



# **UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN  
EN ENERGÍAS RENOVABLES**

**INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES**

## **TESIS**

**“FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN  
FÍSICA DE BIOPOLÍMEROS A BASE DE  
ALGAS”**

Que para obtener el grado de:

**INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES**

Presenta:

**C. OSWALDO REYES MENDOZA**

Directores de tesis:

**DRA. LAURA ELENA VEREA VALLADARES.**

**MTRO. HARBEY ELIUD NANDUCA NOLASCO**



Txtla Gtez, Chiapas.

Junio, 2024



**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**  
**SECRETARÍA GENERAL**  
**DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES**  
**DEPARTAMENTO DE CERTIFICACIÓN ESCOLAR**  
**AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN**

Lugar: Tuxtla Gutiérrez; Chiapas.  
Fecha: 03 de junio de 2024

**C. Oswaldo Reyez Mendoza**

Pasante del Programa Educativo de: **Ingeniería en Energías Renovables**

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:  
**Fabricación y Carácteización Física de Biopolímeros a Base de Algas**

En la modalidad de: **Tesis Profesional**

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

**ATENTAMENTE**

**Revisores**

Mtro. Óscar Martíz Aguirre

Dra. Gabriela Nallely Trejo Díaz

Dr. Harvey Eliud Nanduca Nolasco

**Firmas:**

*Oscar Martíz Aguirre*  
*[Signature]*  
*[Signature]*

Ccp. Expediente



## **AGRADECIMIENTO.**

---

A Dios...

Por darme la vida, así mismo, la oportunidad que yo esté presente hoy. Gracias por todas las bendiciones y obstáculos que has puesto en mi vida, ya que gracias a ellas moldearon lo que soy hoy. Asimismo, agradezco a Dios por darme unos padres maravillosos y amoroso, que me han enseñado a ser valiente en las decisiones que tomo en la vida.

A mis padres...

Sr. Leonardo Reyes y Sra. Rubicelvia Mendoza, por darme la oportunidad de estudiar la carrera de ingeniería en energías renovables. Además, por todo el apoyo y la confianza que me han dado a lo largo de este tiempo. Por la comprensión y sabiduría que me han compartido desde pequeño, así como las palabras de aliento y consuelo cuando las cosas no iban bien. Por estar conmigo en todos los pequeños pasos que he dado en la vida. Muchas gracias, papá y mamá, los amo mucho.

A mis directores...

A la Dra. Laura Elena Vereza Valladares y el Mtr. Harbey Eliud Nanduca Nolasco por darme la oportunidad de trabajar con ellos, por la paciencia y todo el apoyo brindado en todos los días, por ayudarme y guiarme cada día. Asimismo, en alentarme en aprender cosas nuevas y no rendirme en no dejar este proyecto de investigación. Por supuesto que sin su apoyo nada de esto hubiera sido posible.

A mis hermanos...

Lizbeth Reyes, Rosalinda Tomines y Jorge Luis Tomines por apoyarme cuando se presentan problemas, a si por alentarme cada día en las decisiones que he tomado a mi vida. Por darme protección y seguridad cuando se presentaban malas situaciones en la vida, por respaldarme en todo momento de la vida, los quiero muchos hermanos míos.

A mis amigos de la universidad...

Xiomara Natarén, Monserrat Velásquez, Gabriela Jiménez, Jonathan Ruiz y Ariel López por estar conmigo en los momentos difíciles que se me han presentado, así mismo, por alentarme y animarme en realizar proyecto. Además, en ser parte de mi crecimiento espiritual y como persona, les agradezco mucho.

A mi yo...

Gracias por dar lo mejor de ti en cada paso que das en la vida, por soportar todos los inconvenientes que se te ha presentado en la vida. Por seguir adelante, cuando la depresión te hacía perderte en ti mismo y te decía que no llegarías a ningún lado, solo porque no estes donde quieres estar, no signifique que no estés llegando a un sitio. Por demostrar que en cada momento haces tu mejor intentó. Asimismo, por el gran crecimiento que has dado en estos últimos cuatro años, pero no creo que debas de tomar la vida tan enserio que te olvides de divertirte. Por último, eres lo suficiente afortunado como para ser diferente de todos los demás, no cambies. Sé tú mismo, persigue tus sueños, y nunca digas nunca.

Nunca seas tan amable, que olvides ser inteligente.

Nunca seas tan inteligente, que olvides ser amable.

Lo que murió no permaneció muerto.

Estás vivo en mi cabeza... muy vivo.

*-Marjorie- Taylor Swift-*

## RESUMEN.

---

Los biopolímeros son utilizados en el campo del embalaje médico, agrícola y de bienes de consumo, pero, en los últimos años ha existido un interés en aplicaciones de almacenamiento y conversión de energía. Además, los biopolímeros como el almidón, se pueden encontrar en productos como: la papa, arroz, maíz, trigo, yuca, camote, así como en algunas especies de algas. Las algas verdes almacenan de 5-10 veces más de almidón que los productos lignocelulosicos. A su vez, son organismos fotosintéticos pertenecientes a la familia de las eucariotas. Por otro lado, son ricas en carbohidratos, lípidos y proteínas; convirtiéndolas en atractivas para la producción de biocompuestos. Así mismo, se pueden encontrarse en diversos cuerpos acuíferos (mares, ríos o lagos). Sin embargo, el exceso crecimiento de las algas pueden bloquear la entrada de luz a los cuerpos acuíferos, provocando la disminución de la producción de oxígeno, teniendo como consecuencia, la muerte de la flora y fauna (Nixon Richard, 2024).

Existen muchas formas de extraer almidón de diferentes fuentes renovables; que consiste frecuentemente en triturar y remojar la biomasa en NaOH, NaCl, NaHCO<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>NaO<sub>2</sub>, NaHSO<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O, CH<sub>3</sub>OH, entre otros. El uso de C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O y NaOH, así como el NaHSO<sub>3</sub>, son solventes eficaces para la extracción y purificación del almidón, ya que tienen la capacidad de oxidar la pared celular de la biomasa, ocasionado la liberación de carbohidratos, lípidos y proteínas. De acuerdo con el cálculo de la eficiencia, el método Alga-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O presentó una eficiencia de 9.7%, en comparación con los métodos Alga-H<sub>2</sub>O y Alga-NaHSO<sub>3</sub> presentando una eficiencia del 6.8% y 7.7%. El polvo extraído se caracterizó con la técnica de Rayos X para comprobar la identidad del compuesto extraído y el resultado fue el producto de interés (C<sub>14</sub>H<sub>10</sub>O<sub>4</sub>). Se decidió probar la efectividad del polvo extraído en la fabricación de biopolímeros y comparar estos últimos con biopolímeros a base de almidón de maíz.

De acuerdo con la caracterización física; ambos biopolímeros presentaron diferencias, el biopolímero a base de algas presenta más porosidad que el biopolímero de almidón de maíz, esto podría atribuirse al C<sub>14</sub>H<sub>10</sub>O<sub>4</sub>, ya que es un compuesto que se utiliza para la fabricación de materiales porosos, teniendo como consecuencia una baja densidad (1.16 gr/cm<sup>3</sup>) y contenido de humedad (16.6%), mayor tasa de biodegradabilidad (44%), solubilidad (71.4%) y absorción (44.2%), en comparación con el biopolímero de almidón de maíz: densidad (1.2 gr/cm<sup>3</sup>) y contenido de humedad (16.4%), biodegradabilidad (40%), solubilidad (52.2%) y absorción (42.2%). Por lo tanto, en este trabajo se propone al biopolímero a base de algas como un candidato para aplicaciones en celdas de combustión, electrodos, electrolitos biopoliméricos y celdas solares sensibilizadas por colorantes (DSSC).

**Palabras clave:** Biopolímero, Almidón, algas.

## ABSTRACT.

---

Biopolymers are used in the field of medical, agricultural and consumer goods packaging, but in recent years there has been interest in using them in energy storage and conversion applications. Also, biopolymers such as starch can be found in products such as; potato, rice, corn, wheat, cassava, sweet potato, as well as some species of algae. Green algae store 5-10 times more starch than lignocellulosic products. In turn, they're photosynthetic organisms belonging to the family of eukaryotes. On the other hand, they're rich in carbohydrates, lipids and proteins; making them attractive for the production of biocomposites. Likewise, they can be found in various aquifer bodies (seas, rivers or lakes). However, excessive algae growth can block the entry of light into aquifer bodies, causing a decrease in oxygen production, resulting in the death of flora and fauna (Nixon Richard, 2024).

There're many ways to extract starch from different renewable sources; which frequently consists of crushing and soaking the biomass in NaOH, NaCl, NaHCO<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>NaO<sub>2</sub>, NaHSO<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O, CH<sub>3</sub>OH, among others. The use of C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O and NaOH, as well as NaHSO<sub>3</sub>, are effective solvents for the extraction and purification of starch, since they have the ability to oxidize the cell wall of the biomass, causing the release of carbohydrates, lipids and proteins. According to the efficiency calculation, the Alga-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O method presented an efficiency of 9.7%, compared to the Alga-H<sub>2</sub>O and Alga-NaHSO<sub>3</sub> methods, presenting an efficiency of 6.8% and 7.7%. The extracted dust was characterized with the X-ray technique to verify the identity of the extracted compound and the result was the product of interest (C<sub>14</sub>H<sub>10</sub>O<sub>4</sub>). It was decided to test the effectiveness of the extracted dust in the manufacture of biopolymers and compare the latter with biopolymers based on corn starch.

According to the physical characterization; Both biopolymers presented differences, the algae-based biopolymer has more porosity than the corn starch biopolymer, this could be attributed to C<sub>14</sub>H<sub>10</sub>O<sub>4</sub>, since it is a compound that is used for the manufacture of porous materials, resulting in a low density (1.16 gr/cm<sup>3</sup>) and moisture content (16.6%), higher rate of biodegradability (44%), solubility (71.4%) and absorption (44.2%), compared to corn starch biopolymer: density (1.2 gr/cm<sup>3</sup>) and moisture content (16.4%), biodegradability (40%), solubility (52.2%) and absorption (42.2%). Therefore, in this work, the algae-based biopolymer is proposed as a candidate for applications in combustion cells, electrodes, biopolymeric electrolytes and dye-sensitized solar cells (DSSC).

**Keywords:** Biopolymer, Starch, Algae.

# ÍNDICE.

---

<b>1</b>	<b>CAPÍTULO I: GENERALIDADES.</b>	<b>11</b>
1.1	Introducción.	11
1.2	Antecedentes.	13
1.3	Planteamiento del problema.	15
1.4	Justificación.	15
1.5	Objetivo general.	16
1.5.1	Objetivos específicos.	16
1.6	Hipótesis.	16
<b>2</b>	<b>CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.</b>	<b>17</b>
2.1	Biopolímeros.	17
2.1.1	Biopolímero biodegradable.	18
2.1.2	Aplicaciones de biopolímeros en energías.	19
2.1.3	Electrolitos biopoliméricos.	19
2.1.4	Celda de combustión.	20
2.1.5	Hidrogeles poliméricos.	20
2.1.6	Celdas solares sensibilizadas por tinte (DSSC).	21
2.1.7	Condensadores electroquímicos.	21
2.1.8	Propiedades físicas de los biopolímeros que se aplican en energías.	22
2.2	Clasificación de los biopolímeros.	23
2.2.1	Biopolímeros sintéticos.	23
2.2.1.1	Ácido poliláctico (PLA).	23
2.2.1.2	Polihidroxialcanoato (PHA).	23
2.2.1.3	Policaprolactonas (PLC).	24
2.2.1.4	Acetato de polivinilo (PVA).	24

2.2.2	Biopolímeros naturales. ....	24
2.2.2.1	Biopolímeros a partir del almidón. ....	24
2.2.2.2	Biopolímeros basados en celulosa. ....	25
<b>2.3</b>	<b>Biopolímeros de base biológica.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4</b>	<b>Caracterización física de biopolímeros. ....</b>	<b>26</b>
2.4.1	Propiedades de síntesis. ....	26
2.4.1.1	Grado de hinchazón .....	26
2.4.2	Propiedades de componentes. ....	26
2.4.2.1	Degradación. ....	26
2.4.3	Propiedades relativas.....	27
2.4.3.1	Densidad.....	27
2.4.3.2	Solubilidad.....	27
2.4.3.3	Espesor. ....	28
2.4.3.4	Contenido de humedad. ....	28
<b>2.5</b>	<b>Almidón.....</b>	<b>29</b>
2.5.1	Propiedades del almidón.....	30
<b>2.6</b>	<b>Algas.....</b>	<b>31</b>
2.6.1	Algas verdes.....	31
2.6.2	Almacenamiento de almidón en algas. ....	32
2.6.2.1	Almidón: vía de biosíntesis. ....	32
<b>2.7</b>	<b>Extracción de almidón.....</b>	<b>34</b>
<b>2.8</b>	<b>Obtención de un biopolímeros a base de almidón.....</b>	<b>36</b>
<b>3</b>	<b>CAPITULO III: METODOLOGÍA.....</b>	<b>37</b>
<b>3.1</b>	<b>Extracción de almidón de algas. ....</b>	<b>38</b>
<b>3.2</b>	<b>Cálculo del rendimiento de polvo extraído.....</b>	<b>39</b>
<b>3.3</b>	<b>Elaboración del biopolímero. ....</b>	<b>39</b>

3.4	Caracterización física.....	40
4	<b>CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>42</b>
4.1	Pretratamiento y trituración de la biomasa. ....	42
4.2	Extracción de recursos renovables. ....	43
4.3	Tratamiento con NaOH. ....	44
4.4	Comparación del cálculo del rendimiento del polvo extraído.....	46
4.5	Obtención de biopolímeros. ....	47
4.6	Caracterización física de los biopolímeros. ....	48
4.6.1	Espesor del biopolímero.....	48
4.6.2	Contenido de humedad.....	48
4.6.3	Densidad. ....	49
4.6.4	Absorbancia de agua. ....	51
4.6.5	Biodegradación.....	52
4.6.6	Solubilidad. ....	54
4.7	caracterización del polvo extraído con rayos x.....	56
5	<b>CAPITULO V: CONCLUSIÓN.....</b>	<b>57</b>
6	<b>ABREVIATURAS.....</b>	<b>58</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>59</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.</b> Propuesta teórica de la biosíntesis de la formación del almidón.....	33
<b>Figura 2.</b> Proceso de extracción de almidón (Demiante et al., 2023).....	34
<b>Figura 3.</b> Diagrama general para la obtención de un biopolímero a base de algas.....	37
<b>Figura 4.</b> Diagrama de la metodología experimental de la extracción de almidón de algas empleado en este estudio.....	38
<b>Figura 5.</b> Diagrama experimental de la metodología para la fabricación de un biopolímero a base de algas. ....	39
<b>Figura 6.</b> Imagen de la biomasa triturada y suspendida en $C_2H_6O$ (a) y en $NaHSO_3$ (b) para realizar la extracción experimental de almidón presente en las algas. ....	42
<b>Figura 7.</b> Imagen del proceso de extracción experimental de almidón de algas, se observa que la liberación de lípidos durante el proceso de extracción. ....	43
<b>Figura 8.</b> Imagen del triturado y tamizado del polvo extraído de cada proceso de extracción experimental: Alga- $H_2O$ , Alga- $C_2H_6O$ y Alga- $NaHSO_3$ .....	44
<b>Figura 9.</b> Imagen del color que presentaron cada polvo extraído: (a) Alga- $H_2O$ ; (b) Alga- $C_2H_6O$ , y (c) Alga- $NaHSO_3$ . ....	44
<b>Figura 10.</b> Imagen del tratamiento con $NaOH$ para la eliminación de residuo lignocelulosicos, clorofila y proteínas adheridas al polvo extraído. ....	45
<b>Figura 11.</b> Gráfica de rendimiento del polvo extraído mediante los pretratamientos de $H_2O$ , $C_2H_6O$ y $NaHSO_3$ .....	46
<b>Figura 12.</b> Imagen del biopolímero a base del polvo extraído (a) y biopolímero a base de almidón de maíz (a).....	47
<b>Figura 13.</b> Comparación del contenido de humedad de los biopolímeros a base de algas (CH%-A) y almidón de maíz (CH%-M). ....	49
<b>Figura 14.</b> Comparación de las densidades de los biopolímeros a base del polvo extraído de las algas ( $\rho$ -Alga) y almidón de maíz ( $\rho$ -Maíz).....	50
<b>Figura 15.</b> Comparación de la absorción de agua de los biopolímeros a base de algas (B-Algas) y almidón de maíz (B-Maíz).....	51
<b>Figura 16.</b> Resultados de la prueba de biodegradación de los biopolímeros a base de algas (a) y almidón de maíz (b) al estar en tierra húmeda al transcurrir 24 h. ....	52

<b>Figura 17.</b> Comparación de la biodegradabilidad de los biopolímeros a base de algas (B-Algas) y almidón de maíz (B-Maíz) al transcurrir 24 h.....	53
<b>Figura 18.</b> Resultados de la prueba de solubilidad de los biopolímeros de almidón de maíz (a) y a base de alga (b) al estar en agitación constante durante 6 h.....	54
<b>Figura 19.</b> Comparación de la solubilidad en agua de los biopolímeros de almidón de maíz (B-Maíz) y del biopolímero a base de algas (B-Algas) al estar en agitación constante durante 6 h. ....	55
<b>Figura 20.</b> Rayos X al polvo extraído de las algas.....	56

## ÍNDICE DE ECUACIONES.

---

<b>Ecuación 1</b> .....	39
<b>Ecuación 2</b> .....	40
<b>Ecuación 3</b> .....	40
<b>Ecuación 4</b> .....	40
<b>Ecuación 5</b> .....	41
<b>Ecuación 6</b> .....	41
<b>Ecuación 7</b> .....	41

## ÍNDICE DE TABLAS.

---

<b>Tabla 1.</b> Propiedades físicas de algunos biopolímeros y su aplicación en el campo de las energías renovables.....	22
<b>Tabla 2.</b> Espesor y contenido de humedad de algunos biopolímeros de almidón y como afectan sus propiedades mecánicas. ....	28
<b>Tabla 3.</b> Porcentaje de amilosa y amilopectina y tamaño de los gránulos en almidones comunes de diferentes fuentes. ....	29
<b>Tabla 4.</b> Métodos de extracción de almidón y rendimientos de almidón diferentes fuentes.....	35
<b>Tabla 5.</b> El tipo y las concentraciones de plastificante de biopolímeros de almidón. ....	36
<b>Tabla 6.</b> Parámetros de los biopolímeros a base de almidón de alga y de maíz. ....	48

# 1 CAPÍTULO I: GENERALIDADES.

---

## 1.1 INTRODUCCIÓN.

Desde las últimas décadas se han utilizado polímeros sintéticos y no degradables como anfitriones para el almacenamiento y producción de energía eléctrica debido a su alta conductividad iónica, alta resistencia mecánica, buena estabilidad electroquímica y térmica, facilidad de fabricación en las formas y tamaños deseados. Debido a sus numerosas ventajas, los polímeros se han utilizado en diferentes dispositivos, como baterías de iones, celdas de combustión, supercondensadores, celdas solares y electrolitos poliméricos (Bharti *et al.*, 2021). El polioxido de etileno (PEO) fue el primer polímero soluble propuesto y estudiado en baterías recargables de litio con electrolito de polímero sólido (Mittal, 2013).

