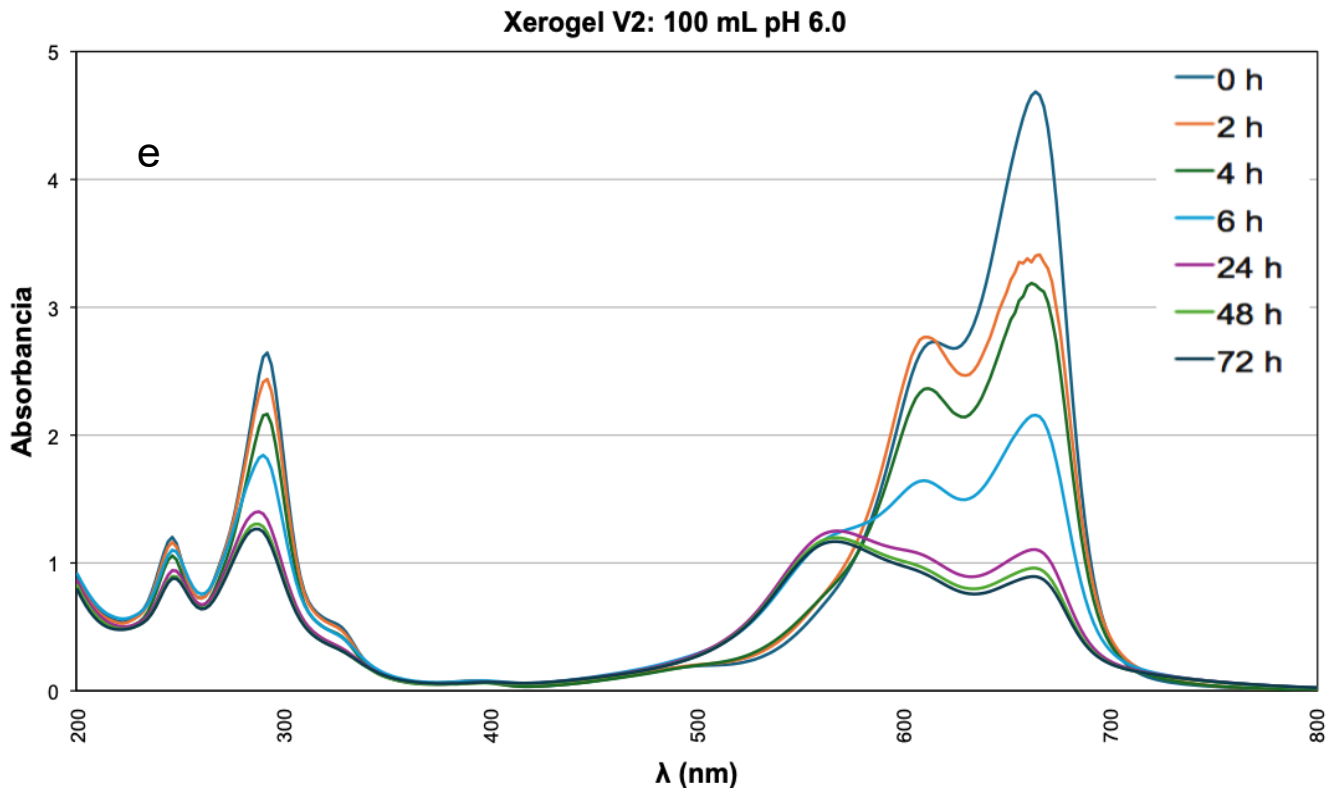


Hidrogel V2: 100 mL pH 8.0



Xerogel V2: 100 mL pH 4.0





**Figura 15.** Espectro de absorción de solución acuosa de AZM a 25 ppm a pH 4.0, 6.0, 8.0 con hidrogel (a, b, c) y xerogel (d, e, f).

Las Tablas 8 y 9 presentan los porcentajes de remoción del colorante catiónico AZM mediante la aplicación de hidrogeles y xerogeles sintetizados en volúmenes de 100 mL (V2) y 110 mL (V3), evaluados a pH 4.0, 6.0 y 8.0. De acuerdo con los resultados obtenidos, los hidrogeles correspondientes al volumen V3:110 mL alcanzaron los porcentajes más altos de remoción tras 72 h, con valores de 90.37 % a pH 4.0, 90.73 % a pH 6.0 y 90.91 % a pH 8.0 y por debajo, aunque no muy distanciados, los valores respectivos a los hidrogeles sintetizados a V2, con un 89.54 % a pH 4, luego 90.00% a pH 6 y del 90.34 % en medio básico. Estos resultados sugieren que la formulación y el volumen de síntesis influyen directamente en la eficiencia del material, siendo los hidrogeles V3:100 mL una opción prometedora para aplicaciones en procesos de tratamiento de aguas contaminadas con colorantes catiónicos textiles.

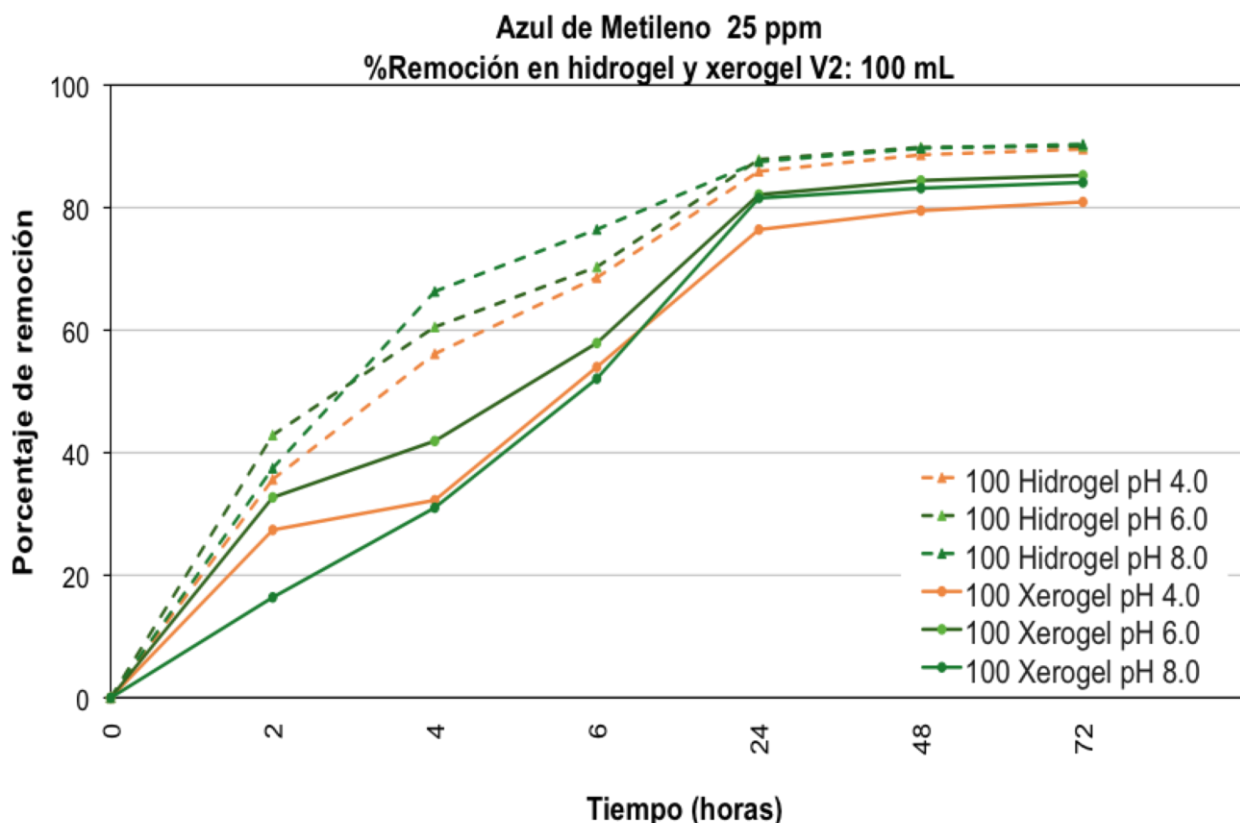
**Tabla 8.** Porcentaje de remoción de AZM en hidrogeles y xerogeles (V2: 100 mL) para valores de pH 4.0, 6.0, 8.0.

<b>%R de AZM 25 ppm V2: 100 mL</b>						
<b>BHS</b>	<b>2 h</b>	<b>4 h</b>	<b>6 h</b>	<b>24 h</b>	<b>48 h</b>	<b>72 h</b>
Hidrogel pH 4.0	35.65	56.13	68.57	85.92	88.61	89.54
Hidrogel pH 6.0	42.87	60.51	70.30	87.83	89.84	90.00
Hidrogel pH 8.0	37.47	66.31	76.44	87.49	89.68	90.34
Xerogel pH 4.0	27.39	32.24	53.97	76.41	79.50	80.92
Xerogel pH 6.0	32.70	41.91	57.89	82.12	84.42	85.27
Xerogel pH 8.0	16.39	31.02	52.08	81.55	83.16	84.10

**Tabla 9.** Porcentaje de remoción de AZM en hidrogeles y xerogeles (V3: 110 mL) para valores de pH 4.0, 6.0, 8.0.

<b>%R de AZM 25 ppm V3: 110 mL</b>						
<b>BHS</b>	<b>2 h</b>	<b>4 h</b>	<b>6 h</b>	<b>24 h</b>	<b>48 h</b>	<b>72 h</b>
Hidrogel pH 4.0	34.10	64.70	75.94	88.43	89.97	90.37
Hidrogel pH 6.0	50.18	78.64	81.85	88.47	90.29	90.73
Hidrogel pH 8.0	53.30	68.26	75.83	88.10	90.13	90.91
Xerogel pH 4.0	24.33	28.35	71.04	84.05	85.59	86.22
Xerogel pH 6.0	33.96	35.85	58.93	84.11	85.24	85.86
Xerogel pH 8.0	14.90	25.43	65.32	82.20	83.99	84.31

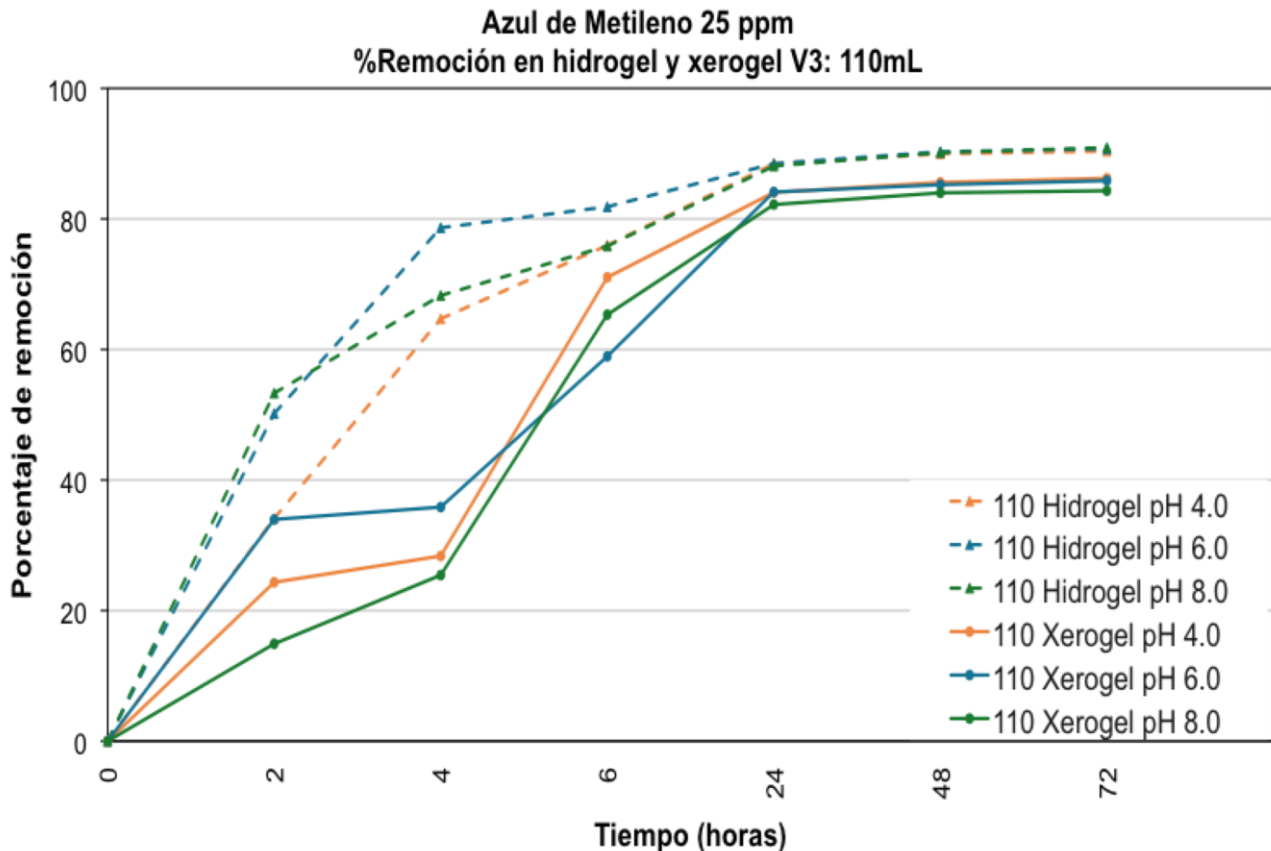
Las Figuras 16 y 17 representan los gráficos de porcentaje de remoción del colorante AZM a valores de pH 4.0, 6.0 y 8.0 en función del tiempo, a partir de los datos de las Tablas 8 y 9. En ambos volúmenes de reacción, se observa claramente que los hidrogeles logran una mayor remoción del colorante conforme avanza el tiempo. La Figura 16, muestra el predominio de los hidrogeles en comparación con los xerogeles, productos de la síntesis a V2 en la remoción del colorante catiónico. Pero después de 24 h, las remoción del colorante AZM correspondientes a los hidrogeles es muy cercana en todos los pH estudiados. Por otro lado, la remoción del colorante AZM alcanzada por los xerogeles, tras 24 h, es muy similar entre pH 8 y pH 6, en donde a las 72 h, el pH 6 fue el más eficaz, mientras que la menor remoción se logró a pH 4.