Los polímeros sintéticos se obtienen principalmente a partir de combustibles fósiles y son creados para funciones específicas debido a su fácil adaptación, así mismo son materiales económicos, livianos, resistentes al calor y son aislantes a la corriente eléctrica. Sin embargo, estas ventajas pueden ser sus peores inconvenientes; la alta versatilidad ha ocasionado un incremento en su consumo y así como su alta resistencia a la descomposición microbiana los convierte en residuos difíciles de eliminar y se convierte en problemas medioambientales. Por ejemplo, el polietileno y el polipropileno pueden tardar hasta 500 años en descomponerse en su totalidad (Valero *et al.*, 2013).

Uno de los avances más importantes de los últimos años ha sido el desarrollo de materiales que se producen a través de monómeros naturales, estos monómeros pueden encontrarse en polisacáridos y aminoácidos; dichos monómeros son moléculas pequeñas que forman moléculas más grandes llamadas polímeros, los biopolímeros a base de fuentes naturales se les denomina biopolímeros de base biológica. Algunas fuentes renovables para la producción de polímero son: el aceite vegetal, celulosa, lignina, xilosa, almidón; que son sintetizados por microorganismos y son conocidos como biopolímeros (Niaounakis, 2015a). Un biopolímero puede clasificarse biopolímero de base biológica y a su vez como biopolímeros biodegradables (Ashter, 2016a).

Un polímero biodegradable se define como un polímero que se degrada bajo a la acción de microorganismos como moho, hongos y bacterias dentro de un período de tiempo y ambiente específico (Niaounakis, 2015a). La limitación de reservas de combustibles fósiles y el impacto al medio ambiente son algunos de las principales razones para utilizar biopolímeros de base biológica. Durante los últimos años, la producción de biopolímero a partir de fuentes renovable ha llevado un significativo crecimiento en el mercado y en la industria, con el fin de poder remplazar los polímeros sintéticos. Dado que los biopolímeros son productos de origen vegetal, se espera que el consumo de petróleo para la producción de plástico disminuya entre un 15 y un 20% para 2025 (Ashter, 2016a).

Los biopolímeros a base de almidón destacan por la abundancia y bajo costo que presenta el almidón (Onyeaka *et al.*, 2022). Los electrolitos de biopolímeros elaborados a partir de almidón muestran resultados prometedores en términos de conductividad y estabilidad, convirtiéndolos en materiales adecuados para el almacenamiento de energía (Arrieta *et al.*, 2023). Los almidones se pueden extraer de fuentes vegetales comestibles como la papa, la yuca, el maíz, el arroz, el trigo, la cebada, entre otros. Además, de ser un alimento básico en algunas partes del mundo, el almidón desempeña un papel vital como fuente eficiente de carbohidratos y control del hambre. El uso de almidón de fuentes alimentarias para la producción de biopolímeros puede representar un problema; ya reduce la disponibilidad de almidón y agregar problemas de hambre (Gamage *et al.*, 2022).

Las algas se han utilizado como una alternativa para la producción biopolímeros, así como; de biodiesel, suplementos, tratamiento de aguas residuales; debido a su alto crecimiento celular y la habilidad de crecer diferentes condiciones. Además, almacenan grandes fracciones de carbono en forma de lípidos y carbohidratos a través de la captura de dióxido de carbono de la atmosfera por medio de la fotosíntesis. La producción de biomasa a partir de algas es 5-10 veces mayor que los sustratos lignocelulosicos (Arun *et al.*, 2022; Azeem *et al.*, 2017), convirtiéndolos en excelentes candidatos para la sustitución de del almidón provenientes de fuentes alimenticias. Los biopolímeros a base de algas son una alternativa prometedora, ecológica y biodegradables para el desarrollo de dispositivos de almacenamiento y producción de energía (Torres *et al.*, 2021). Por ende, se pretende elaborar dos biopolímeros, una a base de almidón de maíz y otro a partir de almidón de algas para establecer sus características y determinar sus propiedades físicas, con el propósito de ser aplicado en dispositivos para el almacenamiento y conversión de energía.

## 1.2 ANTECEDENTES.

Fabra *et al.*, 2018 reporta que el uso de especies de microalgas *Nannochloropsis*, *Spirulina* y *Scenedesmus* como aditivos en biopelículas de almidón de maíz afecta las propiedades estructurales y fisicoquímicas de los biopolímeros. Además, señalan que el uso de microalgas *Nannochloropsis* genera la producción de biopelículas biodegradables y porosas, debido que es capaz de remplazar una gran parte de la matriz del almidón de maíz durante el proceso de polimerización. Por otro lado, las microalgas *Spirulina* y *Scenedesmus* presentan una baja porosidad y buena permeabilidad al vapor de agua.

Guo *et al.*, 2018 propuso la elaboración de un transistor sináptico de óxido de indio-estaño soluble en agua. El electrolito a base de almidón actúa como dieléctrico de puerta. El electrolito a base de almidón exhibe un comportamiento de modulación electrostática extremadamente fuerte con una capacitancia eléctrica de doble capa (EDL) de aproximadamente  $1,6 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ . El transistor sináptico exhibe una alta relación de encendido/apagado de  $\sim 1,9 \times 10^7$ , una pequeña oscilación por debajo del umbral de  $\sim 99,7 \text{ mV}/\text{década}$  y una alta movilidad del efecto de campo de  $\sim 14,9 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , respectivamente. El transistor sináptico de óxido exhibe altas estabilidades en las respuestas sinápticas.

Kasturi *et al.*, 2019 reporta la fabricación de un electrodo poroso de carbono con almidón de *Artocarpus heterophyllus* al activarlo con  $\text{ZnCl}_2$  y un electrolito de biopolímero de almidón de *Manihot esculenta*, estos biomateriales son empleados como componentes en un supercondensador de estado sólido. Además, la biopelícula de electrolito de biopolímero de almidón *Manihot esculenta* muestra una tasa natural de biodegradación favorable. Asimismo, el dispositivo resultante ofrece una capacitancia de  $240 \text{ Fg}^{-1}$  a  $0,5 \text{ mA}$ .

Oluwasina *et al.*, 2019 informa que el almidón oxidado se puede utilizar para mejorar las propiedades físico-mecánicas de los biopolímeros de almidón de *Manihot esculenta crantz*. El almidón se oxidó mediante una solución de  $\text{KIO}_4$ . Las propiedades de los biopolímeros cambiaron con el aumento de la concentración del almidón oxidado, de modo que se generó una resistencia a la solubilidad al agua con el aumento de la concentración de almidón oxidado. Además, al presentar más concentración de almidón oxidado prolonga la biodegradabilidad del biopolímero.

Ramli *et al.*, 2020 informa la extracción de almidón de maíz y almidón de algas, con la finalidad de comparar las propiedades físicas y mecánicas que presentan estos polisacáridos y encontrar un parecido, debido que el almidón de maíz se utiliza ampliamente en la producción de biopolímeros. De tal manera que, al determinar las características cruciales de almidón de microalgas podría utilizarse para diversos productos sostenibles.

Bharti *et al.*, 2021 señala que los biopolímeros biodegradables se diferencian de los biopolímeros no biodegradables, debido a su renovabilidad y biocompatibilidad para el almacenamiento y conversión de energía eléctrica. Además, el uso de mezclas y aditivos en los electrolitos poliméricos se ha convertido en la forma más prometedora de mejorar el transporte de iones y el rendimiento electroquímico de los electrolitos poliméricos.

Hadad *et al.*, 2022 utilizó almidón de maíz para la formación de un electrolito biopolimérico de almidón de carboximetilo (CMS), así como un gel de acetato de almidón (SA) para aplicarse en baterías de litio (LIB). La conductividad iónica para electrolitos sólidos CMS y gel SA a una temperatura ambiente presentan una buena estabilidad electroquímica, asimismo, el rendimiento cíclico es estable y una capacidad de carga superior a 210 mAh/g, CE = 100 % antes de 10 ciclos de carga-descarga tanto para CMS como para SA, y una buena compatibilidad entre electrodos y electrolitos. El rendimiento electroquímico incomparable de CMS y SA, por lo que, los convierten en una alternativa única a los electrolitos líquidos en LIB.

Abreu *et al.*, 2023 realizó un estudio sobre la biodegradabilidad de los biopolímeros de almidón de maíz al añadirle microalgas *Spirulina platensis* como aditivos, con el objetivo de desarrollar un biopolímero funcional con rápida degradabilidad. Donde, se produjo 48 biopolímeros con diferentes concentraciones de microalga *Spirulina platensis*. Se observaron las características visuales de cada una y se seleccionaron las que presentaban mayor parecido con los plásticos convencionales.

Arrieta *et al.*, 2023 señala que el uso de biopolímeros en electrolitos ofrece varias ventajas, incluida una mayor sostenibilidad, biocompatibilidad y biodegradabilidad en comparación con los electrolitos poliméricos tradicionales a base de petróleo. Los electrolitos de biopolímeros elaborados a partir de almidón muestran resultados prometedores en términos de conductividad y estabilidad, lo que los hace adecuados para su uso en dispositivos de almacenamiento de energía.

### **1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

Los polímeros sintéticos y no biodegradables son buenos candidatos para el almacenamiento y producción de energía eléctrica, debido a su alta conductividad iónica y alta resistencia mecánica. Sin embargo, estos polímeros al culminar con su vida útil será un problema medioambiental (Bharti *et al.*, 2021); ocasionado grandes problemas en ecosistemas terrestres y marinos, teniendo como consecuencia cambios en los comportamientos de las especies, muerte por ingesta de productos plásticos o por quedar atrapados en desechos, además de contribuir a la aceleración del calentamiento global y a la perforación de la capa de ozono, por lo que limitan su uso en diferentes campos.

Los biopolímeros a base de polisacáridos como el quitosano, celulosa, almidón y alginato son buenos sustitutos para el almacenamiento y producción de energía (Torres *et al.*, 2021), debido a su renovabilidad y biocompatibilidad con estos (Bharti *et al.*, 2021). El almidón es una fuente confiable para la producción de biopolímeros biodegradables (Shahabi *et al.*, 2019). Sin embargo, el uso de almidón para la producción de biopolímeros ha sido un tema de debate, debido principalmente a los escasos alimentos en ciertas zonas del país, asimismo, la explotación del suelo hasta llegar al punto de ser infértil (Gamage *et al.*, 2022). Las algas verdes como fuente alternativa de almidón ha sido una buena opción para la producción de biopolímeros biodegradables. Sin embargo, la mayor parte de las investigaciones se enfocan en los polihidroxicanoatos (PHA) y sus aplicaciones en aplicaciones energéticas (Mastropetros *et al.*, 2022), provocando una escasa información sobre las propiedades del almidón de algas, así como de los biopolímeros de almidón de alga.

### **1.4 JUSTIFICACIÓN.**

La dependencia de polímeros sintéticos ha provocado grandes problemas ambientales, así como en la salud de los seres humanos; debido a la larga longevidad que presentan los polímeros para poder degradarse en su totalidad y su alta tasa de emisión de gases contaminantes. Por ende, la producción de biopolímeros biodegradables ha sido una gran alternativa para la sustitución de este, debido a la baja tasa de emisión de gases, asimismo su fácil biodegradación (Mehrpooya *et al.*, 2023). El desarrollo de biopolímeros biodegradables está atrayendo actualmente una importante atención científica, lo que ha impulsado una evolución hacia productos y materiales ecológicos, es decir, los biopolímeros muestran un gran potencial para el almacenamiento y producción de energía (Gopinath *et al.*, 2023).

El uso de almidón es una buena opción para la producción de biopolímeros biodegradables, debido a su fácil manipulación, el almidón es un polisacárido que se encuentra con facilidad en maíz, arroz, papa, yuca, plátano y algas, entre otro. El almidón presente en las algas es 5-10 veces mayor que los sustratos lignocelulosicos, por otro lado, las algas crecen en un periodo corto en cuerpos de agua con una gran concentración de nitrógeno o fosforo, de modo que se pueden cultivar con mucha facilidad (Arun *et al.*, 2022). Los biopolímeros a base de almidón de algas son cruciales para el desarrollo de dispositivos de almacenamiento y producción de energía. Por ejemplo, los electrolitos optimizados a base de algas presentan una alta conductividad iónica, adecuado para baterías, celdas de combustible, supercondensadores y celdas solares sensibilizadas con colorantes (Torres *et al.*, 2021).

## **1.5 OBJETIVO GENERAL.**

Obtener un biopolímero con características físicas y deseables para aplicaciones en dispositivos para el almacenamiento y producción de energía.

### **1.5.1 Objetivos específicos.**

1. Evaluar el rendimiento de la materia prima “almidón de algas” para la obtención de un biopolímero.
2. Obtener un biopolímero a partir de almidón de algas extraído y evaluar sus propiedades físicas.

## **1.6 HIPÓTESIS.**

El biopolímero a base de algas presentará propiedades físicas adecuadas para aplicarse en dispositivos para el almacenamiento y producción de energía. Así mismo, presentará diferencia con el biopolímero a base de almidón de maíz.

## 2 CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.

---

### 2.1 BIOPOLÍMEROS.

Los biopolímeros es un término centrado para todos los polímeros de base biológica y biodegradables (Mehrpuoya *et al.*, 2023). Además, son materiales producidos a partir de recursos renovables como plantas, animales y microorganismos (Jaiswal *et al.*, 2019). Los biopolímeros se componen de unidades monoméricas como ácidos nucleicos, polisacáridos y aminoácidos. Los biopolímeros están hechos de unidades monoméricas covalentes conectadas entre sí; formando una cadena lineal o ramificada, con la finalidad de formar estructuras jerárquicas en longitudes sucesivas (Jaiswal *et al.*, 2019; Udayakumar *et al.*, 2021).

Existen tres clases principales de biopolímeros, clasificadas según las unidades monoméricas y la estructura: (1) polietilenos; que son polímeros provenientes de aminoácidos de cadena corta, (2) polinucleótidos (ARN Y ADN); que son polímeros de cadena largas provenientes de ácidos nucleicos y (3) polisacáridos; que a menudo tienen una estructura de carbohidratos poliméricos lineal. También se pueden clasificar en tres grupos; de acuerdo al origen de los biopolímeros, clasificándose como: biopolímeros naturales, biopolímeros sintéticos y biopolímeros sintetizados a partir de biomasa y productos derivados del petróleo (Jaiswal *et al.*, 2019). Los biopolímeros son materiales macromoleculares que pueden se sintetizados de forma natural o sintética, hasta llegar a formar un bioplástico. El término “bioplástico” se centra usualmente en la composición orgánica de material, ya que está compuesto de cadenas biopoliméricas (Mehrpuoya *et al.*, 2023; Magaña *et al.*, 2023). Algunas de las ventajas de los biopolímeros son las siguientes (Ashter, 2016b).

- Reducción de CO<sub>2</sub> de la atmósfera.
- Material compostable.
- Ayuda en la reducción de la contaminación ambiental.
- Reducción de la dependencia de polímeros.

### 2.1.1 Biopolímero biodegradable.

Para empezar, un polímero biodegradable es un término centrado en la funcionalidad de un material con biodegradabilidad, y se aplica a los polímeros que se degradan bajo la acción de microorganismos como moho, hongos y bacterias dentro de un período de tiempo y ambiente específico (Niaounakis, 2015a). Es decir, que los microorganismos rompen la materia en partículas muy pequeñas; hasta lograr oxidar dichas partículas y transformarlo en agua o CO<sub>2</sub>. Hay tres pasos principales involucrados en la biodegradación de los biopolímeros: biodeterioro, biofragmentación y asimilación (Ashter, 2016b; Machado *et al.*, 2020).

- El biodeterioro es la modificación de las propiedades mecánicas, químicas y físicas del polímero debido al crecimiento microbiano en la superficie o en el interior del polímero.
- La biofragmentación es la conversión de polímeros en oligómeros y monómeros por metabolismo microbiano.
- La asimilación es el paso final en el que los microorganismos, provistos de fuentes de carbono, energía y nutrientes del paso de fragmentación, pueden convertir estos componentes en dióxido de carbono, agua y biomasa.

La diferencia de un biopolímero biodegradable y un biopolímero compostable está determinada por la tasa de biodegradación, desintegración y toxicidad, todos los biopolímeros compostables son por defecto biodegradables (Ashter, 2016a); estos dos criterios subrayan la definición de biopolímero, esto se debe por la fuente de las materias primas y la biodegradabilidad del polímero. Aquí se hace una diferenciación entre cada tipo de biopolímero (Niaounakis, 2015a)

- Tipo A: fabricados a partir de materias renovables y son biodegradables. Estos biopolímeros se obtienen de cultivos de plantas (almidón y celulosa), así como de cianobacterias. Algunos biopolímeros como los PLA, PHA, PBAT y mezclas de almidón se encuentran catalogadas como biopolímeros biodegradables de base biológica (Aswathi *et al.*, 2022).
- Tipo B: hechos a partir de combustibles fósiles y son biodegradables. Estos biopolímeros se producen a partir de combustibles fósiles, como los poliésteres alifáticos derivados del petróleo, y están certificados como biodegradables y compostables, como el PCL o el PBS (Niaounakis, 2015a).

### **2.1.2 Aplicaciones de biopolímeros en energías.**

Los biopolímeros o polímeros biodegradables son un campo emergente, ya que las aplicaciones de los biopolímeros se centran en tres áreas principales: embalaje médico, agrícola y de bienes de consumo. Pero, en los últimos años ha existido un gran interés en los biopolímeros; para aplicaciones de almacenamiento y conversión de energía; como en la aplicación en baterías de litio, paneles fotovoltaicos y celdas de combustibles, entre otros (Mittal, 2013; Sudhakar *et al.*, 2018). Por ejemplo, se ha estudiado biopolímeros a base de celulosa, para el uso en dispositivos de almacenamiento de energía como los condensadores electroquímicos, ya que permite almacenar una gran cantidad de energía por unidad de volumen. Sin embargo, a pesar de que los biopolímeros biodegradables exhiben características prometedoras en la construcción de materiales de almacenamiento y conversión de energía, aún no se han abordado por completo, debido a algunos problemas, como las malas propiedades mecánicas, el bajo rendimiento en aplicaciones industriales y la baja tasa de biodegradabilidad (Gopinath *et al.*, 2023). Algunas aplicaciones de lo biopolímeros en el campo del almacenamiento y conversión de energía son:

### **2.1.3 Electrolitos biopoliméricos.**

El desarrollo de nuevos materiales que pueden aplicarse como electrolitos poliméricos que ha llevado a la creación de modernos sistemas de generación y almacenamiento de energía (Sudhakar *et al.*, 2018). Los electrolitos poliméricos son una clase de material que desempeñan un papel clave en los dispositivos modernos de almacenamiento de energía. Además, los electrolitos poliméricos consisten en sales disueltas en un polímero de alto peso molecular y representan una clase única de compuestos de coordinación sólidos (Mittal, 2013). El uso de biopolímeros en electrolitos ofrece varias ventajas, incluida una mayor sostenibilidad, biocompatibilidad y biodegradabilidad en comparación con los electrolitos poliméricos biodegradables (Arrieta *et al.*, 2023).

El polioxido de etileno (PEO) fue el primer polímero soluble propuesto y estudiado en baterías recargables de litio con electrolito de polímero sólido (Mittal, 2013). Los electrolitos de biopolímeros elaborados a partir de almidón muestran resultados prometedores en términos de conductividad y estabilidad, convirtiéndolos en materiales adecuados para el almacenamiento de energía (Arrieta *et al.*, 2023), otros biopolímeros naturales como HEC, la HPC, CMC, PAV, PEG presentan una excelente conductividad iónica mediante dopantes inorgánicos, ácidos y gelificación; Estos electrolitos poliméricos se denominan electrolitos biopolímeros (Sudhakar *et al.*, 2018).

#### **2.1.4 Celda de combustión.**

Las celdas de combustible son fuentes de energía electroquímica donde tienen lugar reacciones redox en sus electrodos a medida que los reactivos fluyen separados por una membrana conductora de iones. Este separador de electrolitos permite un transporte selectivo de protones desde el ánodo al cátodo y actúa como material aislante de electrones. Recientemente, ha surgido el objetivo de desarrollar electrolitos de polímeros biosólidos (BioSPE) basados en polímeros naturales para sustituir las membranas basadas en polímeros sintéticos debido a su abundancia, bajo costo y naturaleza amigable con el medio ambiente. Dichos polímeros de base natural incluyen agar, gelatina, almidón, celulosa o quitosano. En particular, el quitosano y sus derivados se han investigado exhaustivamente como algunos de los materiales “verdes” más atractivos para aplicaciones de fuentes de energía debido a su biodegradabilidad, biocompatibilidad, no toxicidad y bajo costo (Alday *et al.*, 2020).

#### **2.1.5 Hidrogeles poliméricos.**

Los hidrogeles a base de polímeros son un tipo de material blando compuesto por redes de polímeros tridimensionales que tienen la capacidad de absorber y retener grandes cantidades de agua o fluidos biológicos mientras mantienen su integridad estructural. Estos polímeros hidrófilos son capaces de hincharse en presencia de agua, lo que da como resultado una estructura similar a un gel. Los polímeros naturales comúnmente utilizados incluyen alginato, quitosano, ácido hialurónico y gelatina. Los polímeros sintéticos como PEG y PAAm se emplean ampliamente en la síntesis de hidrogeles. La elección del polímero depende de las propiedades deseadas y de las aplicaciones previstas del hidrogel (Thang *et al.*, 2023).

Los hidrogeles y los materiales derivados de hidrogeles ofrecen una variedad de características únicas para los sistemas de energía eléctrica, incluida la conductividad iónica y electrónica, mecanismos de las conversiones termoeléctricas, fotovoltaicas, fototérmicas y las ventajas y mejoras de los materiales de conversión de hidrogel. Así mismo, los hidrogeles se pueden integrar en celdas termo-electroquímicas, generadores termoeléctricos, supercondensadores termoeléctricos de iones y biosensores fotoelectroquímicos (Kong *et al.*, 2023).

### **2.1.6 Celdas solares sensibilizadas por tinte (DSSC).**

Las DSSC usa platino como contraelectrodo, sin embargo, el uso de platino sigue siendo un desafío debido a al alto costos de este metal y su susceptibilidad a la corrosión. El uso de electrolitos poliméricos o transportadores de huecos con mayor movilidad como sustitutos de los electrolitos líquidos. En este sentido, los polímeros pueden servir como contraelectrodos eficientes reemplazando el electrodo platino en las DSSC, al mismo tiempo que sustituyen los electrolitos líquidos como electrolitos poliméricos o transportadores de huecos en DSSC de estado sólido. Teniendo en cuenta la fragilidad y las restricciones de forma, los sustratos poliméricos también se pueden usar para reemplazar los sustratos de vidrio rígidos, proporcionando DSSC más flexibles (Yun *et al.*, 2016).

### **2.1.7 Condensadores electroquímicos.**

Los condensadores electroquímicos (SC) tienen una alta densidad de potencia y un ciclo de vida prolongado debido a su exclusivo mecanismo de almacenamiento. Aparte del material del electrodo, el electrolito es un componente crucial del SC, ya que determina la energía y la potencia de salida del dispositivo. En general, en la fabricación de condensadores electroquímicos se pueden utilizar electrolitos líquidos o en estado sólido. Para limitar la posibilidad de fugas del dispositivo, se pueden incorporar electrolitos de estado sólido al SC; estos materiales también se utilizan como separadores de electrodos además de ser medios conductores iónicos (Gopinath *et al.*, 2023).

Entre los diversos materiales disponibles para la producción de condensadores, la investigación actual se ha centrado en materiales basados en biopolímeros naturales para aplicaciones de almacenamiento de energía. Estos materiales pueden ayudar a aumentar la sostenibilidad al reducir el uso de recursos no renovables y tóxicos/peligrosos, se han realizado amplios estudios sobre materiales a base de biopolímeros como celulosa, queratina, almidón, lignina, alginato, agar y quitosano se han informado para aplicaciones de condensadores y han indicado un incremento gradual a lo largo de los años (Appiah *et al.*, 2022).

## 2.1.8 Propiedades físicas de los biopolímeros que se aplican en energías.

Las propiedades físicas y los compuestos asociados con los biopolímeros incluyen principalmente los puntos de fusión, ebullición, forma, densidad y viscosidad, entre otros. Además, se descubrió que la interacción de las moléculas de agua con los biopolímeros altera la estructura interna al hacerlas sensibles a la humedad (Udayakumar *et al.*, 2021). Por otro lado, los materiales porosos de arquitectura multiescala o los materiales celulares pueden ofrecer oportunidades de conversión y almacenamiento de energía debido a su porosidad controlable, alta relación superficie-volumen, gran volumen de poro y adaptabilidad topológica de su arquitectura (Hoseini *et al.*, 2023).

**Tabla 1.** Propiedades físicas de algunos biopolímeros y su aplicación en el campo de las energías renovables.

<b>Biopolímero.</b>	<b>Propiedades.</b>	<b>Aplicaciones.</b>	
<b>PEG/HPC.</b>	Soluble en agua. Alta flexibilidad. Alta absorbancia.	Se combina con otros materiales porosos para formar tecnologías de almacenamiento de energía.	Zhang <i>et al.</i> , 2022.
<b>Quitosano.</b>	Biodegradable. Alta absorbancia.	Aplicaciones en las celdas de combustible, las celdas solares, baterías de iones de litio.	Peter <i>et al.</i> , 2021.
<b>Celulosa.</b>	Insoluble. Biodegradable. Biocompostable.	Aplicación en dispositivos fotovoltaicos. Sistemas de almacenamiento de energía, recolectores de energía mecánicos.	Wang <i>et al.</i> , 2017
<b>PHA.</b>	Flexibles. Biocompatibles. Biodegradables.	Electrolito para baterías de litio.	Dall'Asta <i>et al.</i> , 2017.
<b>PVA/PVAc.</b>	Soluble. Biodegradable.	Electrolito.	Mittal, 2013.
<b>Almidón.</b>	Alta absorbancia. Biodegradable. Soluble.	Aditivos de electrodos de carbono. Electrolitos.	Kasturi <i>et al.</i> , 2019.

## **2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS BIOPOLÍMEROS.**

Los biopolímeros se pueden dividir en dos grandes grupos; biopolímeros biodegradables y no biodegradables o pueden clasificarse según su origen como biopolímeros de base biológica o basados en combustibles fósiles. Los biopolímeros de base biológica se pueden producir a partir de plantas, animales o microorganismos (Niaounakis, 2015a). Asimismo, se pueden clasificar según su origen: biopolímeros naturales (almidón y celulosa) y biopolímeros sintéticos (PLA, PHA, PLC y PVA) (Valero *et al.*, 2013).

### **2.2.1 Biopolímeros sintéticos**

#### **2.2.1.1 Ácido poliláctico (PLA).**

El PLA es un poliéster térmico derivado de la familia de ácidos  $\alpha$ -hidroxialcanoico, el PLA obtenido por polimerización de ácido láctico que se produce por fermentación de sacáridos y almidón derivados del maíz, la papa y la caña de azúcar (Niaounakis, 2015a). Además, pueden ser sintetizadas mediante un proceso de polimerización por condensación a una temperatura no inferior a 120°C en presencia de catalizadores. Mediante este método, solamente es posible obtener polímeros de bajo peso molecular. Las ventajas que presenta el PLA es que es un biopolímero biodegradable, reciclable y compostable, debido que el ácido poliláctico tiene características similares al polipropileno, polietileno o poliestireno. Asimismo, el PLA no produce efectos tóxicos o cancerígenos (Jha *et al.*, 2019; Valero *et al.*, 2013).

#### **2.2.1.2 Polihidroxialcanoato (PHA).**

Los PHA se producen mediante la fermentación de polisacáridos, donde los microorganismos crecen en la superficie y secretan enzimas que descomponen el polisacárido en unidades monoméricas de hidroxilácido, los hidroxilácidos luego son absorbidos por los microorganismos y utilizados como fuentes de carbono para el crecimiento, los PHA son producidos mediante la fermentación de una fuente de carbono por parte del microorganismo (Jha *et al.*, 2019; Valero *et al.*, 2013).

La ventaja de los PHA está asociada con los sustratos utilizados para su síntesis, los PHA se pueden obtener a partir de desechos agroindustriales, frecuentemente son ácidos grasos volátiles obtenidos de la degradación de algunos desechos orgánicos lipídicos, pero que deben utilizarse en bajas concentraciones, debido a su toxicidad celular. Además, la producción de PHA depende de la cepa bacteriana utilizada, la fase de crecimiento microbiana y del sustrato (Valero *et al.*, 2013).

### **2.2.1.3 Policaprolactonas (PLC).**

Los PCL es un biopolímero de poliéster sintético, que se prepara mediante la polimerización con apertura de anillo de  $\epsilon$ -caprolactona en presencia de un catalizador como el octato estannoso. Asimismo, es un polímero semicristalino con alta solubilidad de policaprolactona y bajo punto de fusión (59-64°C). Además, el PLC se combina con almidón para reducir su costo, aumentar la biodegradabilidad y mejorar la resistencia al impacto (Hassan *et al.*, 2019; Singh *et al.*, 2021).

Los PCL tiene una serie de propiedades únicas: es rentable, tiene alta tenacidad y es biocompatible. La tasa de degradación del PCL es mucho más lenta que la de otros biopolímeros. Esta propiedad única lo ayuda en aplicaciones de administración de medicamentos. Tiene buena resistencia química a los fluidos biológicos debido a su naturaleza hidrofóbica. Puede mezclarse fácilmente con otros polímeros sintéticos. PCL actúa como un biomaterial y se utiliza en aplicaciones de ingeniería de tejidos porque degrada fácilmente su enlace éster (Singh *et al.*, 2021).

### **2.2.1.4 Acetato de polivinilo (PVA).**

El PVA es un biopolímero termoplástico que se sintetiza mediante la hidrólisis de su precursor, el acetato de polivinilo. Asimismo, este biopolímero se degrada por la acción de microorganismos biológicos. Además, es altamente soluble en agua debido a su mayor cristalinidad. Es un biopolímero muy común que puede unirse químicamente a la superficie de los materiales y se retiene fácilmente en la superficie del agua. El PVA es un polímero no tóxico y biodegradable que se utiliza en envases de alimentos. También tiene aplicaciones en sectores biomédicos, por ejemplo, lentes de contacto, cirugía cardíaca, administración de fármacos y vendajes para heridas (Singh *et al.*, 2021).

## **2.2.2 Biopolímeros naturales.**

### **2.2.2.1 Biopolímeros a partir del almidón.**

Entre los biopolímeros de base biológica, se sabe que el almidón está formado por una mezcla de dos macromoléculas: amilosa y amilopectina, la amilosa es una molécula lineal con una estructura amorfa y la amilopectina es una molécula ramificada con una estructura cristalina, los almidones más comunes contienen alrededor del 25% de amilosa y 75% de amilopectina. El almidón es un polímero semicristalino con alto potencial de utilización en la síntesis de materiales biodegradables (Malekzadeh *et al.*, 2023; Valero *et al.*, 2013).

Asimismo, ha sido considerado como uno de los candidatos más prometedores para películas biodegradables y comestibles, ya que es asequible, disponible, abundante y renovable (Shahabi *et al.*, 2019).

#### **2.2.2.2 Biopolímeros basados en celulosa.**

La celulosa se forma por unión de moléculas de  $\beta$ -glucosa mediante enlaces  $\beta$ -1,4-O-glucosídicos, además de presentar una estructura lineal, en la que se establecen múltiples puentes de hidrógeno entre los grupos O-H de las cadenas de glucosa y originan las fibras compactas que constituyen la pared celular. Los polímeros basados en celulosa se producen mediante modificación química de celulosa natural. Los principales representantes son el celofán, el acetato de celulosa, el éster de celulosa, la celulosa regenerada para fibras y los biomateriales compuestos de celulosa (Valero *et al.*, 2013).