**Figura 16.** Comparación del porcentaje de remoción entre hidrogeles y xerogeles (V2:100 mL) del colorante AZM a valores de pH 4.0, 6.0 y 8.0.

En la Figura 17, también se identifica la preponderancia de los hidrogeles sobre los xerogeles, productos de la síntesis a V3 sobre la remoción del colorante. Los hidrogeles a pH 8 y a pH 6 tienen un buen desempeño desde el inicio, el pH 4 los alcanza a las 24 h, pero a las 48 y 72 h, los valores de los porcentaje de remoción del colorante AZM son muy similares a cualquier pH, en donde, la mejor remoción es a pH 8, seguido por pH 6 y finalmente a pH 4.

En el caso de las muestras de xerogeles no mantuvieron una cinética progresiva marcada por el valor del pH, observándose un mayor porcentaje de remoción a pH 6 en las primeras 4 h, pero a medida que aumenta el tiempo la remoción del colorante catiónico a pH 4 demostró ser mayor con un porcentaje del 86.22 %, seguido por el valor alcanzado a pH 6 (85.86 %) y por último a pH 8 con un porcentaje de remoción del 84.31%.

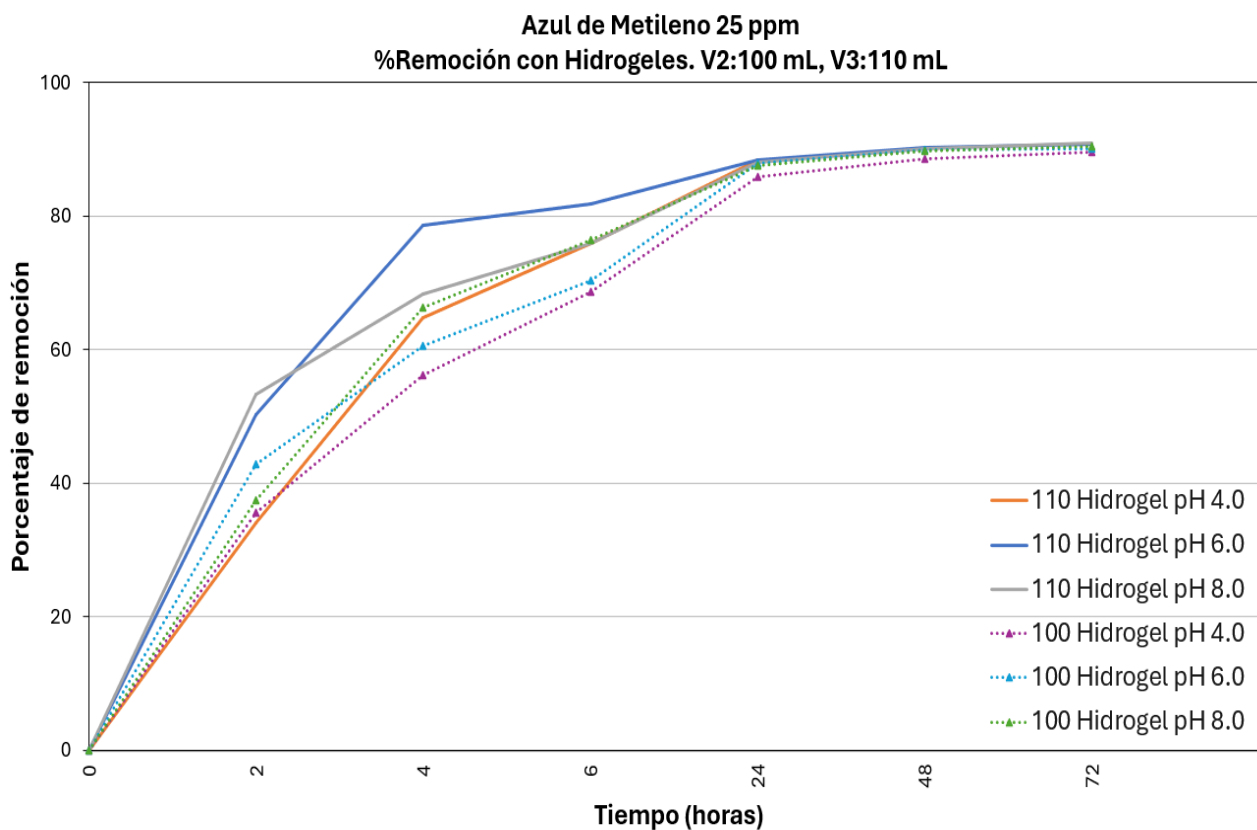


**Figura 17.** Comparación del porcentaje de remoción entre hidrogel y xerogel (V3:110 mL) del colorante AZM a valores de pH 4.0, 6.0 y 8.0.

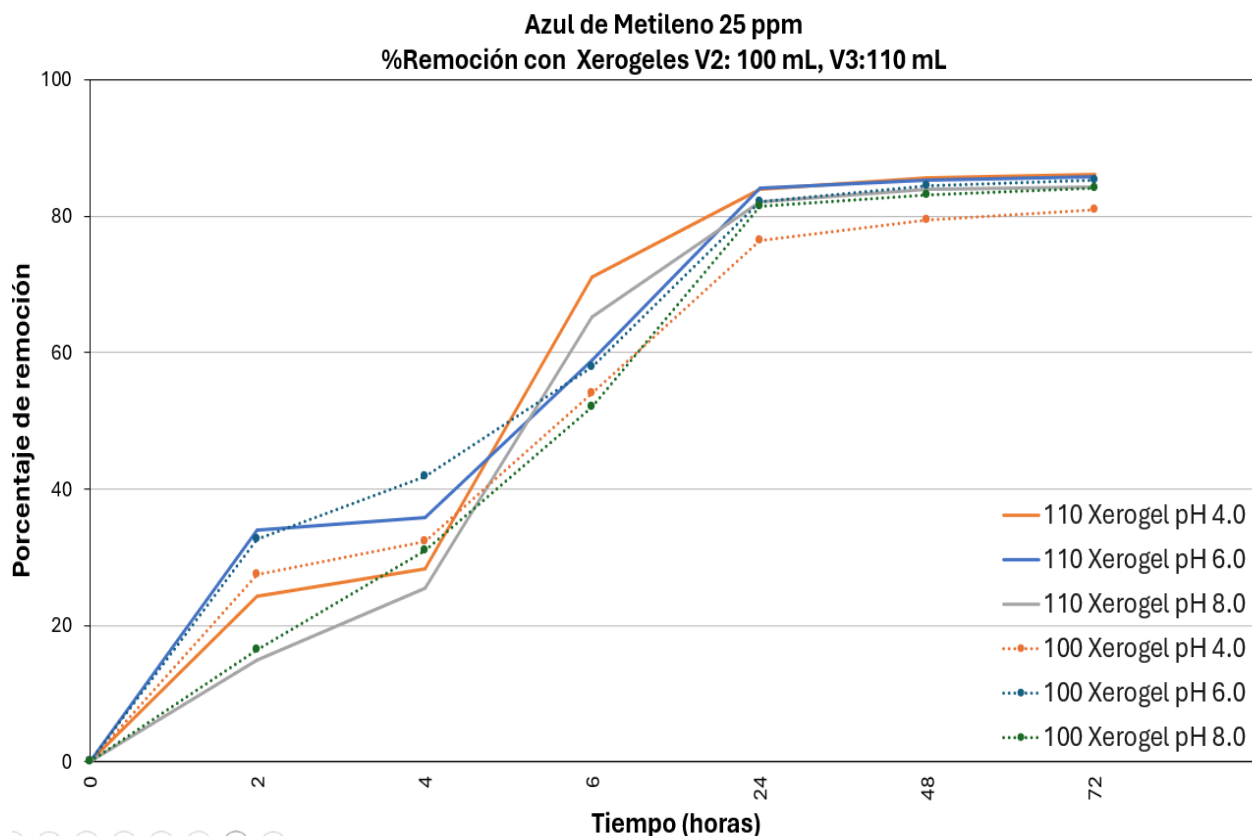
La máxima remoción de AZM se logró con un valor de pH=8 con hidrogel sintetizados con V3:110 mL. Se observó que la remoción aumenta conforme aumenta el valor del pH. Esto se puede deber a que las cadenas de goma xantana y agar-agar contienen grupos funcionales (-COOH, -OH, -SO<sub>3</sub>H), que se desprotonan al elevar el pH generando sitios activos que pueden ser ocupados por los colorantes catiónicos (Hossain *et al.*, 2023).

Las Figuras 18 y 19, muestran el desempeño alcanzado por los hidrogel sintetizado a V2 y V3 y los xerogel sintetizados a V2 y V3. En la Figura 18 se observa de forma innegable que la muestra a V3 en pH 6 es superior a las demás durante la mayor parte

del tratamiento (hasta las 48 h), no obstante al final el producto sintetizado de V3 a pH 8 resultó ser mejor (90.34 %), además también se observa que las muestras V3 a pH 6 y a V2 a pH 4, 6 y 8, se mantuvieron muy próximas (mayores a 89 %), revelando que los hidrogeles a V3 presentan una mejor capacidad de remoción que los obtenidos a V2. La Figura 19 registra que los xerogeles sintetizados a V3 se vuelven óptimos en comparación a los sintetizados a un volumen V2 a partir de 6 h, puesto que al finalizar el tratamiento se registró la máxima remoción en la muestra V3 a pH 4 (86.22 %) y la de menor remoción en la muestra a V2 en pH 4 (80.92 %). Por lo que el BHS sintetizado a V3 mostró ser el insuperable para la remoción de AZM a pH 8 en su forma hidrogel y en pH 4 en su forma de xerogel.



**Figura 18.** Comparación del porcentaje de remoción entre hidrogeles (V2:100 mL y V3:110 mL) del colorante AZM a valores de pH 4.0, 6.0 y 8.0.



**Figura 19.** Comparación del porcentaje de remoción entre xerogel (V2:100 mL y V3:110 mL) del colorante AZM a valores de pH 4.0, 6.0 y 8.0.