### **2.3 BIOPOLÍMEROS DE BASE BIOLÓGICA.**

Los materiales biobasado es un término centrado en la base de materias primas y se aplica a polímeros derivados de recursos renovables (Niaounakis, 2015a). Algunos biopolímeros son totalmente de base biológica y son biodegradables, como el almidón y la celulosa, mientras que otros pueden ser parcialmente de base biológica y no biodegradables, como el biotetraflato de polietileno, el biopolipropileno y el biopolietileno (Ashter, 2016b).

Los biopolímeros de base biológica no biodegradables poseen características similares a los polímeros de origen fósil, como el polietileno (PE) de origen biológico y de origen fósil. La principal diferencia en esta categoría es la fuente del monómero. Por otro lado, los biopolímeros biodegradables de base biológica comprenden biopolímeros sintéticos y naturales, como quitosano, almidón, caucho natural, entre otros (Sinha *et al.*, 2022). Algunas características que presentan los biopolímeros de base biológica son (Ashter, 2016a):

- Los plásticos de base biológica se pueden degradar a través del compostaje.
- Al final de su vida útil, cuando el reciclaje ya no es una opción, estos materiales pueden quemarse para producir energía renovable o usarse para fabricar biocombustibles.
- Los plásticos de origen biológico pueden reducir el consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono en comparación con los plásticos de origen fósil.

## **2.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE BIOPOLÍMEROS.**

Las características de los biopolímeros se pueden clasificar en propiedades relativas, de síntesis y de componentes. Las propiedades relativas se refieren a los atributos fundamentales e inherentes de un polímero que desvían la estructura y la composición química. Las propiedades relativas representan la densidad, solubilidad, transparencia y permeabilidad del polímero. Las propiedades de síntesis están asociadas con los parámetros de calidad, es decir, viscosidad, pureza óptica, propiedades mecánicas, estabilidad y peso molecular. Las propiedades de los componentes son la combinación de las dos propiedades anteriores en relación con el rendimiento y la funcionalidad de los biopolímeros (Udayakumar *et al.*, 2021).

### **2.4.1 Propiedades de síntesis.**

#### **2.4.1.1 Grado de hinchazón**

El hinchamiento de los biopolímeros es el fenómeno de transferencia de masa por difusión de fluido en el material. El grado de hinchamiento es la capacidad de los sistemas poliméricos para absorber la solución de interés, expresada en masa o volumen. La capacidad de hinchamiento de los biopolímeros depende de la naturaleza de los polímeros, la interacción disolvente/polímero y estructura polimérica y es una propiedad que influye directamente en su aplicación. La mayoría de los biopolímeros son más susceptibles a la influencia del agua debido a su naturaleza hidrófila. Generalmente, los cálculos del grado de hinchamiento implican la medición de la masa inicial de la muestra y la masa después de contactar con la solución de interés (Tomoda *et al.*, 2020).

### **2.4.2 Propiedades de componentes.**

#### **2.4.2.1 Degradación.**

Los estudios de biodegradabilidad de los biopolímeros se concentran en el comportamiento indeseable o la pérdida de propiedades durante las aplicaciones. El término “degradabilidad” se utiliza generalmente para polímeros que se degradan durante o inmediatamente después de su aplicación. Los tipos de degradación de biopolímeros son fotodegradación, degradación mecánica y degradación química. La fotodegradación es la degradación de cadenas de polímeros por luz y radiación ultravioleta (UV); la degradación mecánica es la influencia de las fuerzas mecánicas sobre la estabilidad del polímero y la degradación química se refiere a la hidrólisis, la degradación enzimática o la influencia del pH (Tomoda *et al.*, 2020).

### **2.4.3 Propiedades relativas.**

Las propiedades intrínsecas o relativa son propiedades inherentes al propio biopolímero y dependen principalmente de su composición química y estructural. Las propiedades intrínsecas se pueden clasificar además en propiedades moleculares y de volumen. Las propiedades moleculares intrínsecas dependen principalmente de la naturaleza química de las unidades monoméricas que lo constituyen, mientras que las propiedades volumétricas intrínsecas dependen principalmente de la estructura del polímero (Niaounakis, 2015b).

#### **2.4.3.1 Densidad.**

La densidad de los biopolímeros suele oscilar entre menos de 1,0 g/cm<sup>3</sup> y más de 1,7 g/cm<sup>3</sup>. Estos rangos de densidad son indicativos ya que dependen de varios factores, como la historia térmica, el estiramiento, la pureza de los componentes; la mayoría de los polímeros biodegradables tienen densidades más altas que los polímeros sintéticos. Los valores más altos de densidad de los polímeros biodegradables implican un mayor consumo de energía (por ejemplo, costos de transporte), un factor que debe tenerse en cuenta al evaluar el impacto ambiental de los polímeros biodegradables (Niaounakis, 2015b).

#### **2.4.3.2 Solubilidad.**

La solubilidad en agua se define como el porcentaje de la materia soluble total de la película que se solubiliza después de la inmersión en agua. (Shahabi-Ghahfarrokhi *et al.*, 2019). El estudio de la solubilidad de los polímeros es importante a la hora de especificar su resistencia a determinados ambientes, por su utilización en la fabricación de envases, recipientes de almacenamiento, tuberías y maquinaria, así como en aplicaciones en las que el polímero se encuentra en disolución como pinturas, recubrimientos, hilado de fibras, adhesivos, aceites multigrado, plastificantes (González-Prolongo, 1997). La solubilidad de un biopolímero viene determinada por su morfología y composición. Asimismo, los biopolímeros con alta cristalinidad son más difíciles de disolver que aquellos con baja cristalinidad (Niaounakis, 2015b).

### 2.4.3.3 Espesor.

El espesor afectará las propiedades mecánicas de la película, incluida la resistencia a la tracción, el alargamiento, la velocidad de transmisión del vapor de agua, y la textura del producto. Además, el espesor se utiliza a menudo para calcular la permeabilidad y las propiedades mecánicas y ópticas de las películas. Por ejemplo, el espesor de los biopolímeros a base de almidón aumentó al aumentar el contenido de amilosa en el almidón. El tamaño y la forma de los gránulos también afectan significativamente el espesor de las películas a base de almidón (Rahmadi *et al.*, 2023).

En una investigación de Colussi *et al.*, 2021, se formaron biopolímero de almidón con la misma concentración y se obtuvieron biopolímeros con diferentes espesores, donde el biopolímero de almidón de papa fue el más grueso (0.227 mm), luego el de almidón de maíz (0.196 mm) y el más delgado fue el biopolímero de almidón de trigo (0.189 mm). La diferencia en el espesor de la capa fue causada por el contenido de amilosa en el tipo de almidón, que fue 20,90%, 25%, 26,90% para el almidón de trigo, maíz y papa, respectivamente.

### 2.4.3.4 Contenido de humedad.

Los biopolímeros con un alto contenido de humedad afectarán la durabilidad de los biopolímeros y del producto envasado. Es muy posible que una película con bajo contenido de humedad proteja el producto envasado durante más tiempo. Por otro lado, el contenido de humedad afecta las propiedades físicas y mecánicas del biopolímero y puede cambiar su dureza o resistencia, en la Tabla 2 se observa algunas propiedades físicas de algunos biopolímeros de almidón (Rahmadi *et al.*, 2023).

**Tabla 2.** Espesor y contenido de humedad (CH) de algunos biopolímeros de almidón y como afectan sus propiedades mecánicas (Rahmadi *et al.*, 2023).

Tipo de almidón.	Parámetros.			
	Espesor (mm)	Tensión de ruptura (Mpa)	Alargamiento.	CH%
Almidón de papa.	Aumenta.	4.28	5.2 %	Disminuye.
Almidón de maíz.	0.07-0.2	0.62-10.5	17.6-70.4%	10.6 - 22. 9%
Almidón de arroz.	0.015-0.022	0.013-0.032	$8.2 \times 10^{-4}$ - $2.5 \times 10^{-3}$ %	3.6 - 5 %
Almidón de jengibre.	0.172-0.1724	15.4-16	33.3-39%	-
Almidón de yuca.	-	4.4 - 5.4	9.64-11%	-

## 2.5 ALMIDÓN.

El almidón es un polisacárido vegetal más popular para la formación de bioplásticos debido a su abundancia, rentabilidad y excelentes capacidades de formación de película, ya sea solos o en combinación con otros biopolímeros. El almidón es un monómero compuesto por unidades  $1,4-\alpha$ -glucosa (Thakur *et al.*, 2019). Además, se compone de dos tipos de polisacáridos: amilosa y amilopectina (Dome *et al.*, 2020). La amilosa (25–30%) es esencialmente un polisacárido lineal con enlaces  $\alpha$ -1,4 que contiene puntos de ramificación  $\alpha$ -1,6; que contribuyen principalmente a la fase amorfa del gránulo de almidón. Por el contrario, la amilopectina (75-70%) es una estructura muy ramificada que contiene enlaces  $\alpha$ -1,4 y puntos de ramificación  $\alpha$ -1,6. Asimismo, contribuye predominantemente a la organización cristalina de los gránulos de almidón. Por otro lado, los almidones con mayores cantidades de amilosa suelen poseer mejores características para la formación de materiales, incluida la resistencia mecánica, el alargamiento y las propiedades de barrera a los gases (Thakur *et al.*, 2019).

Los almidones presentan diferentes formas de gránulos, tamaños, contenidos y proporciones de amilosa-amilopectina, longitudes de cadena ramificada y propiedades físicas y químicas. Las fuentes de almidón son muy variables e incluyen maíz, trigo, papa, arroz, tapioca, ñame, avena, batata, cebada, centeno, malanga, mijo, grano de amaranto, quinua, habas, lentejas, frijoles, guisantes, garbanzos, palmas, castañas, bellotas, arrurruz, arracacha, plátano, trigo, sagú, sorgo, algas, entre otros. En la Tabla 3 se muestran las características moleculares de almidones de diferentes fuentes (Ramli *et al.*, 2020; Thakur *et al.*, 2019).

**Tabla 3.** Porcentaje de amilosa y amilopectina y tamaño de los gránulos en almidones comunes de diferentes fuentes (Ramli *et al.*, 2020; Thakur *et al.*, 2019).

Fuente de almidón.	Amilosa.	Amilopectina.	Tamaño AVG ( $\mu\text{m}$ ).
Papa.	21%	79%	36
Tapioca.	17%	83%	14
Maíz.	23%	77%	14.3
Arroz.	17%	83%	6
Trigo.	25%	75%	7.2
Guisante.	33-50%	60-67%	2-40
Algas.	25.52%	74.48%	-

### 2.5.1 Propiedades del almidón.

Algunas de las propiedades importantes del almidón se enumeran a continuación:

**Hinchamiento:** el hinchamiento de los gránulos, que se describe como un paso inicial del procesamiento del almidón, está influenciado en gran medida por la forma de los gránulos, el agrandamiento de amilosa-amilopectina y sus interacciones (Thakur *et al.*, 2019).

**Solubilidad:** el índice de solubilidad de las películas de almidón depende de la fuente de almidón. Asimismo, los almidones con concentraciones más altas de amilopectina disminuyen la solubilidad de la película en agua debido a su región cristalina (Thakur *et al.*, 2019).

**Composición:** La proporción de amilosa y amilopectina en el gránulo de almidón varía de una especie a otra e incluso entre las mismas especies cultivadas en las diferentes ubicaciones geográficas. Después del proceso de extracción, el almidón todavía contiene algunas fracciones de proteínas, fibra y lípidos. La presencia de estos componentes tiene un impacto en las propiedades funcionales del almidón. Es decir, los lípidos forman complejos con la amilosa y pueden modificar las propiedades como aumento de la temperatura de gelatinización, reducción de la solubilidad en agua, retrogradación e índice de hinchazón (Bashir *et al.*, 2019).

**Gelatinización:** El almidón es insoluble en agua fría, sin embargo, al calentarlo en agua a más de 50 °C, sufre un proceso conocido como gelatinización. La gelatinización es un proceso endotérmico de dos etapas, en la primera fase los gránulos de almidón se hinchan debido a la rotura de los enlaces de hidrógeno en las porciones amorfas del almidón. En la segunda etapa, el agua actúa como plastificante, lo que resulta en hidratación e hinchazón de las regiones amorfas. Por otro lado, al aplicar calor; la estructura (cristalina) de la amilopectina se altera, lo que provoca una disminución de la cristalinidad y se absorbe una mayor cantidad de agua, lo que provoca varios cambios que incluyen la solubilización del almidón, la hinchazón de los gránulos de almidón y la pérdida de birrefringencia. La penetración de agua hincha el gránulo de almidón aumentando así la aleatoriedad en el gránulo de almidón. Finalmente se rompe el gránulo de almidón y se libera la amilosa, lo que da como resultado la formación de una pasta de almidón, aumentando la viscosidad de la solución (Bashir *et al.*, 2019).

## 2.6 ALGAS.

Las algas o microalgas son un grupo diverso de organismos unicelulares que comprenden protistas eucariotas y cianobacterias procarióticas (Martínez *et al.*, 2022). Las algas son organismos fotosintéticos de rápido crecimiento, la mayoría de los fotótrofos de algas contienen cadenas largas de polisacáridos como celulosa, glucano y galactano debido a la presencia de diversos compuestos naturales, las algas pueden ser una excelente fuente de muchos productos naturales, incluidos los biopolímeros. Los fotótrofos de algas proporcionan una excelente materia prima para la producción de biopolímeros debido a muchas ventajas, como el alto rendimiento y la capacidad de crecer en diversos entornos. El rendimiento de las algas cultivadas es mucho mayor (22 kg m<sup>2</sup>/año) que el de las plantas terrestres (0,5-4,4 kg m<sup>2</sup>/año), una característica muy favorable que las convierte en candidatas ideales para su utilización en la producción de polímeros (Azeem *et al.*, 2017).

### 2.6.1 Algas verdes.

Las algas verdes son un grupo grande y diverso de organismos que consta de más de 700 especies. Las algas verdes se encuentran en una amplia gama debido que se pueden encontrar en condiciones acuáticas, anfibias, terrestres y subaéreas. Las algas verdes son eucariotas caracterizadas por la clorofila A y B como principales pigmentos fotosintéticos (Ibrahim *et al.*, 2017). La clorofila A y B son dos tipos principales de clorofila que se encuentran en las plantas y las algas verdes. Ambos están involucrados en el proceso de la fotosíntesis. Tanto la clorofila A como la B se encuentran en los cloroplastos, asociadas con proteínas de membrana integrales en los tilacoides. La principal diferencia entre la clorofila A y B es su papel en la fotosíntesis; la clorofila A es el pigmento principal involucrado en la fotosíntesis, mientras que la clorofila B es el pigmento accesorio, que recolecta la energía para pasar a la clorofila A (Panawala, 2017).

La mayoría de las algas verdes unicelulares contienen un cloroplasto por célula. Asimismo, almacenan su alimento como almidón y tienen paredes celulares bastante rígidas compuestas de celulosa con sustancias pécticas incorporadas en la estructura (Ibrahim *et al.*, 2017). Las algas verdes son organismos que se caracterizan por tener clorofilas como principales pigmentos fotosintéticos, almidón ubicado dentro del cloroplasto como principal producto de almacenamiento y flagelos de tipo latigazo. También se pueden distinguir de otras algas eucariotas por tener dos membranas de cloroplasto y una estructura estrellada en la región de transición flagelar (García *et al.*, 2021).

## 2.6.2 Almacenamiento de almidón en algas.

La producción y almacenamiento de moléculas ricas en energía, como el almidón y los lípidos, son un amortiguador indispensable frente a las condiciones de crecimiento variable externo y permiten que la célula fotosintética sobreviva períodos de ausencia de energía luminosa durante la noche, así como durante períodos de intensidad de luz variable. La mayoría de las algas verdes producen y acumulan almidón como energía primaria, mientras que los lípidos sirven como un almacén secundario producido en cantidades mínimas en condición estándar. Las reservas de almidón y carbono aseguran que estén siempre disponibles para procesos metabólicos importantes, la función más crítica del almidón es proporcionar energía para los procesos del ciclo celular, como la replicación del ADN (Ácido desoxirribonucleico), la división nuclear y celular (Vítova *et al.*, 2014).

En ausencia de nutrientes, se puede lograr más del 50 % del contenido de almidón o TAG (triglicéridos) con la privación de nutrientes específicos. Sin embargo, esto también genera estrés oxidativo que conduce a la disminución de la actividad fotosintética y la consiguiente reducción de la producción general de metabolitos de almacenamiento. La compensación entre el crecimiento de microalgas y la producción de metabolitos de almacenamiento debe considerarse cuidadosamente para optimizar la estrategia de manipulación de nutrientes (Ran *et al.*, 2019).

### 2.6.2.1 Almidón: vía de biosíntesis.

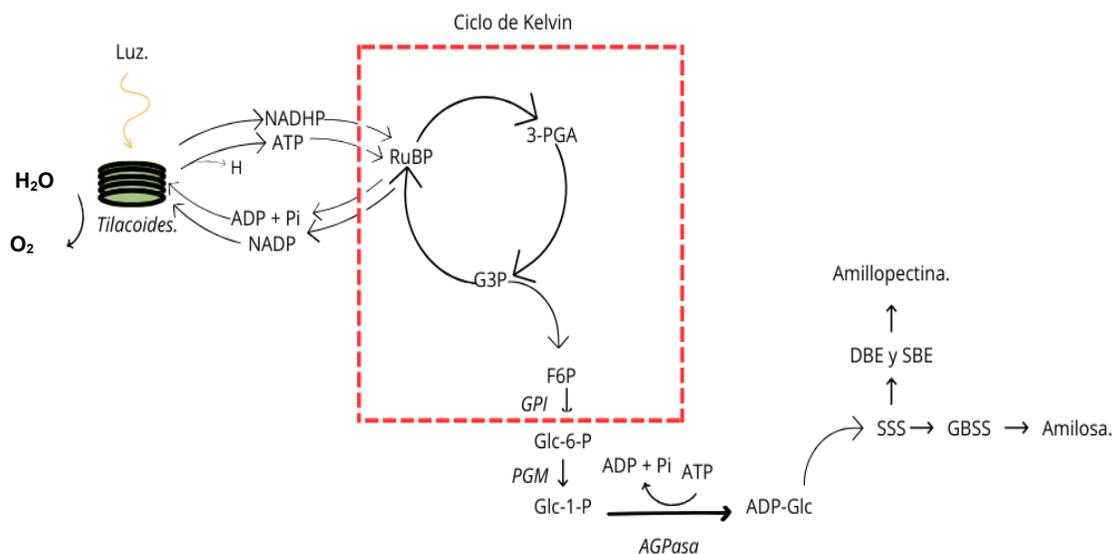
La biosíntesis del almidón empieza con el ciclo de Calvin, donde se fija  $\text{CO}_2$  de la atmósfera mediante una vía metabólica. Las reacciones químicas se llevan a cabo en el estroma que convierte en  $\text{CO}_2$  en G3P, consumiendo ATP y el NADPH producido durante el proceso de fotofosforilación. El ciclo de Calvin se compone de tres fases: fijación, reducción y regeneración (Yahia *et al.*, 2019).

Fijación; una molécula  $\text{CO}_2$  se combina con una molécula aceptora de cinco carbonos, denominada RuBP. La molécula de seis carbonos es inestable e inmediatamente se convierte en 3-PGA. La enzima que realiza esta reacción se llama Rubisco (Yahia *et al.*, 2019).

Reducción: la segunda fase consta de dos fases utilizando ATP y NADPH para convertir las moléculas de 3-PGA en G3P. Cada molécula de 3-PGA recibe un grupo de ATP, convirtiéndose en 1,3-BPG y dejando ADP como subproducto. Las moléculas de 1,3-BPG se reduce (gana electrones), cada molécula recibe dos electrones del NADPH y pierde uno de sus fosfatos, convirtiéndose en G3P, este paso produce NADP y fosfato ( $\text{P}_i$ ) como subproductos (Yahia *et al.*, 2019).

Regeneración: algunas moléculas de G3P se utiliza para producir glucosa, mientras que otras deben reciclarse para generar el aceptor de RuBP, cada molécula G3P ganada se retira del ciclo de Calvin y puede exportarse desde el cloroplasto al citoplasma de la celulosa donde se puede transformar en F6P y Glc-6-P y luego en sacarosa (Yahia *et al.*, 2019).

La biosíntesis de almidón comienza con la formación de Glc-1P a partir de Glc-6P catalizada por PGM, luego Glc-1-P se convierte en ADP-Glc con el consumo de ATP bajo la catálisis de AGPasa (Ran *et al.*, 2019). Posteriormente, ADP-Glc sirve como donante de glucosa para el alargamiento de la cadena de glucano catalizada por GBSS y SSS, el primero conduce en última instancia a la formación de amilosa, mientras que el último genera amilopectina con la ayuda de procesos repetidos de ramificación, elongación y recorte catalizados por varias enzimas sintéticas de almidón (Ran *et al.*, 2019). La síntesis de amilosa en sí misma es simple, las cadenas lineales se forman mediante elongación posesiva mediante la enzima GBSS. Sin embargo, el proceso debe ocurrir en estrecha coordinación con la síntesis de amilopectina (Seung, 2020). La amilopectina es sintetizada al menos por SSS, SBE y DBE. El SSS es responsable de la extensión del enlace  $\alpha$ -1,4 glucosídicos en la amilopectina y amilosa; se cree que SSI, SSII y SSIII son responsables del alargamiento de las cadenas de  $\alpha$ -glucano durante la síntesis de amilopectina. La SBE es la única enzima que actúa sobre el glucano para producir ramas conectadas por enlaces  $\alpha$ -1,6-glucósido, de mientras que la DBE comprende ISA1, ISA2, ISA3 y PUL, que hidroliza los enlaces  $\alpha$ -1,6-glucosídicos y corrige las ramas incorrectas en la síntesis de almidón para garantizar la síntesis ordenada de amilopectina (Huang *et al.*, 2021).



**Figura 1.** Propuesta teórica de la biosíntesis de la formación del almidón.

## 2.7 EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN.

En general, la extracción de almidón de cultivos amiláceos, así como en las algas implica lavar y pelar, rebanar o rallar, desintegrar o licuar en una licuadora, tamizar, lavar y suspender el almidón, como se muestra en la Figura 2 (Demiate *et al.*, 2023).

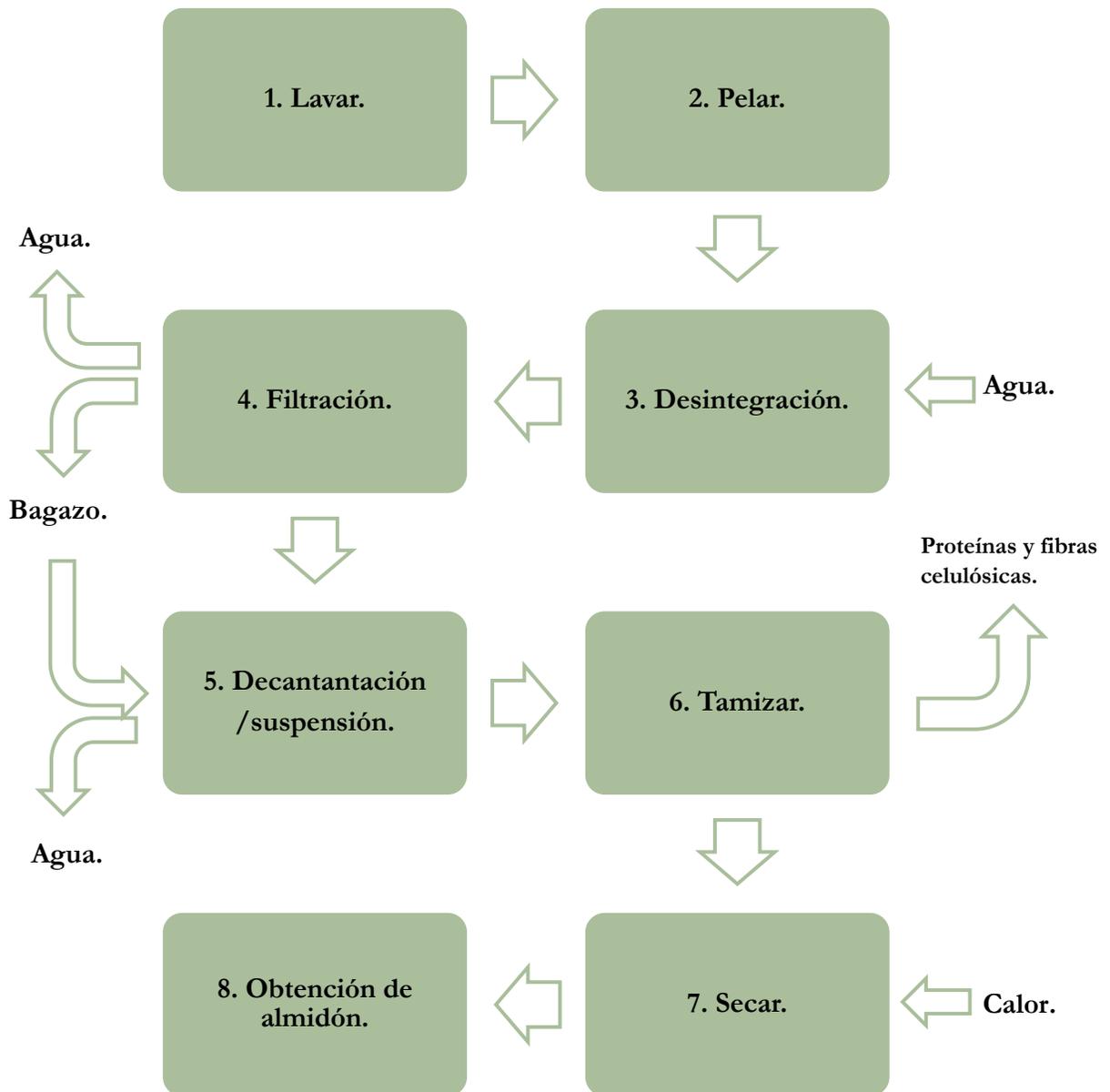


Figura 2. Proceso de extracción de almidón (Demiate *et al.*, 2023).

La extracción de almidón es un proceso discontinuo líquido-sólido con circulación de agua a favor de la corriente, (1) el lavado consiste en lavar la biomasa, así como descamación parcial o total; (2) en el segundo proceso consiste en pelar o cortar la biomasa en tozos pequeños; (3) la desintegración consiste en triturar la biomasa hasta convertirlas en pulpa; (4) la filtración consiste en separar las fibras lignocelulósicas del almidón libre con abundantes cantidades de agua; (5) la decantación consiste en la eliminación mecánica del agua mediante centrifugación, para separar contaminantes solubles del almidón; (6) el tamizado consiste en triturar y filtrar la biomasa; (7) el secado consiste en secar el almidón hasta alcanzar una humedad final del 12 al 13% de peso seco, para inhibir el crecimiento microbiano y garantizar una vida útil prolongada (Tran *et al.*, 2015). Existen muchas formas de extraer almidón de diferentes fuentes de renovables, en la Tabla 4 se muestran algunas técnicas de extracción de almidón de algunas fuentes renovables (Halal *et al.*, 2019).

**Tabla 4.** Métodos de extracción de almidón y rendimientos de almidón diferentes fuentes (Halal *et al.*, 2019).

<b>Fuente.</b>	<b>Método.</b>	<b>Redimiendo.</b>
<b>Arroz de pericarpio moreno, negro y rojo.</b>	Alcalino (0.18% NaOH)	28.5–38.6%
<b>Cebada perlada (PBS) y entera (WBS).</b>	Molienda húmeda (0.02 mol L <sup>-1</sup> C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> NaO <sub>2</sub> + 0.01 mol L <sup>-1</sup> HgCl <sub>2</sub> ).	-
<b>Trigo blando (SWS) y duro (HWS).</b>	Congelación/descongelación y extracción salina (0.4 mol L <sup>-1</sup> NaCl)	-
<b>Trigo ceroso (WW) y trigo normal (NW).</b>	Extracción con agua.	WW = 96.9% NW = 96.8%
<b>Sorgo rojo.</b>	Molienda en húmedo (0.5–1% NaOH)	54.58%
<b>Harina de centeno.</b>	Alcalina (0.5 % NaOH).	42.2%
<b>Maíz.</b>	Acido liquido + cisteína (ALS). Ácido líquido + SO <sub>2</sub> (ASS).	-
<b>Maíz azul mexicano.</b>	Molienda húmeda (NaHCO <sub>3</sub> 0.2 M)	-
<b>Granos de centeno.</b>	Método de Richter (solución de NaCl al 0.1%) Método enzimático basado en xilanasas-proteasa.	54.9–67% 95.8–97%
<b>Harina de centeno.</b>	Alcalino (0.5% NaOH). A base de pronasa (0.5 mg/g de harina).	42% 79.8–81%

## 2.8 OBTENCIÓN DE UN BIOPOLÍMEROS A BASE DE ALMIDÓN.

Para obtener polímeros a base de almidón, el almidón se debe de calentar por encima de su punto de fusión. Sin embargo, cuando el almidón se calienta; comienza a degradarse, así mismo, los gránulos de almidón se hinchan y se vuelven amorfos. Esto ocurre cuando el almidón se calienta entre 60 y 70 °C en exceso de agua, lo que provoca una máxima hinchazón granular y estallido del gránulo; este proceso ocurre en dos etapas: en primer lugar, la separación de amilosa-amilopectina resultante de la absorción de agua y el hinchamiento del gránulo del almidón, esta separación de la amilosa-amilopectina se produce cuando los enlaces de hidrógeno intermoleculares se rompen. Generalmente comienza en la región amorfa debido a la facilidad de filtración del agua que resulta en el debilitamiento de los enlaces de hidrógeno. En segundo lugar, la separación y pérdida de amilosa por lixiviación del gránulo a la solución (Ojogbo *et al.*, 2020; Zarski *et al.*, 2021).

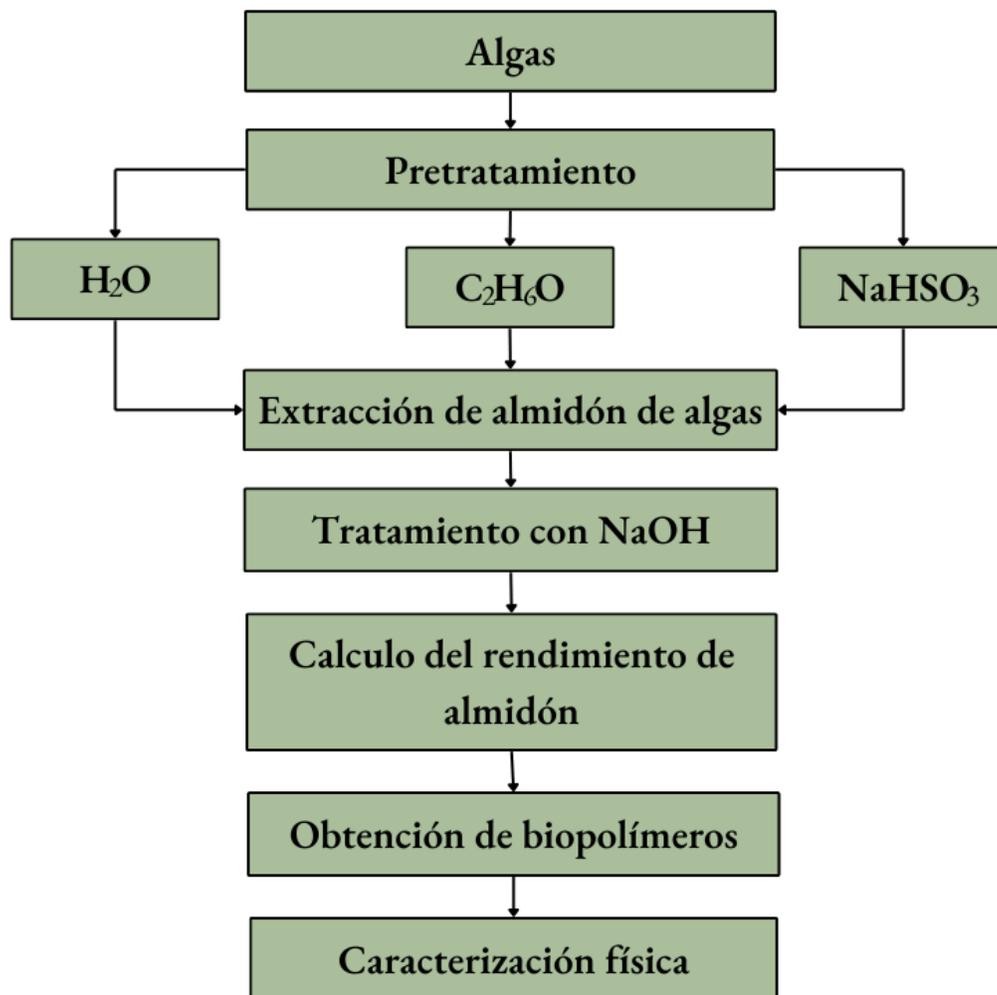
Habitualmente se añaden plastificantes al almidón para reducir el número de sitios disponibles para los enlaces de hidrógeno, hay varios plastificantes empleados para su uso con almidón, incluidos agua, polioles, sorbitol, urea, formamida y ácido cítrico, siendo el agua el plastificante más común. El almidón en su forma nativa contiene entre un 9 y un 10 % p/p de agua. Sin embargo, se requiere agua de una fuente externa para plastificar el almidón. Cuanto mayor es la concentración de agua en el almidón, menor es la temperatura de fusión. Desafortunadamente, el almidón plastificado con agua tiene propiedades mecánicas indeseables y sufre retrogradación, (Ojogbo *et al.*, 2020). En la Tabla 5 muestra la incorporación de diferentes tipos de plastificaste para la fabricación de biopolímeros de almidón (Rahmadi *et al.*, 2023).