### 7.3.3. Espectros de absorción UV-Vis del colorante VEM

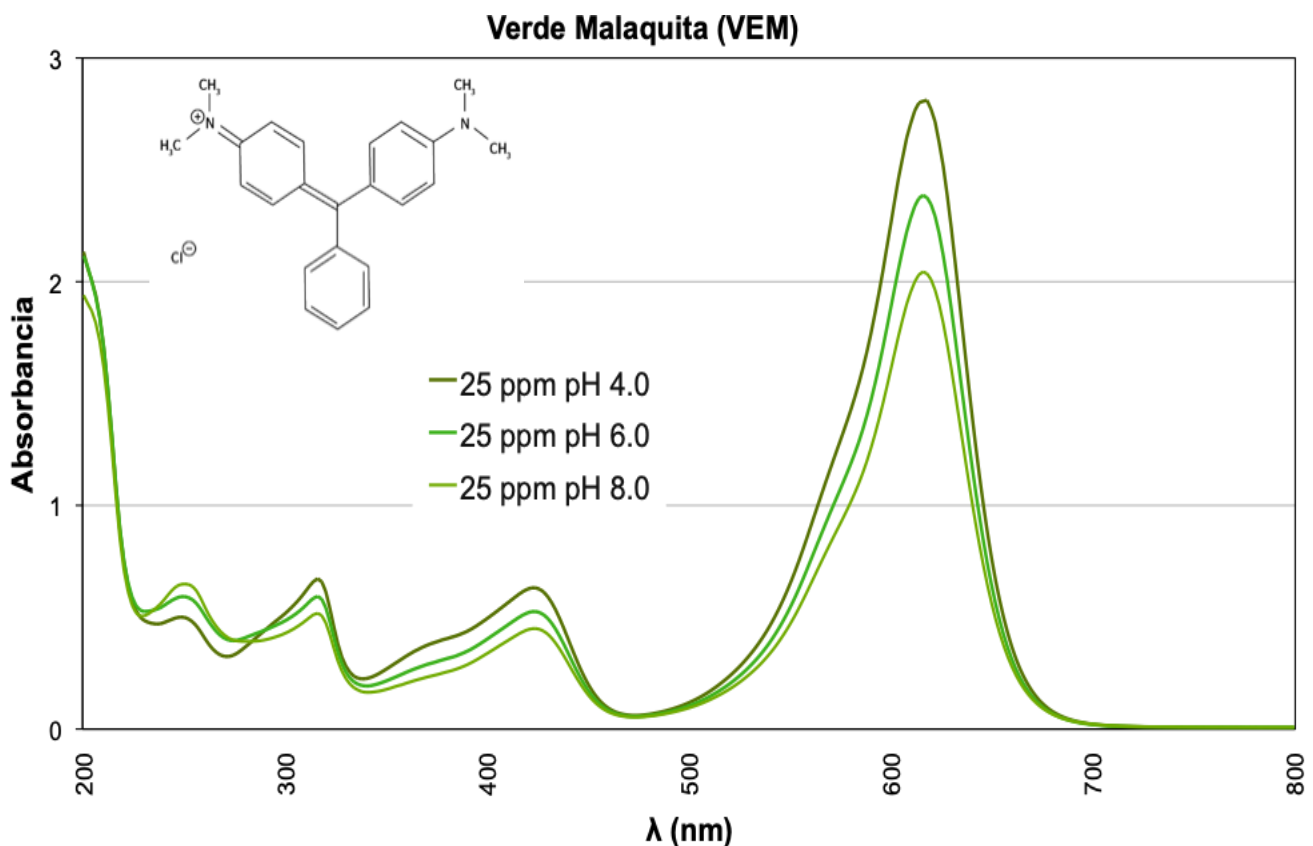
El colorante verde malaquita (VEM) es utilizado por la industria para colorear fibras de papel, yute, lana, seda, acrílicas y cuero, además de tener presencia en la acuicultura y la investigación científica. Es un colorante diaminofenilmetano catiónico hidrosoluble, por lo que, puede permanecer estable en medio acuoso a temperatura ambiente.

El VEM, dependiendo de la estabilidad de la estructura electrónica, tendrá una determinada capacidad de absorción de luz. Los grupos amino del colorante se protonan en medio ácido y se desprotonan conforme al aumento del pH, por lo que la absorción de luz se ve influenciada por el pH del medio (Sharma *et al.*, 2023). Dada la naturaleza de la estructura del colorante, su estabilidad está relacionada con la conjugación  $\pi$  presente entre los anillos aromáticos.

La Figura 20, muestra el espectro de absorción desde 200 a 800 nm y a los diferentes valores de pH 4, 6 y 8, en donde la banda de absorción máxima del colorante VEM se observa a 618 nm y además se identifica otro pico a 424 nm en el rango visible, también

otras bandas en 248 y 316 nm correspondientes a las transiciones electrónicas de los anillos aromáticos sustituidos.

El comportamiento espectral del VEM depende del pH del medio. El espectro con la banda más alta en 618 nm ocurre en medio ácido debido a la protonación presente en la estructura. Al incrementar el pH ocurre un proceso de desprotonación que genera cambios en la carga catiónica de la molécula que puede generar una disminución en la absorción de luz de la misma y la banda podría presentar desplazamientos a una longitud de onda más baja. La forma reducida del VEM puede generar soluciones incoloras que no muestran espectros en el rango visible, pero si en el ultravioleta.



**Figura 20.** Espectro de absorción del colorante verde de malaquita a 25 ppm y banda con un máximo de absorción a 664 nm a diferentes valores de pH.

### 7.3.3.1. Remoción del colorante VEM en hidrogeles y xerogeles sintetizados con 100 y 110 mL de agua (V2:100mL; V3:110mL)

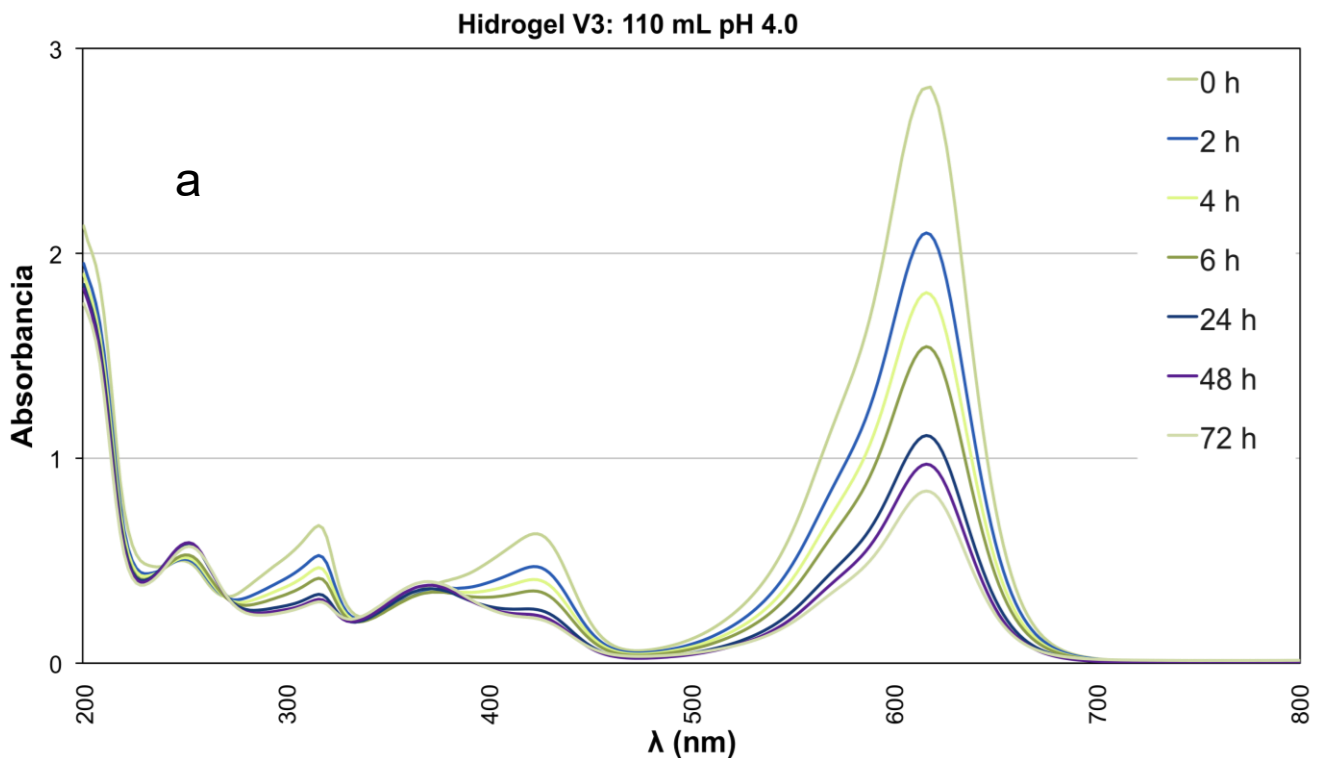
El pico máximo se utilizó como referencia para determinar la capacidad de adsorción a una concentración de 25 ppm a distintos valores de pH = 4, 6, 8, a partir de la ecuación 5 (ver página 41).

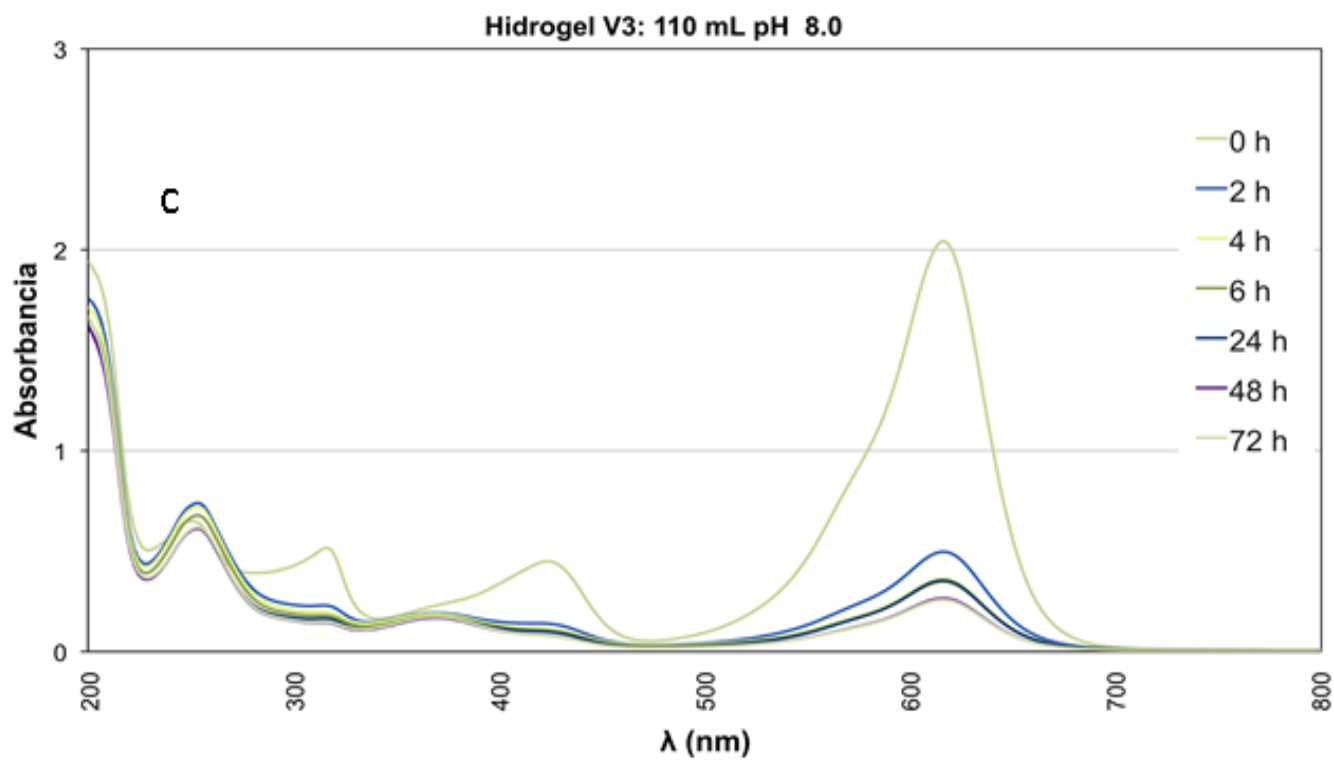
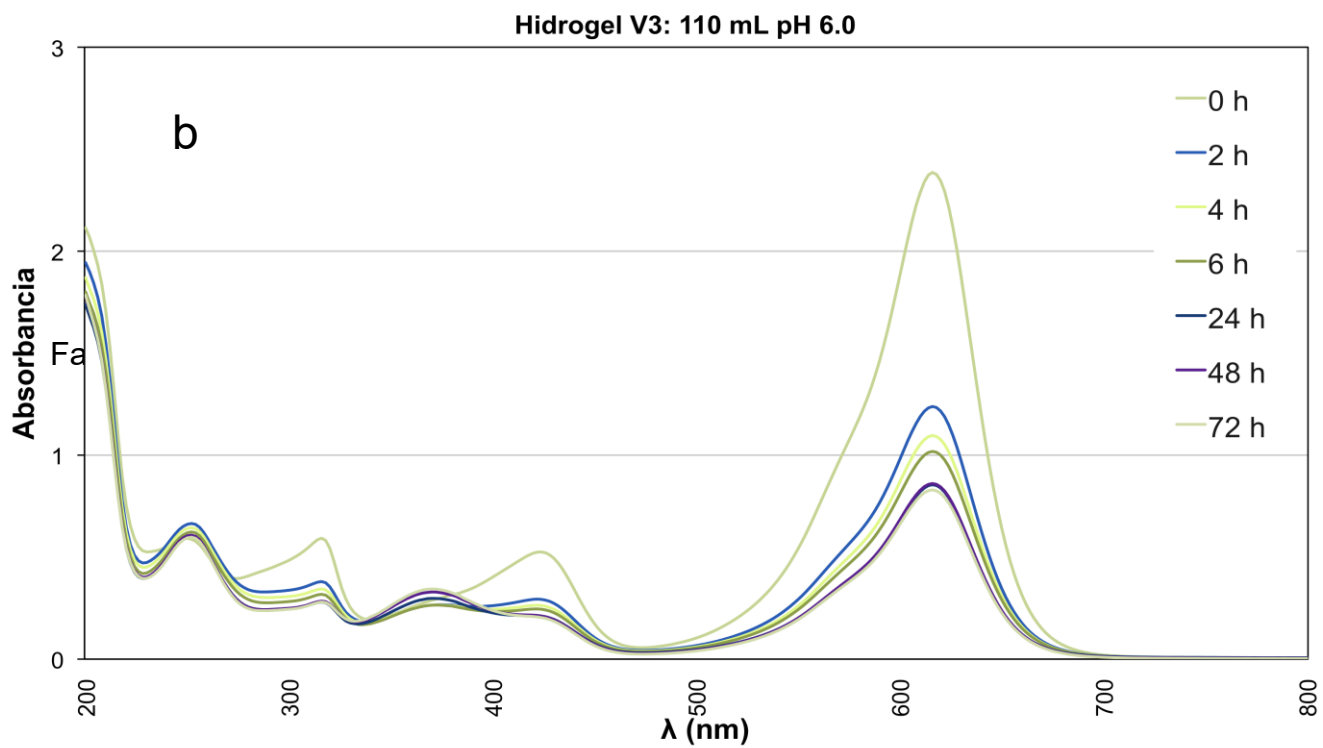
### 7.3.3.1.1. pH = 4.0, 6.0, 8.0