**Tabla 5.** El tipo y concentraciones de plastificante de biopolímeros de almidón (Rahmadi *et al.*, 2023).

Tipo de almidón.	Plastificante.	Concentración
Almidón de papa.	Glicerol.	40% p/p del total de masa seca. 2, 3 y 4% (v/v) de almidón.
Almidón de maíz.	Glicerol y eritrocito.	Glicerol: Eritritol (4:0, 3:1, 2:2 y 1:3). 0.5, 0.75 y 1% (p/v) de solubilidad.
Almidón de trigo.	Glicerol.	0, 20, 30, 40 y 50% (p/p) de almidón. 33 y 50% (p/p) de base almidón.
Almidón de tapioca.	Glicerol.	0, 5, 10, 15 y 20% (p/p) de almidón

### 3 CAPITULO III: METODOLOGÍA.

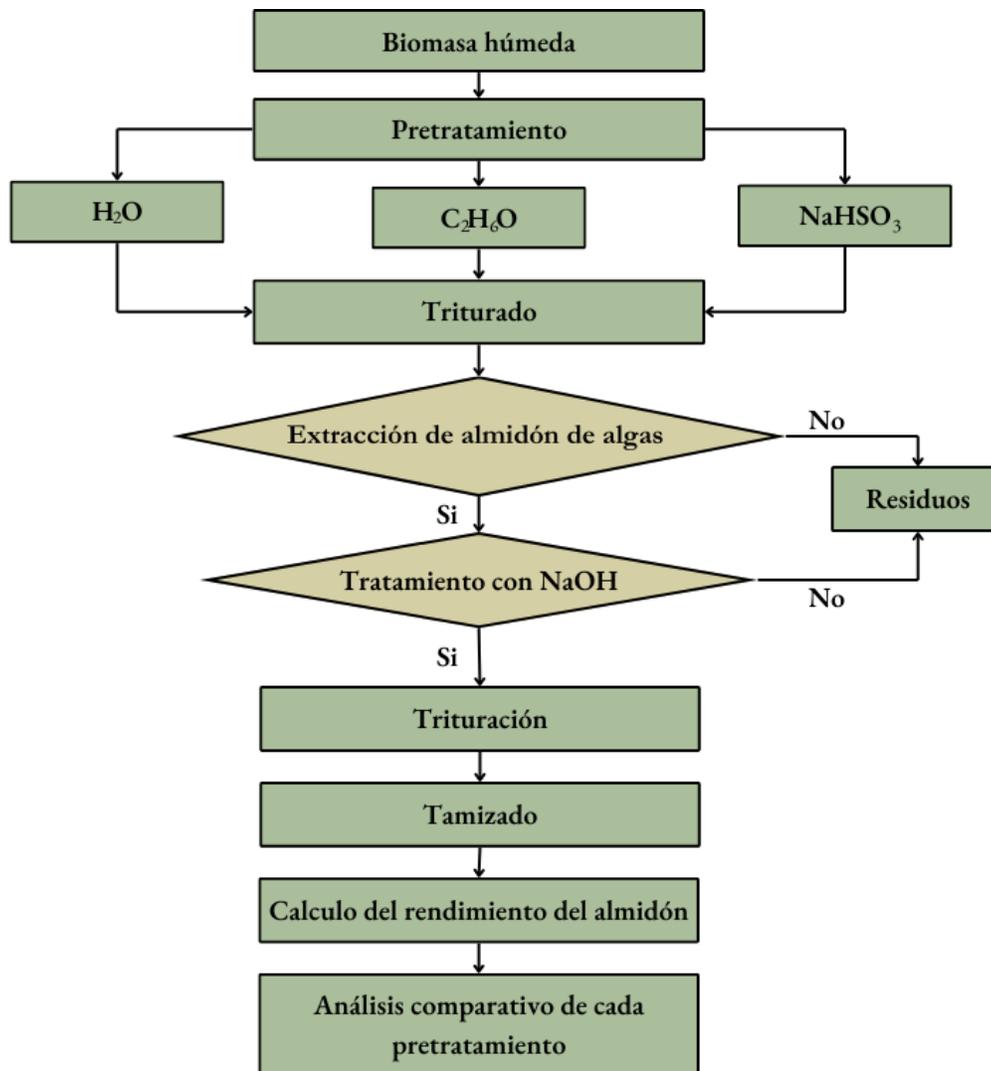
La fabricación y obtención del biopolímero a base de alga se observa en la Figura 3, las algas se pretrataron con  $C_2H_6O$  y  $NaHSO_3$  con la finalidad de debilitar y degradar las paredes celulares de la biomasa, se trituro biomasa húmeda con  $H_2O$ , así como la biomasa tratada con  $C_2H_6O$  y  $NaHSO_3$ , posteriormente se realizó la extracción de almidón. El almidón extraído se trató con  $NaOH$  para eliminar residuos como celulosa o proteínas presentes en el almidón; una vez finalizado el proceso, se determina el rendimiento de biomasa del proceso de extracción. Luego, el almidón obtenido se utilizó para la fabricación de un biopolímero; con la finalidad de estudiar sus propiedades físicas para la aplicación en el almacenamiento y producción de energía eléctrica.



**Figura 3.** Diagrama general para la obtención de un biopolímero a base de algas.

### 3.1 EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE ALGAS.

El proceso de extracción del almidón de algas se observa en la Figura 4, se utilizó algas verdes provenientes del río Grijalva para obtener almidón. Se realizaron pretratamientos previos; que consistió en suspender 100 gr de biomasa húmeda (algas) en 80% p/p de etanol absoluto (Alga-Etanol) y en 1 mol (300 ml) de NaHSO<sub>3</sub> al 0.16% p/p (Alga-NaHSO<sub>3</sub>). Se trituro biomasa húmeda con agua (Alga-Agua), así como la biomasa tratada (Alga-Etanol y Alga-NaHSO<sub>3</sub>) durante 1 minuto. Luego, se agregó el 80% p/p de etanol absoluto; y se calentó a 95°C durante 10 minutos, este proceso se realizó al triplicado. El almidón obtenido de cada proceso se trató con NaOH a 1 molar (1.2 gr de almidón de algas: 5 ml de NaOH) con la finalidad de purificar el almidón.



**Figura 4.** Diagrama de la metodología experimental de la extracción de almidón de algas empleado en este estudio.

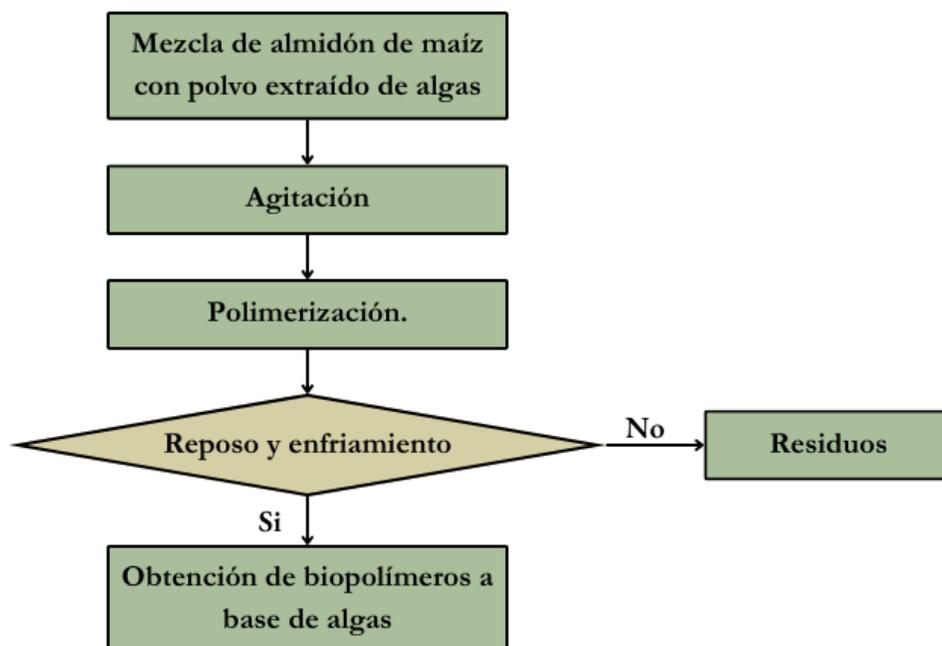
### 3.2 CÁLCULO DEL RENDIMIENTO DE POLVO EXTRAÍDO.

El rendimiento del polvo extraído (almidón) de cada proceso de extracción aplicado; se calculó con la Ecuación 1:

$$\eta = \frac{\text{Peso final del polvo extraído (gr)}}{\text{Peso inicial de la biomasa (gr)}} \quad \text{Ecuación 1}$$

### 3.3 ELABORACIÓN DEL BIOPOLÍMERO.

El proceso de fabricación de los biopolímeros se observa en la Figura 5; se fabricaron dos tipos de biopolímeros, uno a base de polvo extraído de algas; otro a base de almidón de maíz. Se peso 8 gr de almidón de maíz y 4:4 gr de almidón de maíz y de algas. El almidón pesado se calentó con el 88% p/p de agua a 60°C a 300 rpm durante 10 minutos, posteriormente se agregó 4 gr de glicerol y se agito a 360 rpm durante 15 minutos. Por último, se agregó 24 gr de la mezcla en cajas Petri y se dejó reposar en un horno a 40°C durante 48 h.



**Figura 5.** Diagrama experimental de la metodología para la fabricación de un biopolímero a base de algas.

### 3.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICA.

#### 3.4.1 Espesor.

El espesor de un biopolímero lo determina la integridad estructural del material, para determinar el espesor del biopolímero se utilizó un vernier digital (AVEDISTANTE); se cortaron biopelículas con una dimensión de 2 cm × 2 cm y se tomaron medidas en 5 partes aleatorias del biopolímero. En la Ecuación 2 se calcula el espesor promedio del biopolímero. Donde,  $\Sigma$  es la suma de los espesores y  $n$  es el número de puntos medidos.

$$\text{Espesor} = \frac{\Sigma_{\text{Espesores}}}{n} (\mu\text{m}) \quad \text{Ecuación 2}$$

#### 3.4.2 Densidad.

El estudio de la densidad del biopolímero se utiliza para comprender las variaciones en la estructura y la composición general, así como la uniformidad del material. Para estimar la densidad del biopolímero, se tiene que saber el espesor del biopolímero y la masa de este. Por tanto, se emplea la ecuación de la densidad (Ecuación 3), donde  $\rho$  es la densidad del biopolímero ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $M$  es la masa del bioplástico (g),  $A$  es el área ( $\text{cm}^2$ ) y  $h$  es el espesor de la película (cm). Este proceso se realizó al triplicado.

$$\rho = \frac{M}{A \cdot h} \left( \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

#### 3.4.3 Biodegradabilidad.

La biodegradabilidad se realizó depositando una biopelícula (2 cm × 2 cm) con un peso inicial en un recipiente; con profundidad de 7 cm que contenía tierra húmeda y se dejó reposar durante 24 h. La muestra se retiró y se limpió de las partículas adheridas. Posteriormente, se secó a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  durante 3 h y se determinó el nuevo peso. La tierra se trató con 10 ml de agua desionizada y la biopelícula se volvió a enterrar. Este proceso se llevó a cabo hasta que la muestra se biodegradó el 30% del peso inicial, la pérdida de masa del biopolímero se calculó con la Ecuación 4:

Donde:

$$\%WL = \frac{W_o - W_t}{W_o} * 100 \quad \text{Ecuación 4}$$

$W_o$ : Peso inicial.

$W_t$ : Peso final.

### 3.4.4 Contenido de humedad.

Para determinar el contenido de humedad que presenta el biopolímero, se pesó una muestra con una dimensión de 2 cm × 2 cm con el fin de conocer el peso inicial. Posteriormente, se aplicó calor a  $103 \pm 3^\circ\text{C}$  durante 3 h hasta llegar a un peso constante. El biopolímero se colocó en un desecador para enfriar y así volver a determinar el nuevo peso; esto proceso se hizo por triplicado, el contenido de humedad del material se determinó con la Ecuación 5.

Donde:

$W_1$ : Peso inicial.

$$\text{CH}\% = \left( \frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 5}$$

$W_2$ : Nuevo peso.

### 3.4.5 Absorción de agua.

Para determinar la absorción de agua, se colocó una biopelícula de 2 cm × 2 cm en un horno a  $103 \pm 3^\circ\text{C}$  durante 3 h hasta llegar a un peso constante. Posteriormente, la biopelícula se sumergió en 30 ml de agua destilada durante 5 segundos. La ganancia de peso del material se midió periódicamente cada 5 segundos después de secar la superficie de la película con un paño para eliminar el exceso de agua. La absorción de agua se determinó con la Ecuación 6.

Donde:

$W_0$ : Peso inicial.

$$\text{GA \%} = \left( \frac{W_1 - W_0}{W_0} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 6}$$

$W_1$ : Peso ganado.

### 3.4.6 Solubilidad en agua.

Para determinar la solubilidad del biopolímero, se colocó una biopelícula de 2 cm × 2 cm en un horno a  $103 \pm 3^\circ\text{C}$  durante 3 h. La biopelícula se pesó para determinar el peso seco inicial, y se colocó en 50 ml de agua destilada y se agitó a 100 rpm durante 6 h a una temperatura ambiente ( $25^\circ\text{C}$ ). Transcurrido ese tiempo, los restos de la película se filtraron y secaron a  $103 \pm 3^\circ\text{C}$  durante 3 h hasta llegar a peso constante. El porcentaje de solubilidad que presentó el biopolímero se calculó utilizando la Ecuación 7.

Donde:

$$\text{WS}\% = \frac{W_0 - W_1}{W_0} * 100 \quad \text{Ecuación 7}$$

$W_0$ : peso inicial.

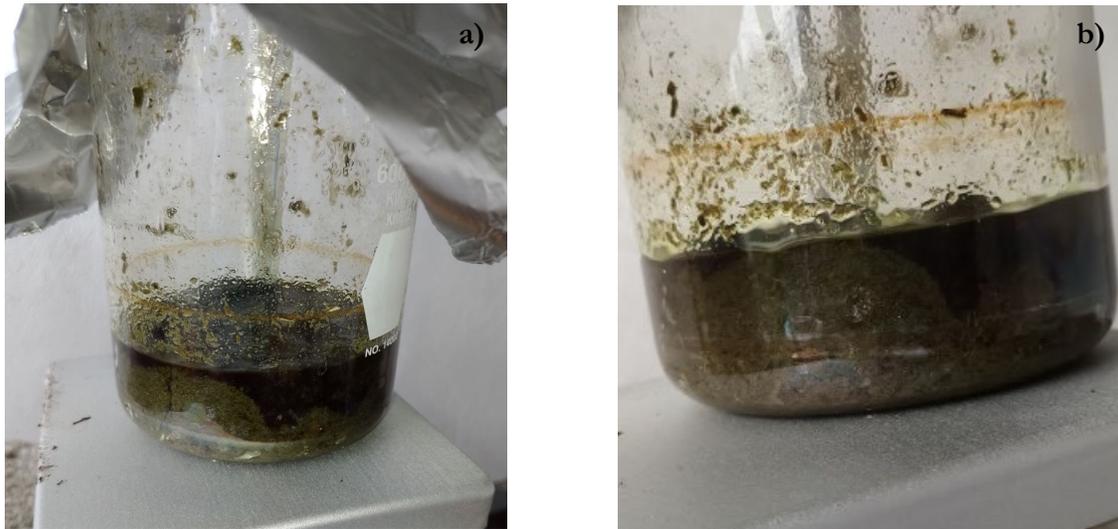
$W_1$ : peso final.

## 4 CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES.

---

### 4.1 PRETRATAMIENTO Y TRITURACIÓN DE LA BIOMASA.

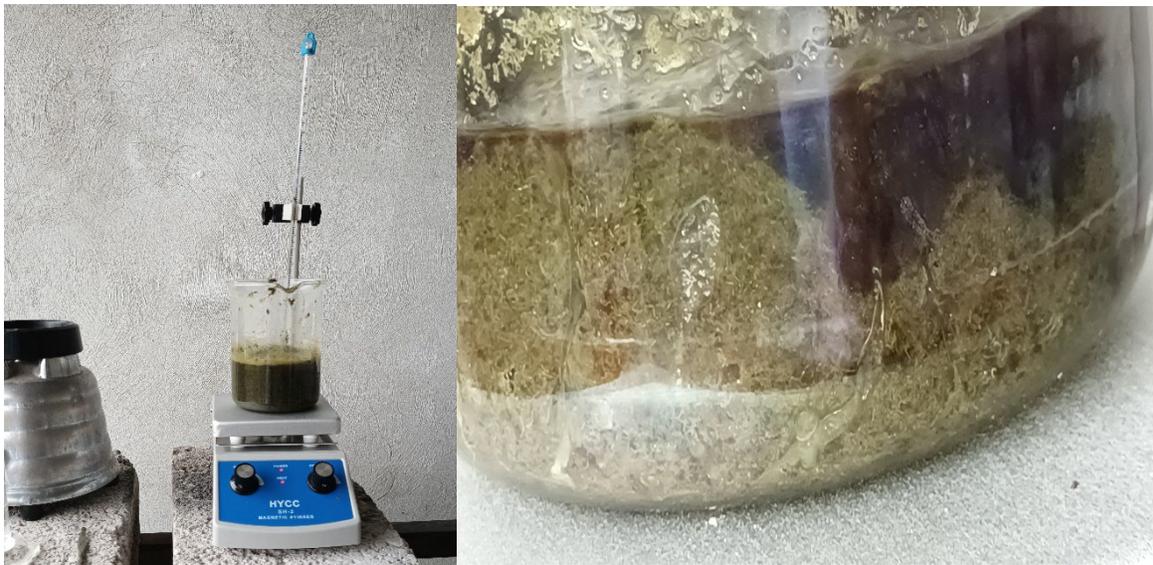
De acuerdo con la metodología, se suspendió biomasa húmeda (algas) con  $C_2H_6O$  y  $NaHSO_3$  con la finalidad de debilitar la pared celular de la biomasa. En la Figura 6 se observa que la biomasa; al estar triturada y suspendida en  $C_2H_6O$  y  $NaHSO_3$  antes de realizar la extracción de almidón, libero pigmentos de una tonalidad café verdoso oscuro. La liberación de colores de matices oscuras hacia el exterior se debe a la interacción entre los dos solventes y la clorofila presente en la pared celular de la biomasa. Tal como lo menciona Singh *et al.*, 1990 y Li *et al.*, 2016; quienes determinan que el uso de  $NaHSO_3$  y  $C_2H_6O$  en biomasa celulósica; se logra desintegrar la membrana del cloroplasto, así como los pigmentos ubicados en los tilacoides, provocando la liberación de pigmentos hacia el exterior. A su vez Li *et al.*, 2016 menciona que; la clorofila que presentan las algas es insoluble en agua, provocando que la biomasa que fue triturada con agua no causo daño alguno a la pared celular de la biomasa.