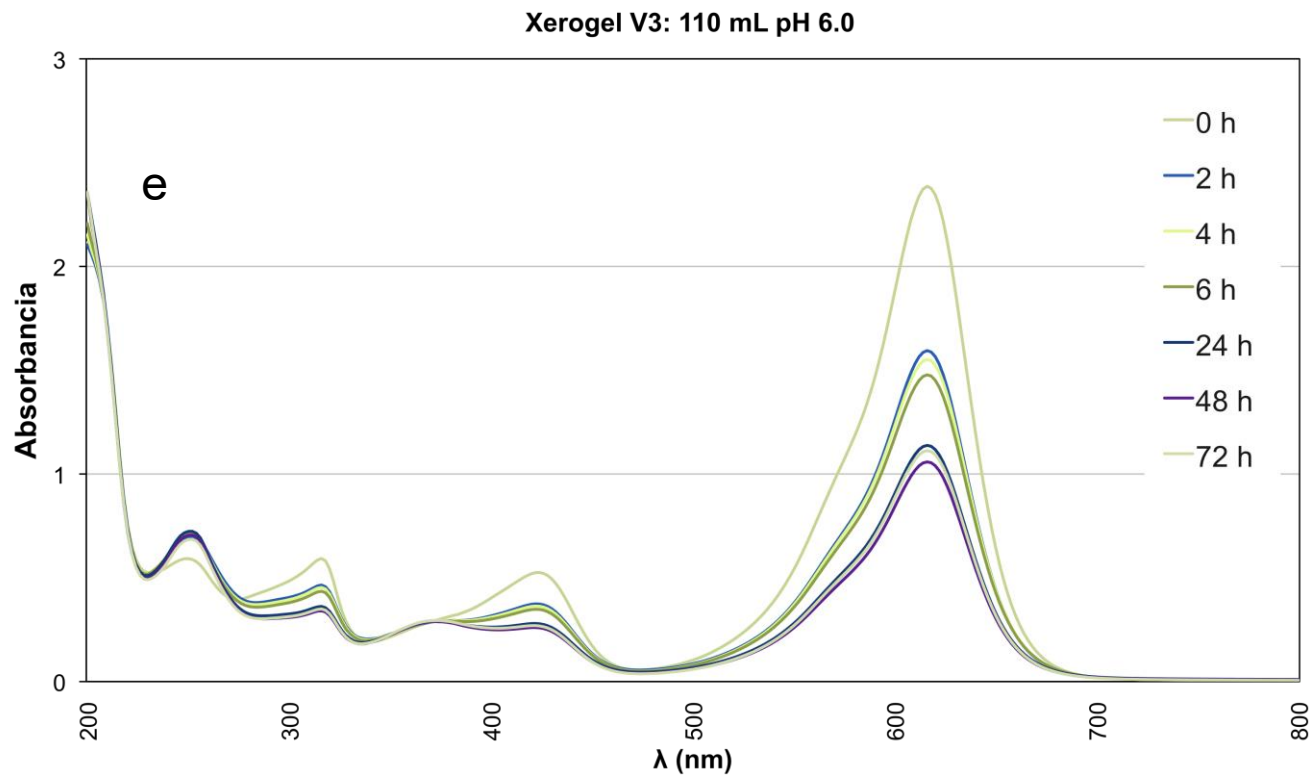
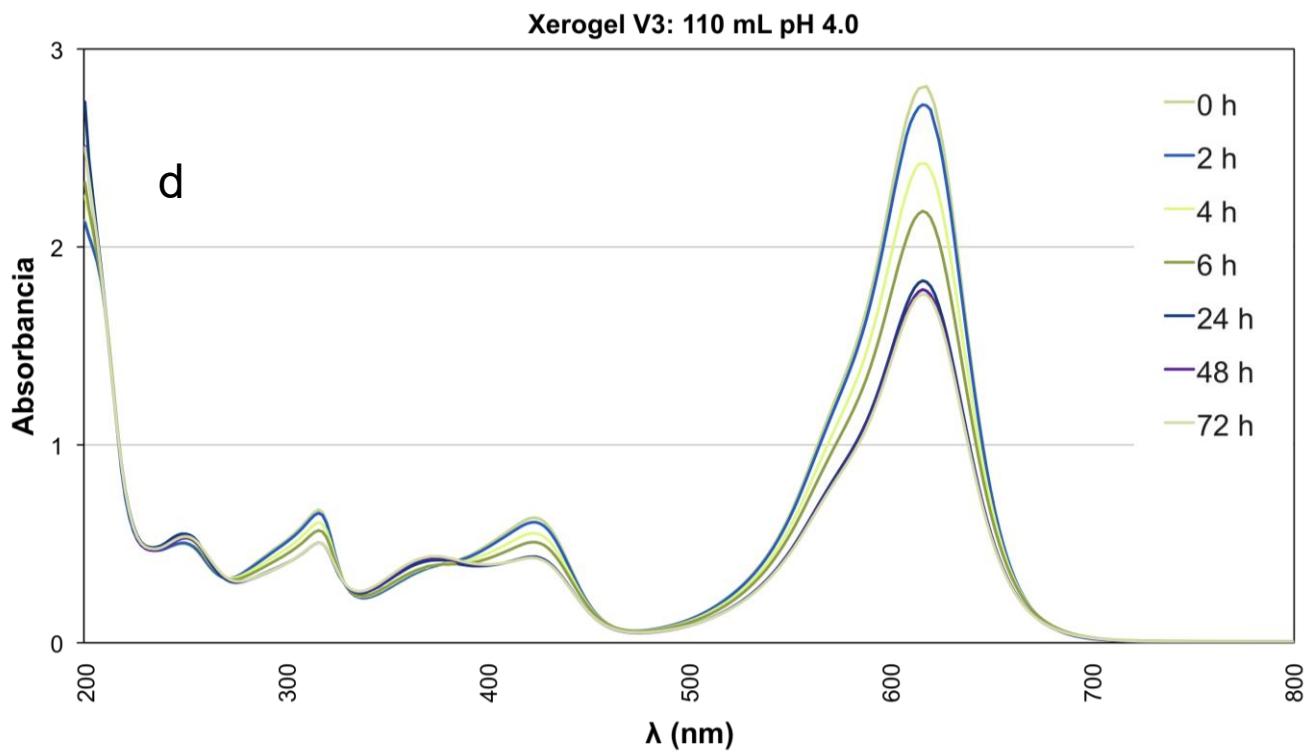
En la Figura 21 (a, b, c, d, e y f), se presentan los espectros de absorción en la región UV-Vis de las soluciones acuosas del colorante VEM antes y después del tratamiento con hidrogeles (Figura 21. a, b, c) y xerogeles (Figuras 21. d, e, f) a pH 4.0, 6.0 y 8.0 exclusivamente de V3:110 mL. El pico máximo en 618 nm y todas las demás bandas de absorción disminuyeron de forma significativa con respecto al tiempo desde 2 hasta 72 h al utilizar hidrogeles en comparación con las muestras de xerogeles.

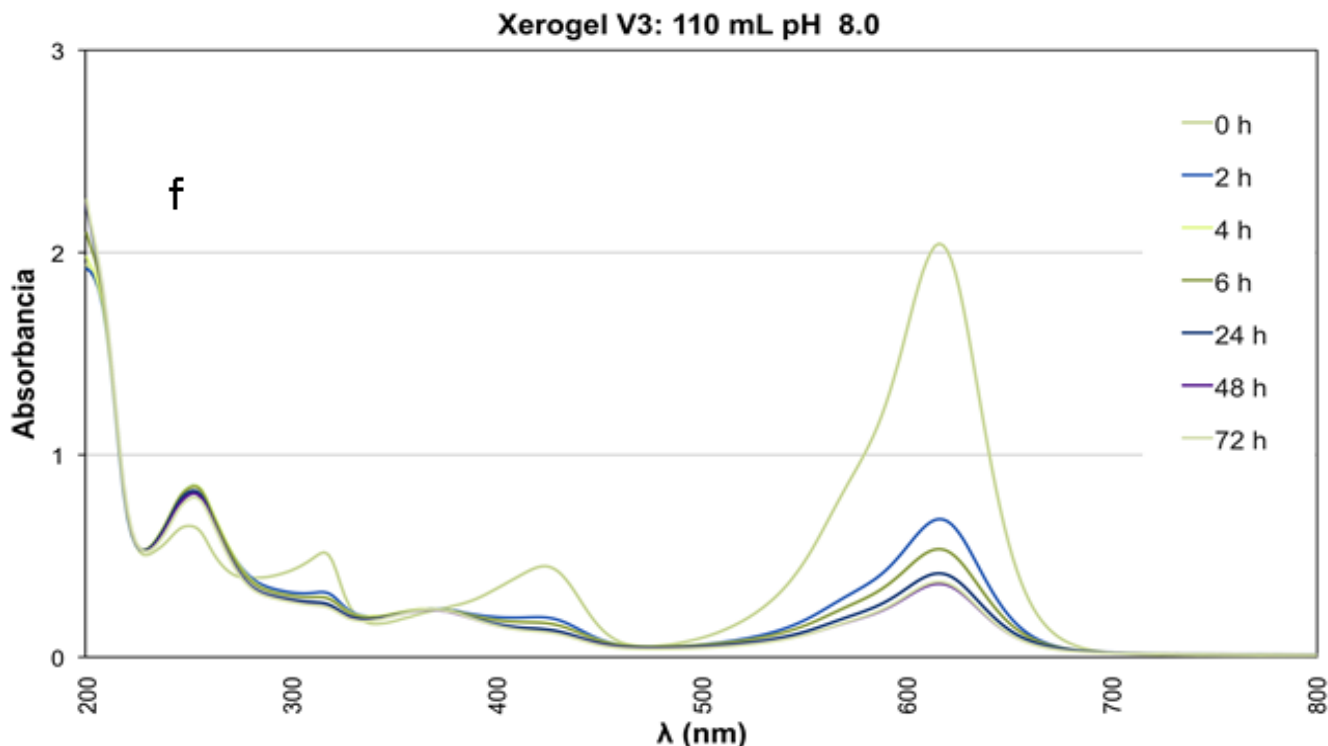
La mayoría de las muestras, tanto de hidrogeles como xerogeles, a la hora 6 de contacto, obtuvieron datos de absorbancia menores a 2.0. Es decir, en medio ácido a pH 4, con muestras de hidrogel se obtuvo una absorbancia de 1.538 y con xerogel 2.172; a pH 6, bajo el tratamiento con xerogel, el valor fue de 1.477 y con el hidrogel fue 1.018; en pH 8, ambos productos tuvieron una absorbancia por debajo de 1 (hidrogel: 0.348, xerogel: 0.532).

Es evidente como el pH tiene influencia en la adsorción tanto en hidrogeles como en xerogeles, logrando a pH básico las mayores remociones del colorante VEM. Además, se identificó con claridad el predominio de las muestras de hidrogel sintetizado a un V3 (110 mL) tras 72 h. Es importante hacer notar que la absorbancia del colorante VEM a partir de las 24 h hasta 72 h de tratamiento tiene valores muy similares en la absorbancia.









**Figura 21.** Espectro de absorción de la solución de verde de malaquita a 25 ppm a valores de pH 4.0, 6.0, 8.0 con un máximo de absorción de 618 nm.

Las Tablas 10 y 11 resumen los porcentajes de remoción del colorante catiónico VEM mediante el uso de hidrogeles y xerogeles sintetizados en volúmenes de 100 mL (V2) y 110 mL (V3), evaluados a pH 4.0, 6.0 y 8.0. Los datos indican que los hidrogeles, tanto en V2 como en V3, muestran una mayor eficiencia de remoción en comparación con los xerogeles bajo las mismas condiciones de síntesis. De acuerdo con los datos obtenidos, el proceso de remoción se incrementaba a medida que el valor de pH es mayor, sin embargo, en el caso de V2, en las muestras de xerogel después de 48 h a pH 6 ocurre una desorción con un valor de 44.71% a 37.32%. Pero es evidente que a pH 8, fue el mejor para hidrogeles como xerogeles, siendo superior el hidrogel sintetizado a V3 al lograr un 87.36 % de remoción, mientras que el hidrogel V2 logró un valor de 83.76 % y en cuanto a los xerogeles, en el mismo medio acuoso a pH 8, el volumen V2 fue del orden de remoción del 82.30 %, por otro lado, el V3 alcanzó una cifra de 81.80 %. Por lo que el valor de pH 8 es el óptimo para el colorante catiónico VEM.

En el caso de los hidrogeles, se presentó una ligera desorción después de 24 h a pH 6 con el material sintetizado a V3, pero no fue muy significativo (de 64.16 % a 63.92 %). Otro caso fue con el hidrogel a pH 8 de 6 a 24 h de tratamiento, sintetizado a V3, pero también fue mínimo, de 82.95 % bajó a 82.62 %. Es interesante que el fenómeno de desorción no se presentó en las muestras de hidrogeles sintetizados a un volumen V2, sin embargo, sus valores de remoción están por debajo de los de V3, por lo anterior

podemos concluir que los hidrogeles sintetizados a 110 mL son la mejor opción para la remoción del colorante catiónico VEM.

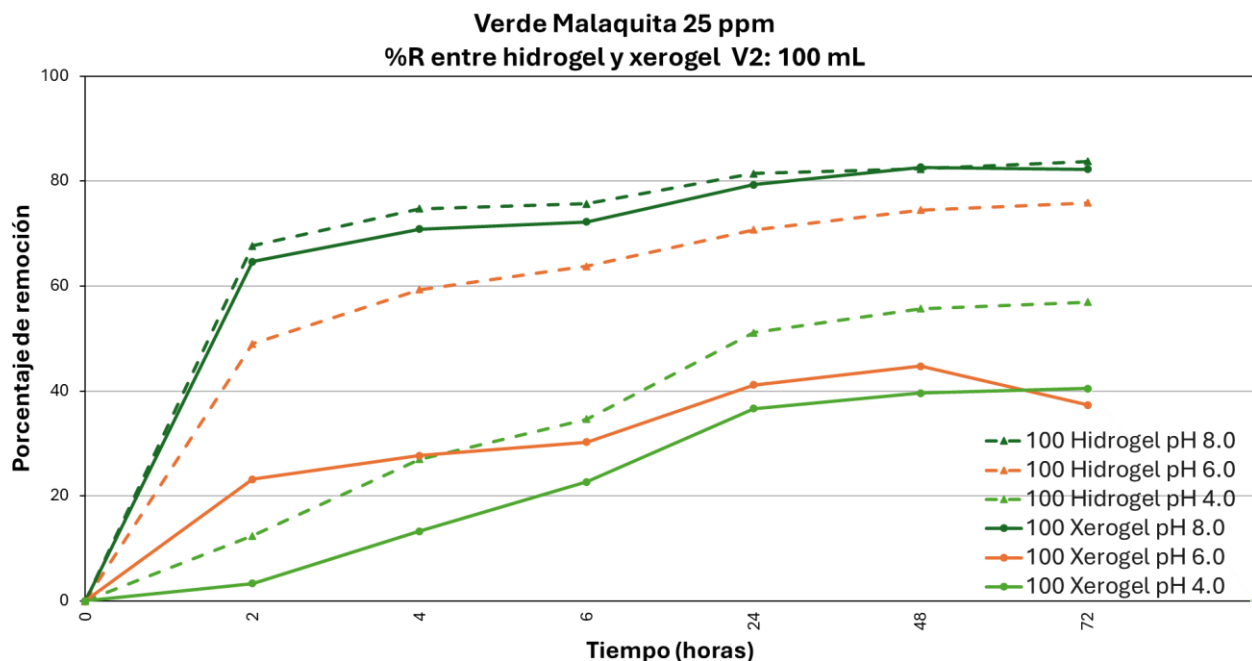
**Tabla 10.** Porcentaje de remoción de VEM en hidrogeles y xerogeles (V2: 100 mL) para valores de pH 4.0, 6.0, 8.0.

<b>%R de VEM 25 ppm V2: 100 mL</b>						
<b>BHS</b>	<b>2 h</b>	<b>4 h</b>	<b>6 h</b>	<b>24 h</b>	<b>48 h</b>	<b>72 h</b>
Hidrogel pH 4.0	12.38	27.02	34.66	51.15	55.72	56.94
Hidrogel pH 6.0	48.98	59.33	63.82	70.73	74.53	75.87
Hidrogel pH 8.0	67.67	74.74	75.70	81.50	82.31	83.76
Xerogel pH 4.0	3.30	13.24	22.70	36.64	39.58	40.48
Xerogel pH 6.0	23.19	27.66	30.28	41.14	44.71	37.32
Xerogel pH 8.0	64.69	70.89	72.26	79.37	82.66	82.31

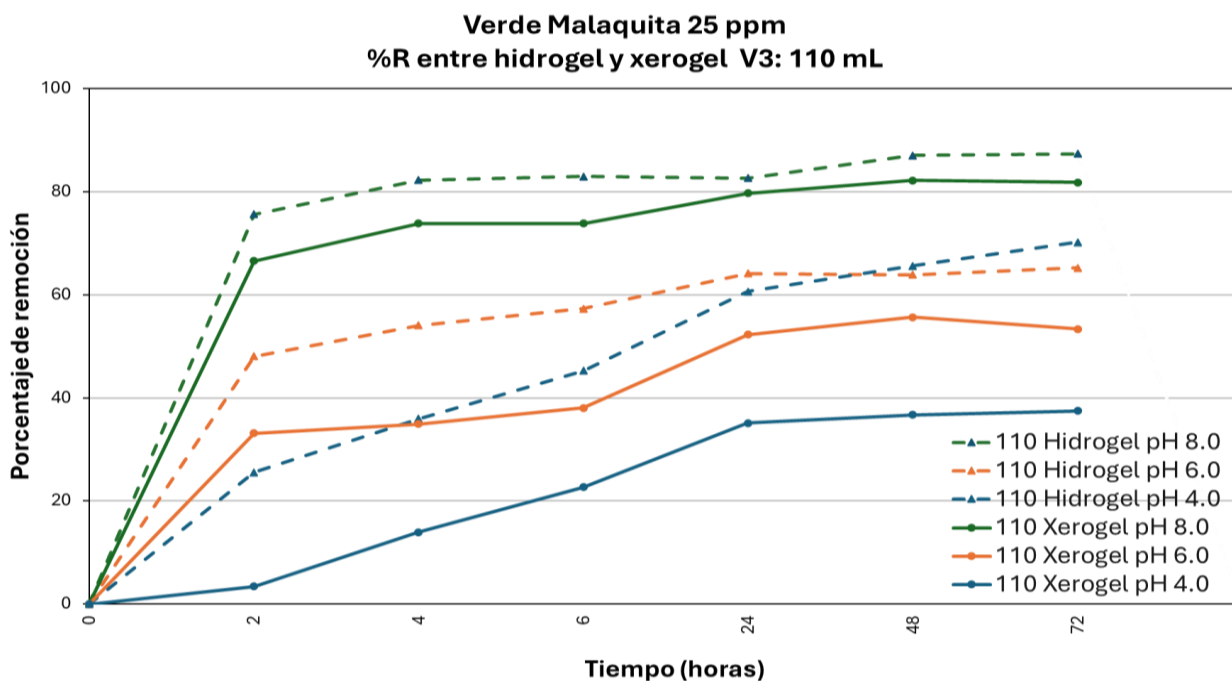
**Tabla 11.** Porcentaje de remoción de VEM en hidrogeles y xerogeles (V3: 110 mL) para valores de pH 4.0, 6.0, 8.0.

<b>%R de VEM 25 ppm V3: 110 mL</b>						
<b>BHS</b>	<b>2 h</b>	<b>4 h</b>	<b>6 h</b>	<b>24 h</b>	<b>48 h</b>	<b>72 h</b>
Hidrogel pH 4.0	25.59	35.96	45.25	60.63	65.59	70.24
Hidrogel pH 6.0	48.09	54.06	57.32	64.16	63.92	65.22
Hidrogel pH 8.0	75.66	82.24	82.95	82.62	87.02	87.36
Xerogel pH 4.0	3.46	13.98	22.71	35.15	36.76	37.49
Xerogel pH 6.0	33.17	34.97	38.07	52.31	55.64	53.37
Xerogel pH 8.0	66.61	73.87	73.85	79.73	82.19	81.80

Las Figuras 22 y 23, muestran los gráficos de porcentaje de remoción, con respecto al tiempo, de las Tablas 10 y 11, de cada caso experimental. En ambas gráficas se identifica el mejor desempeño de remoción del hidrogel a pH 8, seguido por el xerogel en la mismas condiciones. En la Figura 22, correspondiente a la síntesis con volumen V2, se observa que los hidrogeles a los distintos valores de pH, muestran el mayor porcentaje de remoción que en el caso de los xerogeles a pH 4 y 6. La Figura 23, nos informa el mismo comportamiento que el volumen V2.