**Figura 6.** Imagen de la biomasa triturada y suspendida en  $C_2H_6O$  (a) y en  $NaHSO_3$  (b) para realizar la extracción experimental de almidón presente en las algas.

## 4.2 EXTRACCIÓN DE RECURSOS RENOVABLES.

El proceso de extracción experimental de almidón de algas se presenta en la Figura 7, se observó que en cada proceso de extracción (Alga-H<sub>2</sub>O, Alga-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O y Alga-NaHSO<sub>3</sub>); las algas liberaron aceites hacia el exterior. Vitova *et al.*, 2014 menciona que las algas almacenan proteínas, lípidos y polisacáridos por medio de la fotosíntesis durante su ciclo de crecimiento. La liberación de aceites en el proceso de extracción del almidón podría asumirse por el uso de etanol y la formación de agua durante su evaporación provocando la fragmentación de la pared celular de la biomasa; ocasionando que los lípidos almacenados se liberen sin problema. Tal como lo afirma Work *et al.*, 1972; el cual menciona que el uso de solventes polares como el etanol o metanol rompe los enlaces de hidrógeno; generando la liberación de los lípidos y proteínas presentes en la membrana celular de la biomasa.



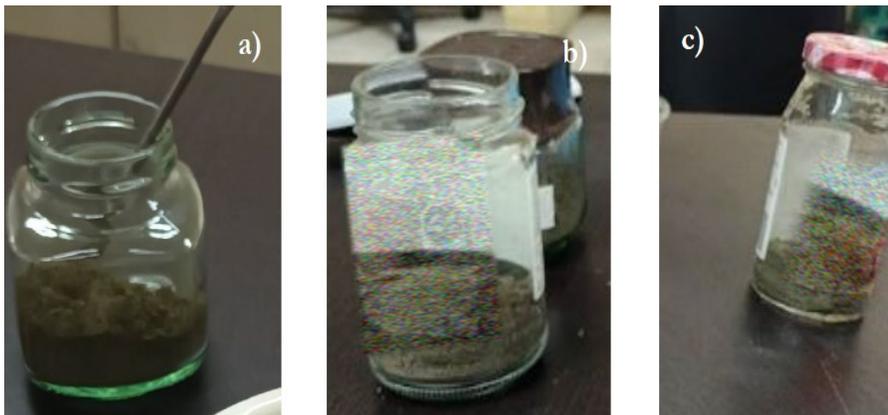
**Figura 7.** Imagen del proceso de extracción experimental de almidón de algas, se observa la liberación de lípidos durante el proceso de extracción.

### 4.3 TRATAMIENTO CON NaOH.

El polvo extraído de cada proceso (Alga-H<sub>2</sub>O, Alga-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O y Alga-NaHSO<sub>3</sub>) se trituro y tamizo (Figura 8); con la finalidad de reducir y filtrar las partículas para ser tratadas con NaOH, durante este proceso; se observó el desprendimiento de fibras celulósicas adheridas al polvo extraído. Por otro lado, en la Figura 9 se observa que el polvo extraído de algas presenta diferentes matices de verde, así como diferentes texturas, esto podría deberse al poder oxidativo que presenta cada solvente que se utilizó en la extracción, el polvo extraído del método Alga-H<sub>2</sub>O presenta un color verde oscuro en comparación con el método Alga-NaHSO<sub>3</sub> que presento un color verde claro.



**Figura 8.** Imagen del triturado y tamizado del polvo extraído de cada proceso de extracción experimental: Alga-H<sub>2</sub>O, Alga-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O y Alga-NaHSO<sub>3</sub>.



**Figura 9.** Imagen del color que presentaron cada polvo extraído: (a) Alga-H<sub>2</sub>O; (b) Alga-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O, y (c) Alga-NaHSO<sub>3</sub>.

El tratamiento con NaOH al polvo extraído de algas se observa en la Figura 10, se observó que, al suspender el polvo en NaOH; el polvo extraído se sedimentó. Al mismo tiempo, empezó a liberar pigmentos que quedaron adheridos al polvo. Por otro lado, se desprendió un ligero olor hacía el exterior. Además, algunas partículas se suspendieron en la superficie, dichas partículas lograron pasar durante el proceso de tamizado y triturado.

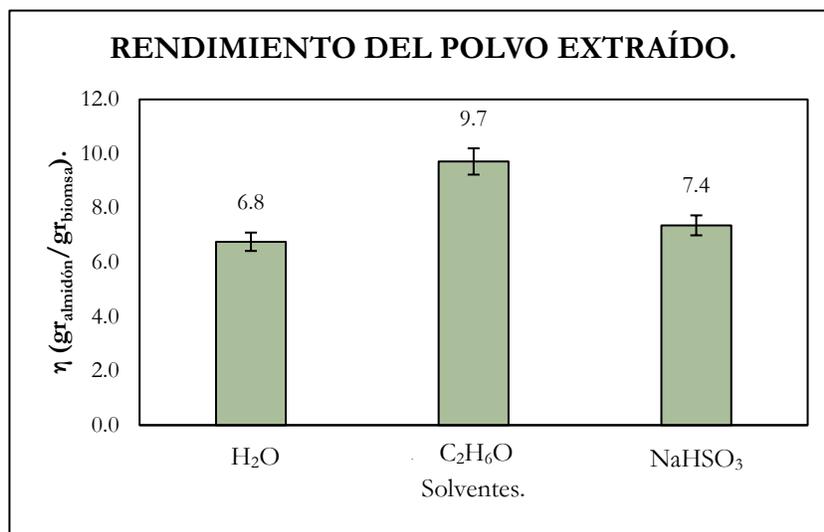
La reacción que presentó el polvo extraído de algas con el NaOH puede deberse que; el NaOH es un alkali que tiene la capacidad de limpiar y purificar el almidón. Tal como menciona Qin *et al.*, 2019; el cual determina que las soluciones alcalinas, en especial el NaOH puede ayudar en la extracción y purificación del almidón, ya que, al remojar la materia prima en NaOH, puede separar proteínas y fibras celulósicas adheridas al almidón. Por otro lado, Li *et al.*, 2016 menciona que al tratar el almidón con NaOH puede remover la clorofila presente en el almidón.



**Figura 10.** Imagen del tratamiento con NaOH para la eliminación de residuo lignocelulosicos, clorofila y proteínas adheridas al polvo extraído.

#### 4.4 COMPARACIÓN DEL CÁLCULO DEL RENDIMIENTO DEL POLVO EXTRAÍDO.

El cálculo del rendimiento del polvo extraído de algas se observa en la Figura 11, el método Alga-H<sub>2</sub>O presento un peso final de 6.8 gr, el método Alga-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O un peso de 9.7 gr y el método Alga-NaHSO<sub>3</sub> un peso final de 7.7 gr. Como se mencionó anteriormente, el etanol tiene la capacidad de degradar la clorofila. Además, de liberar lípidos y proteínas presentes en la pared celular de las algas, demostrando que puede exponer polisacáridos, proteínas y lípidos que presenta la biomasa; por tal razón, el método Alga-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O presentó un mejor rendimiento en comparación con los métodos Alga-H<sub>2</sub>O y Alga-NaHSO<sub>3</sub>.



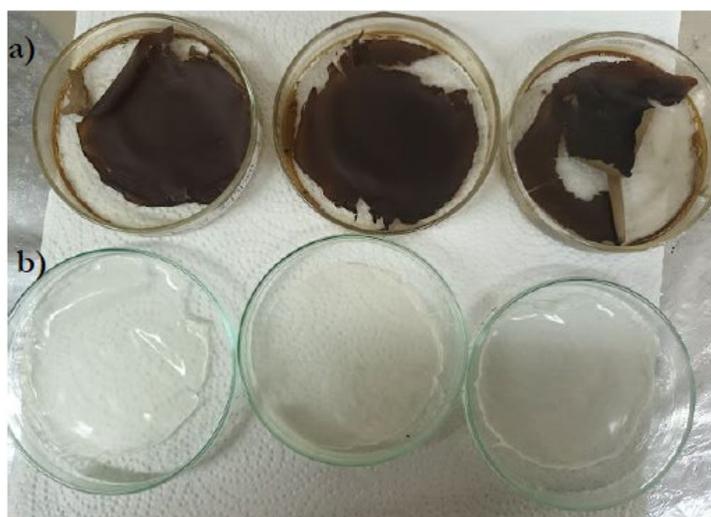
**Figura 11.** Gráfica de rendimiento del polvo extraído mediante los pretratamientos de H<sub>2</sub>O, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O y NaHSO<sub>3</sub>

Guedes *et al.*, 2021 menciona que al sumergir biomasa celulósica en etanol; ocasiona que la pared celular de la biomasa se vuelva más delgadas; provocando que las células pierdan turgencia, cambiando su forma inicial y provocando una deformación en la estructura celular. Al mismo tiempo, señala que el etanol deja agua como subproducto durante su evaporación, provocando la entrada y salida de agua de la estructura celular de la biomasa. Por tanto, estas modificaciones estructurales facilitan la entrada y salida de agua durante el proceso de extracción; provocando la formación de una estructura celular muy delgada y débil, y con ello, los polisacáridos, lípidos y proteínas queden expuestos durante el proceso de extracción, sin embargo, no puede extraer la celulosa, hemicelulosa y lignina.

Mientras tanto, el método Alga-NaHSO<sub>3</sub> presentó un mejor rendimiento que el sustrato Alga-H<sub>2</sub>O, debido que se utilizó un sulfuro como método de extracción de almidón, ya que el método Alga-H<sub>2</sub>O no presentó un debilitamiento de la pared celular de la biomasa como los métodos Alga-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O y Alga-NaHSO<sub>3</sub>; esto se logra observar con el color que presenta cada polvo extraído (Figura 9), donde cada solvente utilizado removió los pigmentos y fragmentó la pared celular de la biomasa (algas), Bicu *et al.*, 2011 menciona que el uso de NaHSO<sub>3</sub> ocasiona que la lignina y la hemicelulosa logren disolverse con mucha facilidad, así mismo, algunos componentes que acompañan a la celulosa. Sin embargo, no es tan agresiva como lo es el etanol; que tiene la capacidad de oxidar la pared celular de la biomasa.

#### 4.5 OBTENCIÓN DE BIOPOLÍMEROS.

Se obtuvieron dos tipos de biopolímeros, un biopolímero a base del polvo extraído de algas, otro a base de almidón de maíz. En la Figura 12 se observa que el biopolímero del polvo extraído de algas presentó un color verde marrón y el biopolímero de almidón de maíz presentó un color blanco opaco. En este sentido, el color que presenta el biopolímero del polvo extraído se debe por las fibras celulósicas adheridas a él, tal como lo menciona Alves *et al.*, 2020, el cual señala que la opacidad se debe a la celulosa o proteínas adheridas al almidón de algas. Por otro lado, ambos biopolímeros presentaron texturas turgentes, asimismo, son materiales flexibles, ya que ambos biopolímeros pueden doblarse sin romperse.



**Figura 12.** Imagen del biopolímero a base del polvo extraído (a) y biopolímero a base de almidón de maíz (a).

## 4.6 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS BIOPOLÍMEROS.

### 4.6.1 Espesor del biopolímero.

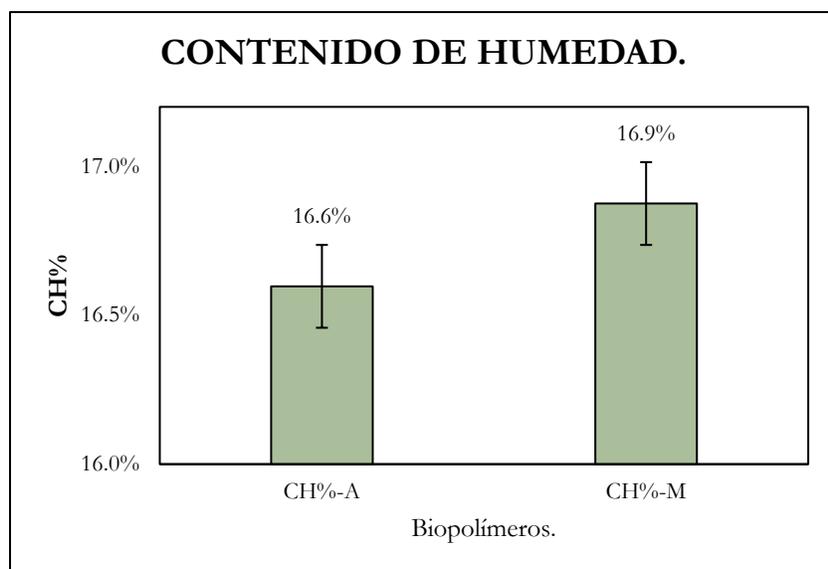
De acuerdo con la Tabla 6, el biopolímero del polvo extraído de algas presenta un espesor de 33.7  $\mu\text{m}$ , en comparación con el material de almidón de maíz, que presenta un espesor de 27.5  $\mu\text{m}$ . Rahmadi *et al.*, 2023 señala que el espesor de los biopolímeros de almidón aumenta al presentar más contenido de amilosa, ya que el alto contenido de amilosa provoca la formación de enlaces de hidrógeno fuertes y una matriz heterogénea. Por tanto, la diferencia del espesor del biopolímero a base del polvo extraído de algas se debe a la presencia de más amilosa que el biopolímero de almidón de maíz. Tal como lo afirma Ramli *et al.*, 2020; quien reporta que el contenido de amilosa y amilopectina presentes en las algas son similares que el almidón de maíz, de modo que el almidón de algas presenta un contenido de amilosa y amilopectina del 25.5% y del 74.5 %. En comparación con el almidón de maíz, cuyo contenido de amilosa es de 23 % y de amilopectina es de 77 %.

**Tabla 6.** Parámetros obtenidos de los biopolímeros a base de alga y almidón de maíz.

Muestra.	Peso (mg).	Espesor ( $\mu\text{m}$ ).	Volumen ( $\text{mm}^3$ ).
B-Alga.	153.7	33.7	134.7
B-Maíz.	131.5	27.5	109.9

### 4.6.2 Contenido de humedad.

El análisis del contenido de humedad (CH) en los biopolímeros de almidón de maíz y del polvo extraído de algas se presentan en la Figura 13; se observa que el biopolímero a base de almidón de maíz presenta más humedad que el material a base del polvo extraído de algas. El biopolímero de almidón de maíz presenta un contenido de humedad del 16.9 % en comparación con el material a base del polvo, que presenta un contenido de humedad del 16.6 %. El contenido de humedad en los biopolímeros se debe al acoplamiento entre el glicerol y el almidón. Tal como lo menciona Aboitbina *et al.*, 2021; cual establece que, al presentar más contenido de humedad en un biopolímero, se debe a un excelente acoplamiento entre el almidón y el glicerol, provocando la formación de una matriz homogénea, ocasionando una retención de humedad en el biopolímero.