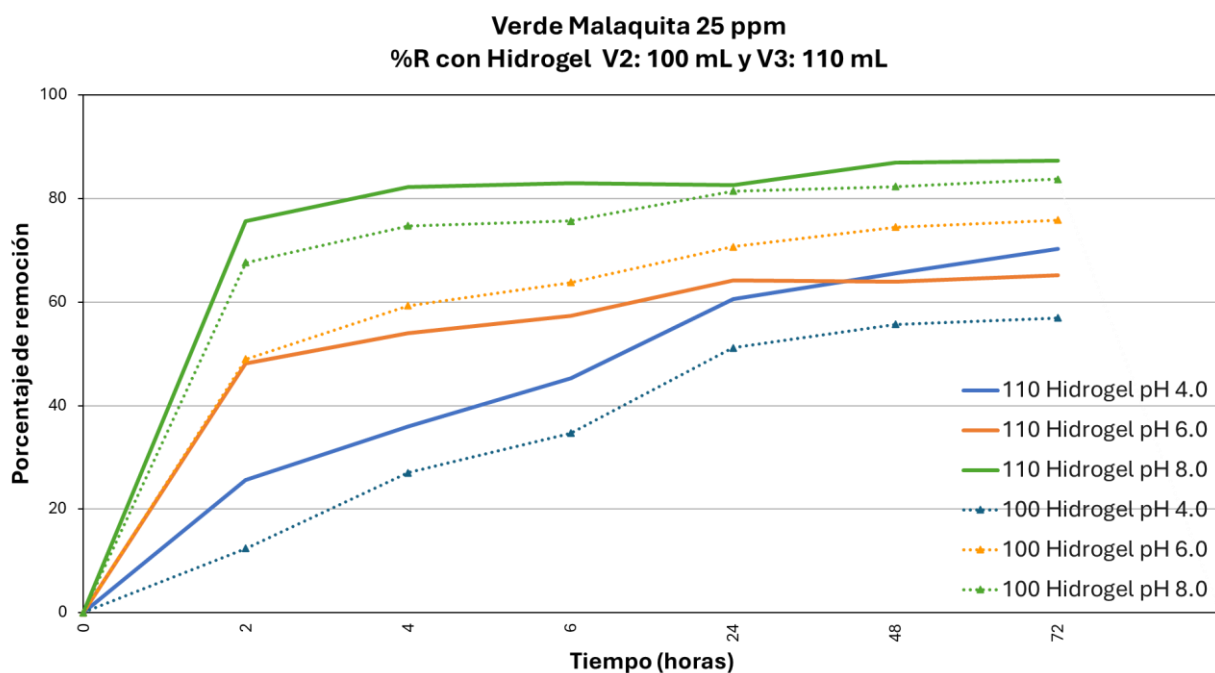


**Figura 22.** Comparación del porcentaje de remoción entre hidrogelos y xerogelos (V2:100 mL) del colorante VEM a valores de pH 4.0, 6.0 y 8.0.

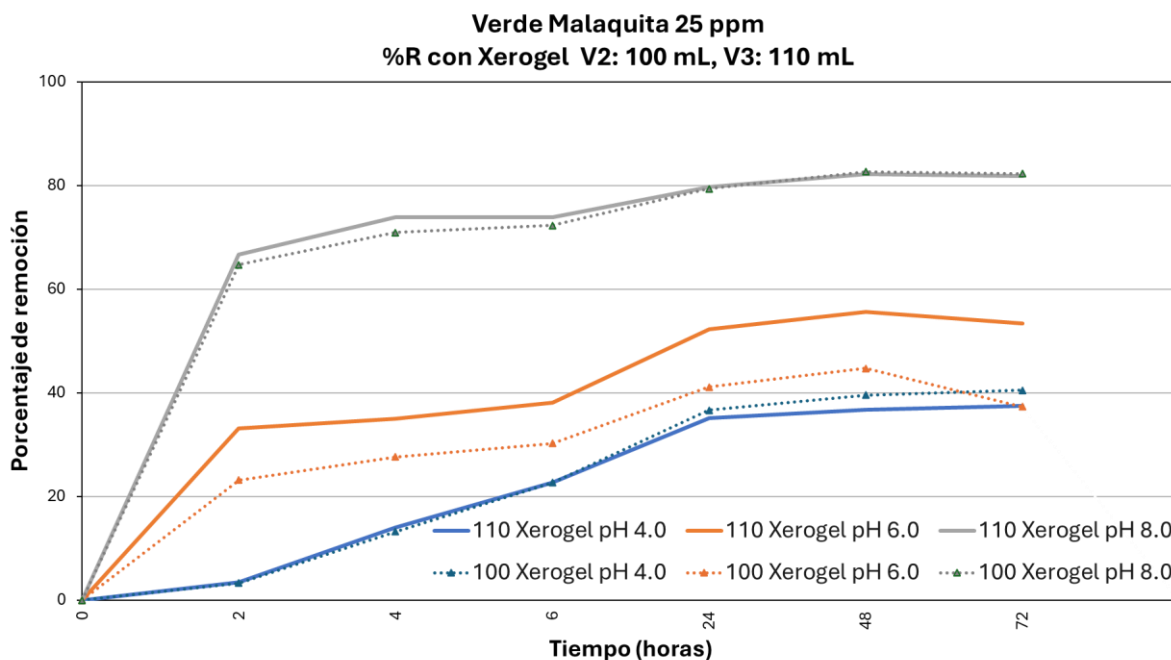


**Figura 23.** Comparación del porcentaje de remoción entre hidrogelos y xerogelos (V3:110 mL) del colorante VEM a valores de pH 4.0, 6.0 y 8.0.

Las Figuras 24 y 25 exhiben la comparación de hidrogeles sintetizados a V2 y V3 y los xerogeles sintetizados a V2 y V3, respectivamente. En la Figura 24, se demuestra de manera feaciente que los hidrogeles V3 a pH 8, poseen la máxima capacidad de adsorción para remover el colorante VEM (87.36 %), seguido del hidrogel V2 a pH 8 (83.76%). Mientras que las muestras de hidrogeles a pH 4 y 6 de V2 y V3 registraron remociones menores al 75%. La Figura 25 muestra que los xerogeles a pH 8 logran remociones más predominantes, por lo tanto, los xerogeles V2 afirman un mejor desempeño que el V3.



**Figura 24.** Comparación del porcentaje de remoción entre hidrogeles (V2:100 mL y V3:110 mL) del colorante VEM a valores de pH 4.0, 6.0 y 8.



**Figura 25.** Comparación del porcentaje de remoción entre xerogeles (V2:100 mL y V3:110 mL) del colorante VEM a valores de pH 4.0, 6.0 y 8.0.

Los grupos funcionales presentes en los polímeros naturales o BHS como: ( $-\text{COOH}$ ,  $-\text{OH}$ ,  $-\text{SO}_3\text{H}$ ), fueron eficaces en la remoción de ambos colorantes. La goma xantana (con su carga aniónica natural, por el piruvato presente en la manosa terminal) y el agar-agar (con sus fracciones aniónicas por la agarpectina) brindan al material una carga negativa que se desprotonan al elevar el pH y favorecen la atracción de las moléculas del colorante catiónico (Hossain *et al.*, 2023), de forma eficaz en AZM, lo que favoreció la interacción de los colorantes (cationes) a la superficie de los hidrogeles sintetizados goma de xantana y agar-agar. La remoción en medio ácido fue menor, lo cual puede deberse a que el medio favorece la protonación, por lo que el contacto del adsorbente con el colorante disminuye (Choudhary *et al.*, 2020).

## 8. CONCLUSIONES

Al término de este trabajo de investigación se establecen las siguientes conclusiones:

1. Los BHS fueron obtenidos en las siguientes condiciones de síntesis: masa de GX/AA 1.25 g; iniciador  $K_2S_2O_8 = 9.954 \times 10^{-3}$  M; agente entrecruzante MBA =  $3.007 \times 10^{-3}$  M; monómero = AA  $3.274 \times 10^{-2}$  M, volumen= 110 mL y tiempo de irradiación 80 s.
2. El hidrogel sintetizado con un volumen de síntesis de 110 mL (V3), fue el de mejor desempeño por sus altos porcentajes de hinchamiento que permitieron una alta área superficial para ser usado como adsorbente para la remoción de colorantes catiónicos textiles.
3. No se alcanzó el equilibrio de hinchamiento (absorción máxima constante de disolvente). los porcentajes de hinchamiento fueron suficientes para caracterizar a los hidrogeles sintetizados como superabsorbentes.
4. Las muestras de hidrogel de mayor porcentaje de hinchamiento (V3: 110 mL), a pH 8, obtuvieron el mejor desempeño para la remoción de los colorantes AZM y VEM. En AZM removi6 un 90.91% y el VEM un 87.36% en 72 horas de contacto por adsorción. En cuanto a los xerogeles, la muestra correspondiente al producto sintetizado a un volumen de V3, proporcion6 el mejor rendimiento en remoci6n para AZM a pH 4, con un valor de 86.22%, mientras que en VEM, fue con un volumen V2 en medio acuoso a pH 8 (82.30 %).

## 9. BIBLIOGRAFÍA

1. Afrin, S., Shahruzzaman, M., Haque, P., Islam, M. S., Hossain, S., Rashid, T. U., Ahmed, T., Takafuji, M., y Rahman, M. M. (2022). Advanced CNC/PEG/PDMAA semi-IPN hydrogel for drug delivery management in wound healing. *Gels*, 8(6). <https://doi.org/10.3390/gels8060340>
2. Ahmaruzzaman, M., Roy, P., Bonilla-Petriciolet, A., Badawi, M., Ganachari, S. V., Shetti, N. P., y Aminabhavi, T. M. (2023). Polymeric hydrogels-based materials for wastewater treatment. *Chemosphere*, 331, 138743. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138743>
3. Ahmed, E. M. (2015). Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research*, 6(2), 105-121. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006>
4. Alsaid, Y., Wu, S., Wu, D., Du, Y., Shi, L., Khodambashi, R., Rico, R., Hua, M., Yan, Y., Zhao, Y., Aukes, D., y He, X. (2021). Tunable sponge-like hierarchically porous hydrogels with simultaneously enhanced diffusivity and mechanical properties. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.)*, 33(20), e2008235. <https://doi.org/10.1002/adma.202008235>
5. Al-Tohamy, R., Ali, S. S., Li, F., Okasha, K. M., Mahmoud, Y. A.-G., Elsamahy, T., Jiao, H., Fu, Y., y Sun, J. (2022). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 231, 113160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160>
6. Armisen, R., y Gaiatas, F. (2009). Agar. En G.O. Phillips, y P. A. Williams. *Handbook of Hydrocolloids* (pp. 82–107). Woodhead Publishing.
7. Bashir, S., Hina, M., Iqbal, J., Rajpar, A. H., Mujtaba, M. A., Alghamdi, N. A., Wageh, S., Ramesh, K., y Ramesh, S. (2020). Fundamental Concepts of Hydrogels: Synthesis, Properties, and Their Applications. *Polymers*, 12 (11). <https://doi.org/10.3390/polym12112702>
8. Batouti, M. E., Sadik, W., Eldemerdash, A. G., Hanafy, E., y Fetouh, H. A. (2023). New and innovative microwave-assisted technology for synthesis of guar gum-grafted acrylamide hydrogel superabsorbent for the removal of acid red 8 dye from industrial wastewater. *Polymer Bulletin*, 80, 4965–4989. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04254-7>
9. Belattmania, Z., Bhaby, S., Nadri, A., Khaya, K., Bentiss, F., Jama, C., Reani, A., Vasconcelos, V., y Sabour, B. (2021). *Gracilaria gracilis* (Gracilariales, Rhodophyta) from Dakhla (southern Moroccan Atlantic Coast) as source of agar: Content, chemical characteristics, and gelling properties. *Marine Drugs*, 19(12), 672. <https://doi.org/10.3390/md19120672>

10. Bertasa, M., Doderò, A., Alloisio, M., Vicini, S., Riedo, C., Sansonetti, A., Scalarone, D., y Castellano, M. (2020). Agar gel strength: A correlation study between chemical composition and rheological properties. *European Polymer Journal*, 123, 109442. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.109442>
11. Bhat, I. M., Wani, S. M., Mir, S. A., y Masoodi, F. A. (2022). Advances in xanthan gum production, modifications and its applications. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 42, 102328. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102328>
12. Bueno, V. B., Bentini, R., Catalani, L. H., y Petri, D. F. S. (2013). Synthesis and swelling behavior of xanthan-based hydrogels. *Carbohydrate Polymers*, 92(2), 1091–1099. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.10.062>
13. Buwalda, S. J., Boere, K. W. M., Dijkstra, P. J., Feijen, J., Vermonden, T., y Hennink, W. E. (2014). Hydrogels in a historical perspective: from simple networks to smart materials. *Journal of Controlled Release*, 190, 254–273. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2014.03.05>
14. Călina, I., Demeter, M., Crăciun, G., Scărișoreanu, A., y Mănăilă, E. (2024). The influence of the structural architecture on the swelling kinetics and the network behavior of sodium-alginate-based hydrogels cross-linked with ionizing radiation. *Gels* (Basel, Switzerland), 10(9), 588. <https://doi.org/10.3390/gels10090588>
15. Che, J., y Yang, X. (2022). A recent (2009-2021) perspective on sustainable color and textile coloration using natural plant resources. *Heliyon*, 8(10), e10979. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10979>
16. Choudhary, S., Sharma, K., Kumar, V., Bhatia, J. K., Sharma, S., y Sharma, V. (2020). Microwave-assisted synthesis of gum gellan-cl-poly(acrylic-co-methacrylic acid) hydrogel for cationic dyes removal. *Polymer Bulletin*, 77, 4917-4935. <https://doi.org/10.1007/s00289-019-02998-3>
17. Coreño-Alonso, J., y Méndez-Bautista, M. T. (2010). Relación estructura-propiedades de polímeros. *Educación Química*, 21(4), 291-299. [https://doi.org/10.1016/s0187-893x\(18\)30098-3](https://doi.org/10.1016/s0187-893x(18)30098-3)
18. CyberColloids. (2024). Gelation process of hydrocolloids [Imagen]. CyberColloids. <https://cybercolloids.net/wp-content/uploads/2024/05/Picture1-768x243.png>
19. Dinu, M. V., y Dragan, E. S. (2018). Macroporous Hydrogels: Preparation, Properties, and Applications. En V. Thakur y M. Thakur (Eds.), *Hydrogels* (pp.51-85). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6077-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6077-9_3)
20. Dodda, J. M., Deshmukh, K., Bezuidenhout, D., y Yeh, Y. C. (2023). Hydrogels: Definition, history, classifications, formation, constitutive characteristics, and applications. En J. M. Dodda, K. Deshmukh y D. Bezuidenhout (Eds.), *Multicomponent Hydrogels Smart Materials for Biomedical* (pp. 1–25). The Royal Society of Chemistry.
21. Dong, Y., Ghasemzadeh, M., Khorsandi, Z., Sheibani, R., y Nasrollahzadeh, M. (2024). Starch-based hydrogels for environmental applications: A review.

- International Journal of Biological Macromolecules*, 269(Pt 2), 131956.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131956>
22. Dutta, S., Adhikary, S., Bhattacharya, S., Roy, D., Chatterjee, S., Chakraborty, A., Banerjee, D., Ganguly, A., Nanda, S., y Rajak, P. (2024). Contamination of textile dyes in aquatic environment: Adverse impacts on aquatic ecosystem and human health, and its management using bioremediation. *Journal of Environmental Management*, 353, 120103. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120103>
  23. El Idrissi, A., Channab, B.-E., Essamlali, Y., y Zahouily, M. (2024). Superabsorbent hydrogels based on natural polysaccharides: Classification, synthesis, physicochemical properties, and agronomic efficacy under abiotic stress conditions: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 258(Pt 2), 128909. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128909>
  24. Elsayed, M. M. (2019). Hydrogel Preparation Technologies: Relevance Kinetics, Thermodynamics and Scaling up Aspects. *Journal of Polymers and the Environment*, 27, 871-891. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01376-4>
  25. Fallourd, M. J., y Viscione, L. (2009). 1 - Ingredient selection for stabilisation and texture optimisation of functional beverages and the inclusion of dietary fibre. En P. Paquin (Ed.), *Functional and Speciality Beverage Technology* (pp. 3-38). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845695569.1.3>.
  26. FAO. (2023). *El agua es vida, el agua nutre. No dejar a nadie atrás*. Roma: FAO. <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2023/10/cc6758es.pdf>
  27. Feiner, G. (2006). Additives: phosphates, salts (sodium chloride and potassium chloride, citrate, lactate) and hydrocolloids. *Meat Products Handbook* (pp. 72–88). Elsevier.
  28. Foudazi, R., Zowada, R., Manasas-Zloczower, I., y Feke, D. L. (2023). Porous Hydrogels: Present Challenges and Future Opportunities. *Langmuir*, 39 (6), 2092-2111. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02253>
  29. García-Ochoa, F., Santos, V. E., Casas, J. A., y Gómez, E. (2000). Xanthan gum: production, recovery, and properties. *Biotechnology Advances*, 18(7), 549–579. [https://doi.org/10.1016/s0734-9750\(00\)00050-1](https://doi.org/10.1016/s0734-9750(00)00050-1)
  30. Ghanbari, E., Picken, S. J., y van Esch, J. H. (2023). Analysis of differential scanning calorimetry (DSC): determining the transition temperatures, and enthalpy and heat capacity changes in multicomponent systems by analytical model fitting. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148, 12393-12409. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12356-1>
  31. Gulrez, S., Al-Assaf, S., y Phillips, G. (2011). Hydrogels: Methods of Preparation, Characterisation and Applications. En A. Carpi. *Progress in Molecular and Environmental Bioengineering – From Analysis and Modeling to Technology Applications* (117-150). In Tech.

32. Han, D., Meng, F., Li, J., Liu, H., Cao, J., Song, X., Chen, H., y Xu, W. (2024). Synthesis, properties and application of pesticides encapsulated hydrogels. *European Polymer Journal*, 215, 113196. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.113196>.
33. Harris, D. C. (2007). *Análisis químico cuantitativo*. Reverté.
34. Hassanisaadi, M., Vatankhah, M., Kennedy, J. F., Rabiei, A., y Saberi Riseh, R. (2025). Advancements in xanthan gum: A macromolecule for encapsulating plant probiotic bacteria with enhanced properties. *Carbohydrate Polymers*, 348(Pt A), 122801. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122801>
35. Ho, T.-C., Chang, C.-C., Chan, H.-P., Chung, T.-W., Shu, C.-W., Chuang, K.-P., Duh, T.-H., Yang, M.-H., y Tyan, Y.-C. (2022). Hydrogels: Properties and applications in biomedicine. *Molecules*, 27(9), 2902. <https://doi.org/10.3390/molecules27092902>
36. Hossain, M. S., Hossain, M. M., Khatun, M. K., y Hossain, K. R. (2023). Hydrogel-based superadsorbents for efficient removal of heavy metals in industrial wastewater treatment and environmental conservation. *Environmental Functional Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.efmat.2024.01.001>
37. Hu, X.-S., Liang, R., y Sun, G. (2018). Super-adsorbent hydrogel for removal of methylene blue dye from aqueous solution. *Journal of Materials Chemistry A*, 6 (36), 17612–17624. <https://doi.org/10.1039/C8TA04722G>
38. INEGI. (2021). *Fabricación de insumos, acabados textiles y prendas de vestir*. Censos Económicos 2019. INEGI. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvini/inegi/productos/nueva\\_estruc/889463901082.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvini/inegi/productos/nueva_estruc/889463901082.pdf)
39. Iqbal, F. M., Iqbal, S., Nasir, B., Hassan, W., Ahmed, H., y Iftikhar, S. Y. (2022). Formulation of captopril-loaded hydrogel by microwave-assisted free radical polymerization and its evaluation. *Polymer Bulletin*, 79, 7613-7633. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03867-8>
40. Islam, T., Repon, M. R., Islam, T., Sarwar, Z., y Rahman, M. M. (2023). Impact of textile dyes on health and ecosystem: a review of structure, causes, and potential solutions. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 9207–9242. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24398-3>
41. Jadav, M., Pooja, D., Adams, D. J., y Kulhari, H. (2023). Advances in xanthan gum-based systems for the delivery of therapeutic agents. *Pharmaceutics*, 15(2), 402. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15020402>
42. Jiang, H., Duan, L., Ren, X., y Gao, G. (2019). Hydrophobic association hydrogels with excellent mechanical and self-healing properties. *European Polymer Journal*, 112, 660–669. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.10.031>
43. Khan, I., Saeed, K., Zekker, I., Zhang, B., Hendi, A. H., Ahmad, A., Ahmad, S., Zada, N., Ahmad, H., Shah, L. A., Shah, T., y Khan, I. (2022). Review on

- Methylene Blue: Its Properties, Uses, Toxicity and Photodegradation. *Water*, 14(2), 242. <https://doi.org/10.3390/w14020242>
44. Khoobakht, F., Khorshidi, S., Bahmanyar, F., Hosseini, S. M., Aminikhah, N., Farhoodi, M., y Mirmoghtadaie, L. (2024). Modification of mechanical, rheological and structural properties of agar hydrogel using xanthan and locust bean gum. *Food Hydrocolloids*, 147(Part. A), 109411. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109411>
  45. Kim, S., Park, C., Kim, T.-H., Lee, J., y Kim, S.-W. (2003). COD reduction and decolorization of textile effluent using a combined process. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 95(1), 102–105. [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(03\)80156-1](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(03)80156-1)
  46. Krasaekoopt, W., y Bhandari, B. (2012). 18 - Properties and applications of different probiotic delivery systems. En N. Garti y D. J. McClements (Eds.), *Encapsulation Technologies and Delivery Systems for Food Ingredients and Nutraceuticals* (pp. 541-594). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857095909.4.541>
  47. Kumar, A., Rao, K. M., y Han, S. S. (2018). Application of xanthan gum as polysaccharide in tissue engineering: A review. *Carbohydrate Polymers*, 180, 128–144. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.10.009>
  48. LibreTexts (s.f.). Electromagnetic Spectrum. [Imagen]. Chemistry LibreTexts. [https://chem.libretexts.org/@api/deki/files/77962/900px-EM\\_spectrum.svg.png?revision=1](https://chem.libretexts.org/@api/deki/files/77962/900px-EM_spectrum.svg.png?revision=1)
  49. Lin, C. C., y Anseth, K. S. (2009). PEG Hydrogels for the Controlled Release of Biomolecules in Regenerative Medicine. *Pharm Res*, 26, 631-643. <https://doi.org/10.1007/s11095-008-9801-2>
  50. Makhado, E., Pandey, S., Nomngongo, P.N., y Ramontja, J. (2018). Preparation and characterization of xanthan gum-cl-poly(acrylic acid)/o-MWCNTs hydrogel nanocomposite as highly effective re-usable adsorbent for removal of methylene blue from aqueous solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 513, 700-714. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.11.060>
  51. Marcano, D. (2018). *Introducción a la Química de los colorantes. Colección Divulgación Científica y Tecnológica*. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales. <http://caelum.ucv.ve/bitstream/10872/19390/1/colorantes%20listo%20%2Bisbn.pdf>
  52. McArdle, R., y Hamill, R. (2011). 10 - Utilisation of hydrocolloids in processed meat systems. En J. P. Kerry y J. F. Kerry (Eds.), *Processed Meats: Improving Safety, Nutrition and Quality* (pp. 243-269). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857092946.2.243>.

53. Mehta, P., Sharma, M., y Devi, M. (2023). Hydrogels: An overview of its classifications, properties, and applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.106145>.
54. Mehvari, F., Ramezanzade, V., An, J., Kim, J., Dinari, M., y Seung Kim, J. (2024). Biopolymer-based hydrogels for biomedical applications: Bioactivity and wound healing properties. *Coordination Chemistry Reviews*, 518, 216093. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.216093>
55. Mignon, A., De Belie, N., Dubruel, P., y Van Vlierberghe, S. (2019). Superabsorbent polymers: A review on the characteristics and applications of synthetic, polysaccharide-based, semi-synthetic and 'smart' derivatives. *European Polymer Journal*, 117, 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.04.054>
56. Mondal, S., De Anda Reyes, M. E., y Pal, U. (2017). Plasmon induced enhanced photocatalytic activity of gold loaded hydroxyapatite nanoparticles for methylene blue degradation under visible light. *RSC advances*, 7(14), 8633–8645. <https://doi.org/10.1039/c6ra28640b>
57. More, A. P., y Chapekar, S. (2024). Irradiation assisted synthesis of hydrogel: A Review. *Polymer Bulletin*, 81, 5839-5908. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-05020-z>
58. Mostafavi, F. S., y Zaeim, D. (2020). Agar-based edible films for food packaging applications - A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 159, 1165–1176. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.123>
59. Murad, H.A., Abo-Elkhair, A. G., y Azzaz, H.H. (2019). Production of Xanthan Gum from Nontraditional Substrates with Perspective of the Unique Properties and Wide Industrial Applications. *JSMC Microbiology*, 1. [https://www.researchgate.net/publication/333950039\\_Production\\_of\\_Xanthan\\_Gum\\_from\\_Nontraditional\\_Substrates\\_with\\_Perspective\\_of\\_the\\_Unique\\_Properties\\_and\\_Wide\\_Industrial\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/333950039_Production_of_Xanthan_Gum_from_Nontraditional_Substrates_with_Perspective_of_the_Unique_Properties_and_Wide_Industrial_Applications)
60. Muya, F. N., Sunday, C. E., Baker, P., y Iwuoha, E. (2016). Environmental remediation of heavy metal ions from aqueous solution through hydrogel adsorption: a critical review. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 73(5), 983–992. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.567>
61. Nasef, M. M., Gupta, B., Shamel, K., Verma, C., Ali, R. R., y Ting, T. M. (2021). Engineered bioactive polymeric surfaces by radiation induced graft copolymerization: Strategies and applications. *Polymers*, 13(18), 3102. <https://doi.org/10.3390/polym13183102>
62. Nasrollahzadeh, M., Sajjadi, M., Irvani, S., y Varma, R. S. (2021). Starch, cellulose, pectin, gum, alginate, chitin and chitosan derived (nano)materials for sustainable water treatment: A review. *Carbohydrate Polymers*, 251, 116986. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116986>

63. Nayak, A. K., Bera, H., Hasnain, M. S., y Pal, D. (2018). Synthesis and characterization of graft copolymers of plant polysaccharides. En V. K. Thakur (Ed.). *Biopolymer Grafting*. (pp. 1–62). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-48104-5.00001-9>.
64. Njuguna, D. G., y Schönherr, H. (2021). Xanthan gum hydrogels as high-capacity adsorbents for dye removal. *ACS Applied Polymer Materials*, 3(6), 3142–3152. <https://doi.org/10.1021/acsapm.1c00343>
65. Njuguna, D. G., y Schönherr, H. (2022). Smart and regeneratable Xanthan gum hydrogel adsorbents for selective removal of cationic dyes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107620>
66. Nsengiyumva, E. M., Heitz, M. P., y Alexandridis, P. (2024). Salt and Temperature Effects on Xanthan Gum Polysaccharide in Aqueous Solutions. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(1). <https://doi.org/10.3390/ijms25010490>
67. ONU. (2019). *El costo ambiental de estar a la moda*. UN News. <https://news.un.org/es/story/2019/04/1454161>
68. Ortiz-García, T., Rapado-Paneque, M., y Peniche-Covas, C. (2021). Hidrogeles superabsorbentes basados en poliacrilamida para aplicación agrícola: estudio de hinchamiento. *Revista Cubana de Química*, 33(2), 46-68. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-54212021000200046&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212021000200046&lng=es&tlng=es)
69. Pathak, J., Mishra, S., Kumari, N., Pandey, A., Jaiswal, J., Gupta, A., Singh, V., Kumar, D., y Sinha, R. P. (2021). Chapter 6 - Bionanotechnology of cyanobacterial bioactive compounds. En R. P. Sinha y D.-P. Häder (Eds.), *Natural Bioactive Compounds: Technological Advancements* (pp. 115-142). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820655-3.00006-9>
70. Pramanik, D. D., Garg, P., Ganesan, D., y Pramanik, A. (2024). Removal of malachite green from an aqueous environment using chitosan-xanthan gum coagulation system: A response surface methodology approach. *Journal of Water Process Engineering*, 65, 105896. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105896>.
71. Purohit, P., Bhatt, A., Mittal, R. K., Abdellattif, M. H., y Farghaly, T. A. (2023). Polymer Grafting and its chemical reactions. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 1044927. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1044927>
72. Qureshi, M. A., Nishat, N., Jadoun, S., y Ansari, M. Z. (2020). Polysaccharide based superabsorbent hydrogels and their methods of synthesis: A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 1, 100014. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2020.100014>
73. Raghuwanshi, V. S., y Garnier, G. (2019). Characterisation of hydrogels: Linking the nano to the microscale. *Advances in Colloid and Interface Science*, 274, 102044. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102044>

74. Rahman, M. O., Halim, M. A., Deb, A., Ahmed, S., Rahman, M. W., Dafader, N. C., Alam, S. M. N., Khandaker, S., y Alam, M. J. (2022). Modification of Superabsorbent Hydrogels for Industrial Wastewater Treatment. *Advances in Polymer Technology*, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2022/8405230>.
75. Rahul, y Jindal, R. (2024). Efficient removal of toxic dyes malachite green and fuchsin acid from aqueous solutions using Pullulan/CMC hydrogel. *Polymer*, 307. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127203>.
76. Raman, C. D., y Kanmani, S. (2016). Textile dye degradation using nano zero valent iron: A review. *Journal of Environmental Management*, 177, 341–355. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.04.034>
77. Ramirez, A., Benítez, J. L., Rojas de Astudillo, L., y Rojas de Gáscue, B. (2016). Materiales polimeros de tipo hidrogeles: revisión sobre su caracterización mediante ftir, dsc, meb y met. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 36(2), 108-130. [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0255-69522016000200002&lng=es&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522016000200002&lng=es&tlng=es).
78. Rani, G. U., Konreddy, A. K., Mishra, S., y Sen, G. (2014). Synthesis and applications of polyacrylamide grafted agar as a matrix for controlled drug release of 5-ASA. *International journal of biological macromolecules*, 65, 375–382. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.01.034>
79. Rather, R. A., Bhat, M. A., y Shalla, A. H. (2022). An insight into synthetic and physiological aspects of superabsorbent hydrogels based on carbohydrate type polymers for various applications: A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 3, 100202. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100202>
80. Resende, J. F., Bergamasco, I. M. R., Bergamasco, R., Vieira, M. F., y Vierira, A. M. S. (2023). Hydrogels produced from natural polymers: a review on its use and employment in water treatment. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 40, 23-38. <https://doi.org/10.1007/s43153-022-00224-8>
81. Sanchez, L. M., Ollier, R. P., Gonzalez, J. S., y Alvarez, V. A. (2018). Nanocomposite materials for dyes removal. *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications* (pp. 922–951). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813351-4.00053-5>
82. Sartape, A. S., Mandhare, A. M., Jadhav, V. V., Raut, P. D., Anuse, M. A., y Kolekar, S. S. (2017). Removal of malachite green dye from aqueous solution with adsorption technique using Limonia acidissima (wood apple) shell as low cost adsorbent. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S3229–S3238. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.12.019>
83. SEMARNAT. (2016). *Informe del Medio Ambiente*. Gobierno de México. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/presentacion.html>
84. Sennakesavan, G., Mostakhdemin, M., Dkhar, L. K., Seyfoddin, A., y Fatihhi, S. J. (2020). Acrylic acid/acrylamide based hydrogels and its properties - A review.

- Polymer Degradation and Stability*, 180, 109308.  
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109308>.
85. Seyrig, C., Poirier, A., Bizien, T., y Baccile, N. (2023). In situ stimulation of self-assembly tunes the elastic properties of interpenetrated biosurfactant-biopolymer hydrogels. *Biomacromolecules*, 24(1), 19–32.  
<https://doi.org/10.1021/acs.biomac.2c01062>
86. Shah, M., Hameed, A., Kashif, M., Majeed, N., Muhammad, J., Shah, N., Rehan, T., Khan, A., Uddin, J., Khan, A., y Kashtoh, H. (2024). Advances in agar-based composites: A comprehensive review. *Carbohydrate Polymers*, 346, 122619.  
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122619>.
87. Shalla, A. H., Bhat, M. A., y Yaseen, Z. (2018). Hydrogels for removal of recalcitrant organic dyes: A conceptual overview. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(5), 5938–5949.  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.08.063>
88. Sharma, J., Sharma, S. y Soni, V. (2023). Toxicity of malachite green on plants and its phytoremediation: A review. *Regional Studies in Marine Science*, 62, 102911. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.102911>.
89. Sivakumar, R., y Lee, N. Y. (2022). Adsorptive removal of organic pollutant methylene blue using polysaccharide-based composite hydrogels. *Chemosphere*, 286(Pt 3), 131890.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131890>
90. Skoog, D.A., West, D. M., Holler, F. J., y Crouch, S. R. (2014). *Fundamentos de Química Analítica*. Cengage Learning.
91. Soto, D., y Oliva, H. (2012). Métodos para preparar hidrogeles químicos y físicos basados en almidón: Una revisión. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 32(2), 154-175. Recuperado en 25 de abril de 2025, de [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0255-69522012000200002&lng=es&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522012000200002&lng=es&tlng=es)
92. Sudha, P. N., Aisverya, S., Nithya, R., y Vijayalakshmi, K. (2014). Industrial applications of marine carbohydrates. En S.-K. Kim. *Advances in Food and Nutrition Research*, (73, pp. 145–181). Academic Press.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800268-1.00008-1>
93. Syed K.H. Gulrez, Saphwam Al-Assaf and Glyn O. Phillips. Hydrogels: Methods of preparation, Characterisation and applications. Progress in molecular and Environmental Bioengineering (2011). Prof. Angelo Carpi (Ed.), In Tech.
94. Thakur, S., Thakur, V. K., y Arotiba, O. A. (2018). History, Classification, Properties and Application of Hydrogels: An Overview. En V. Thakur y M. Thakur. *Hydrogels* (pp. 29-50). Springer. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-6077-9\\_2#Abs1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-6077-9_2#Abs1)

95. Towns, A. (2013). Colorant, Textile. En: Luo, R. (Ed.). *Encyclopedia of Color Science and Technology*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8\\_161-10](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8_161-10)
96. Ullah, F., Othman, M. B. H., Javed, F., Ahmad, Z., y Md Akil, H. (2015). Classification, processing and application of hydrogels: A review. *Materials Science & Engineering*, C, 57, 414–433. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.07.053>
97. Valderrama-Santibáñez, A. L., Neme-Castillo, O., y Flores-Márquez, H. (2020). Huella hídrica manufacturera. Una comparación entre países ricos y pobres. *Análisis económico*, 35(88), 69-88. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2448-66552020000100069&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-66552020000100069&lng=es&tlng=es).
98. Wohlhauser, S., Delepierre, G., Labet, M., Morandi, G., Thielemans, W., Weder, C., y Zoppe, J. O. (2018). Grafting polymers from cellulose nanocrystals: Synthesis, properties, and applications. *Macromolecules*, 51(16), 6157–6189. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.8b00733>
99. Wu, Y., Brickler, C., Li, S., y Chen, G. (2021). Synthesis of microwave-mediated biochar-hydrogel composites for enhanced water absorbency and nitrogen release. *Polymer Testing*, 93, 106996. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106996>.
100. Yang, Y., Zhu, Q., Peng, X., Jingjing, S. d., Li, C., Zhang, X., Zhang, H., Chen, J., Zhou, X., Zeng, H., y Zhang, Y. (2022). Hydrogels for the removal of the methylene blue dye from wastewater: a review. *Environ Chem Letters*, 20, 2665-2685. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01414-z>
101. Yuan, L., Liu, C., Li, B., Wang, S., Zhang, H., Sun, J., y Mao, X. (2024). A green extraction method for agar with improved thermal stability and water holding capacity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 278 (Part. 3), 134663. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134663>
102. Zhang, M., y Zhao, X. (2020). Alginate hydrogel dressings for advanced wound management. *International Journal of Biological Macromolecules*, 162, 1414-1428. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.311>
103. Zhang, Z., Fu, H., Li, Z., Huang, J., Xu, Z., Lai, Y., Qian, X., y Zhang, S. (2022). Hydrogel materials for sustainable water resources harvesting & treatment: Synthesis, mechanism and applications. *Chemical Engineering Journal*, 439, 135756. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135756>
104. Zhu, B., Ma, D., Wang, J., y Zhang, S. (2015). Structure and properties of semi-interpenetrating network hydrogel based on starch. *Carbohydrate Polymers*, 133, 448-455. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.07.037>
105. Zoratto, N., y Matricardi, P. (2018). 4 - Semi-IPNs and IPN-based hydrogels, En K. Pal, e I. Banerjee (Eds.). *Polymeric Gels. Characterization,*

Properties and Biomedical Applications (91-124). Woodhead Publishing.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102179-8.00004-1>