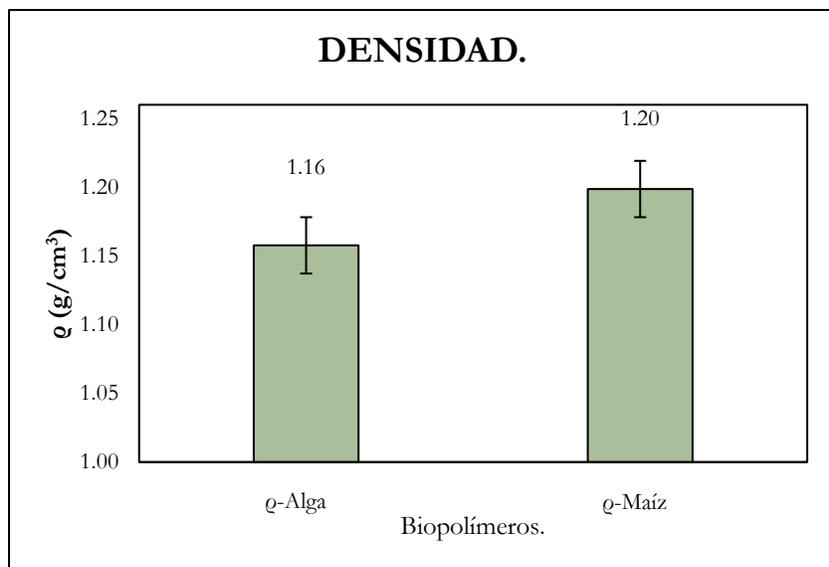


**Figura 13.** Comparación del contenido de humedad de los biopolímeros a base de algas (CH%-A) y almidón de maíz (CH%-M).

El contenido de humedad que presenta el biopolímero de almidón de maíz se debe al contenido de amilopectina que presenta el almidón de maíz, como menciona Ramli *et al.*, 2020. Provocando un excelente acoplamiento con el glicerol durante el proceso de polimerización. Tal como lo afirma Rahmadi *et al.*, 2023, cual menciona que al presentar más amilosa; provoca la formación de una estructura heterogénea, por otro lado, al presentar un alto contenido de amilopectina se forma una estructura homogénea. Al mismo tiempo, Aboitbina *et al.*, 2021 expresa que el uso de plastificantes solubles pueden bloquear los huecos en la matriz del almidón; ocasionado la retención de agua durante su secado. Por otro lado, Shahabi *et al.*, 2019 menciona que al tener más o menos contenido de humedad, las propiedades del biopolímero cambian. En este sentido, al tener más contenido de humedad se presenta una resistencia a la solubilidad del agua y una resistencia en la tensión de ruptura, por otro lado, al presentar menos contenido de humedad, los biopolímeros son más propensos a solubilizarse y biodegradarse con más facilidad.

#### 4.6.3 Densidad.

La densidad de los biopolímeros de almidón de maíz y del polvo extraído de algas se puede observar en la Figura 14, donde, el biopolímero de almidón de maíz presentó una densidad de 1.2 g/cm<sup>3</sup>. Por otro lado, el biopolímero del polvo extraído de algas presentó una densidad de 1.16 g/cm<sup>3</sup>. La diferencia de densidad de ambos biopolímeros podría deberse por el contenido de amilosa presente.



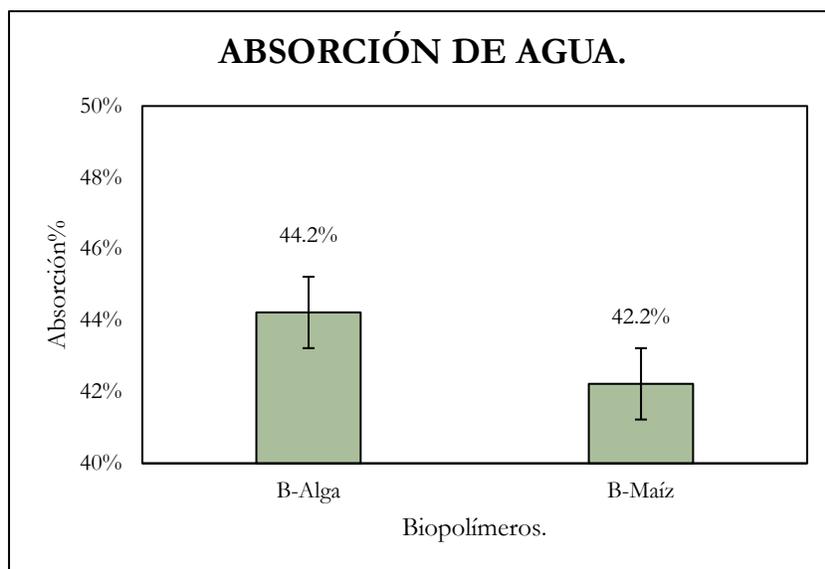
**Figura 14.** Comparación de las densidades de los biopolímeros a base del polvo extraído de las algas ( $\rho$ -Alga) y almidón de maíz ( $\rho$ -Maíz).

Tal como lo afirma Ibrahim *et al.*, 2020; quien menciona que la densidad de los biopolímeros está determinada por la porosidad. Es decir, se forma una superficie heterogénea y con ello se forman materiales de baja densidad. De modo que; el biopolímero a base de algas presenta una matriz más porosa que el biopolímero de almidón de maíz; provocando que sea menos denso que el biopolímero de almidón de maíz.

Los materiales porosos son excelentes candidatos para aplicaciones energéticas, como el almacenamiento y conversión de energía. Por ejemplo, Hoseini *et al.*, 2023 menciona que los materiales porosos son cruciales en las celdas de combustión, debido que los ánodos y cátodos de las celdas deben ser extremadamente porosos para permitir la difusión de los combustibles y productos químicos producidos con el fin de aumentar la densidad de la corriente eléctrica y la eficiencia de conversión. Otras aplicaciones de materiales porosos incluyen electrodos en supercondensadores y baterías, ya que pueden mejorar la transferencia de carga en el contacto electrodo/electrolito, minimizar la difusión de iones y adaptar el voltaje durante el ciclo de carga y descarga.

#### 4.6.4 Absorción de agua.

Los resultados de la absorción de los biopolímeros de almidón de maíz y algas se observan en la Figura 15, donde el biopolímero a base de algas presentó mayor absorción que el material de almidón de maíz. El biopolímero a base de algas presento una absorción del 44.2%, en comparación con el biopolímero de almidón maíz que presento una absorción del 42.2%.

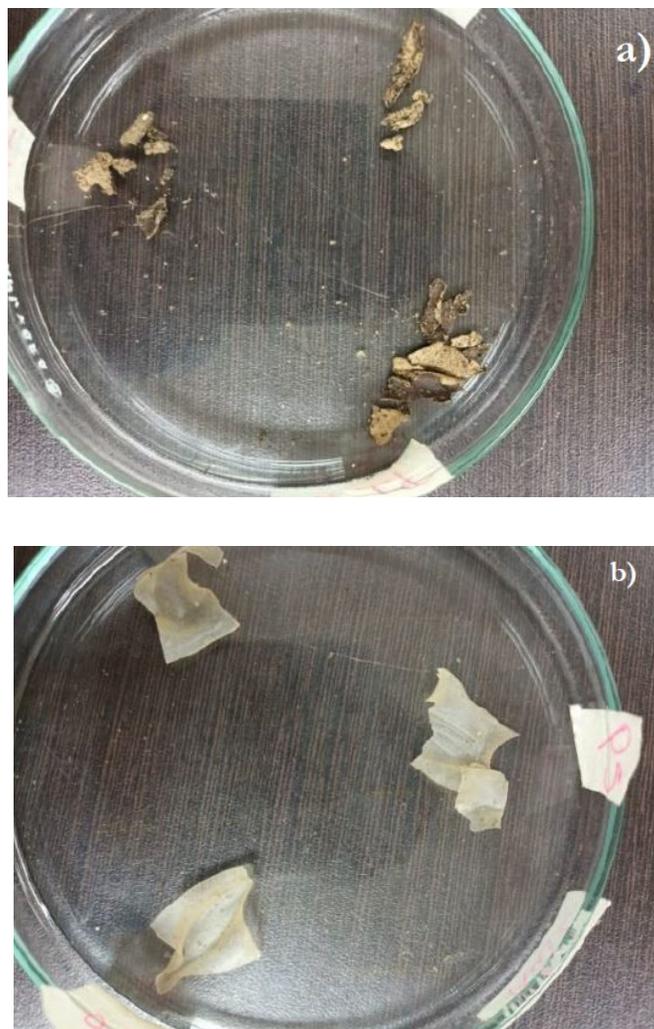


**Figura 15.** Comparación de la absorción de agua de los biopolímeros a base de algas (B-Algas) y almidón de maíz (B-Maíz).

La baja absorción de agua por parte del biopolímero de almidón de maíz se debe al acoplamiento entre el glicerol y almidón. Tal como lo menciona Abreu *et al.*, 2023 el cual menciona que los granulos de almidón de maíz se solubilizan mejor que el “almidón” de las algas. Por otro lado, Abotbina *et al.*, 2021 menciona que el uso de plastificantes solubles pueden bloquear los microhuecos en la matriz del biopolímero durante el proceso de polimerización, provocando una disminución en la absorción de agua, llegando a formar una superficie homogénea. Por otro lado, Ramli *et al.*, 2020 señala que el tamaño de los granulos de almidón afecta gradualmente las propiedades del biopolímero, ya que; cuanto más pequeño sea el tamaño de los granulos de almidón; presentara mayor absorbancia de agua.

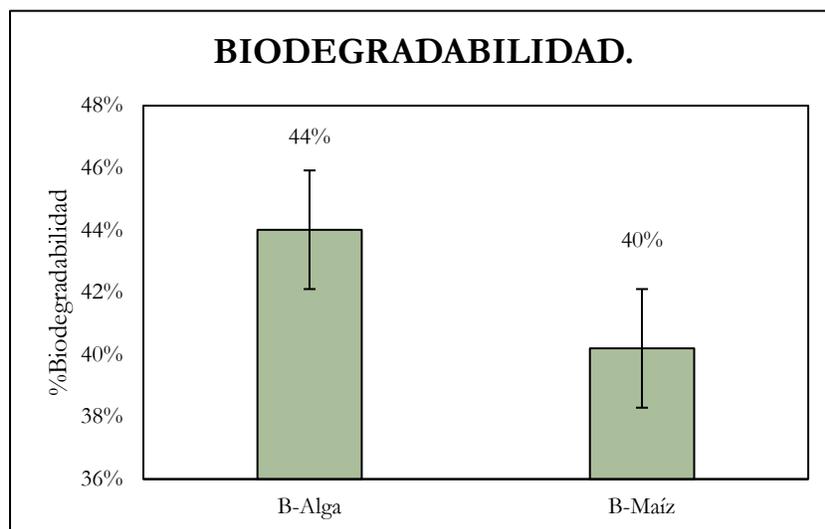
#### 4.6.5 Biodegradación.

El resultado de la actividad microbiana en los biopolímeros del polvo extraído de algas y de almidón de maíz se observa en la Figura 16. El biopolímero a base del polvo extraído de algas se biodegrado aproximadamente el 40% de su peso inicial que el biopolímero de almidón de maíz (Figura 17), esto podría deberse al alto contenido de amilosa amorfa y su estructura porosa. Tal como afirma Malekzadeh *et al.*, 2023, cual señala que la biodegradabilidad de los biopolímeros de almidón está influenciada por la cristalinidad, ya que los microorganismos prefieren atacar los dominios amorfos de la amilosa, debido a que las regiones amorfas están poco empaquetadas, por lo que son más susceptibles a la degradación.



**Figura 16.** Resultados de la prueba de biodegradación de los biopolímeros a base de algas (a) y almidón de maíz (b) al estar en tierra húmeda al transcurrir 24 h.

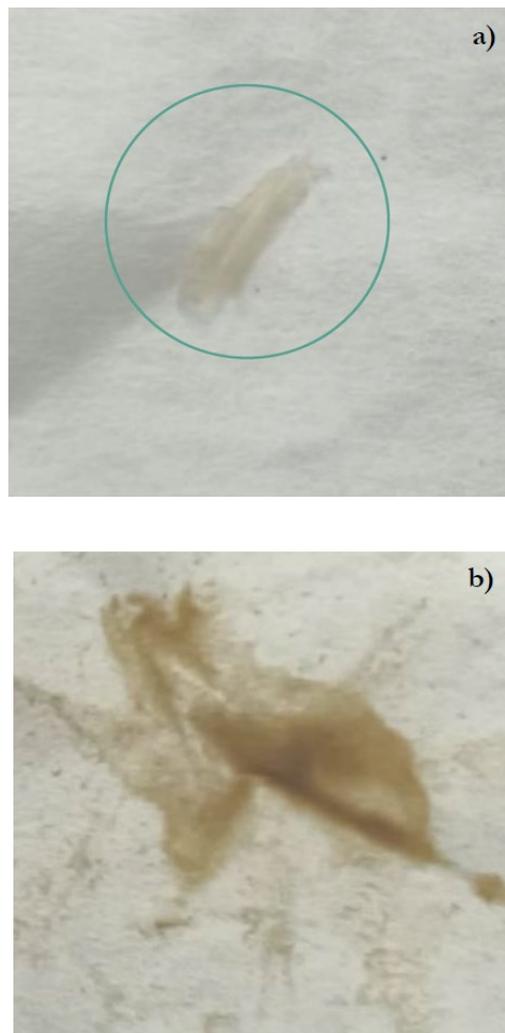
El biopolímero del polvo extraído de algas y de almidón de maíz perdieron más de 40% de su peso original al transcurrir 24 horas. En la Figura 17 se observa el porcentaje de biodegradación de los dos materiales, donde el biopolímero a base del polvo extraído de algas perdió el 44% de su peso original, en comparación con el material de almidón de maíz; que perdió el 40%. Kögel-Knabner, 2002 señala que la fácil despolimerización de los biopolímeros de almidón es debido que los enlaces  $\alpha$ -glucosídicos son relativamente débiles, por lo tanto la actividad microbiana es capaz de producir enzimas para despolimerizar las cadenas de los biopolímeros, Ahsan *et al.*, 2023 mencionan que el almidón es biodegradado principalmente por hidrolasas glucosídicos, que son un grupo de enzimas que hidrolizan de enlaces glicosídicos, que prefieren a tacar las regiones amorfas del almidón. Asu vez, Haslam, 2004 concluyó que las tasas de biodegradación del almidón suelen seguir una curva asintótica y que una gran fracción del almidón ya se degrada dentro de los 3 días posteriores a su entrada al suelo.



**Figura 17.** Comparación de la biodegradabilidad de los biopolímeros a base de algas (B-Algas) y almidón de maíz (B-Maíz) al transcurrir 24 h.

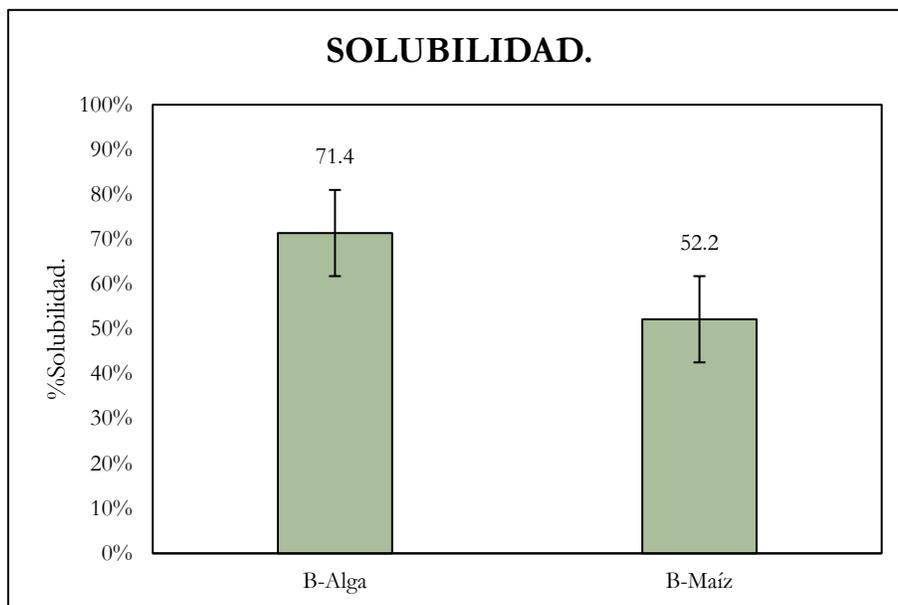
#### 4.6.6 Solubilidad.

Los resultados de la solubilidad del biopolímero de almidón de maíz y a base del polvo extraído de algas se observan en la Figura 18. El biopolímero a base del polvo extraído de algas se solubilizo más que el biopolímero de almidón de maíz. Este suceso se debe al contenido de amilopectina y amilosa presentes en el material. Dome *et al.*, 2020 y Thakur *et al.*, 2019 mencionan que; al presentar una estructura cristalina por parte de la amilopectina, provoca que los biopolímeros presenten resistencia a la solubilidad en el agua.



**Figura 18.** Resultados de la prueba de solubilidad de los biopolímeros de almidón de maíz (a) y a base de alga (b) al estar en agitación constante durante 6 h.

El índice de solubilidad en agua de los biopolímeros se observa en la Figura 19, el biopolímero de almidón de maíz presento una solubilidad del 52.2 %, en comparación con el biopolímero a base del polvo extraído de algas; que presento una solubilidad del 71.4%. La alta tasa de solubilidad del biopolímero del polvo extraído de algas se debe principalmente por la concentración de amilosa y amilopectina que presenta la estructura de ambos materiales, como se mencionó anteriormente. Tarique *et al.*, 2021 menciona que el alto índice de solubilidad de los biopolímeros de almidón se debe al presentar más amilosa en su estructura, debido a sus débiles enlaces glucosídicos, provocando una fácil solubilidad del material por parte de la amilosa.

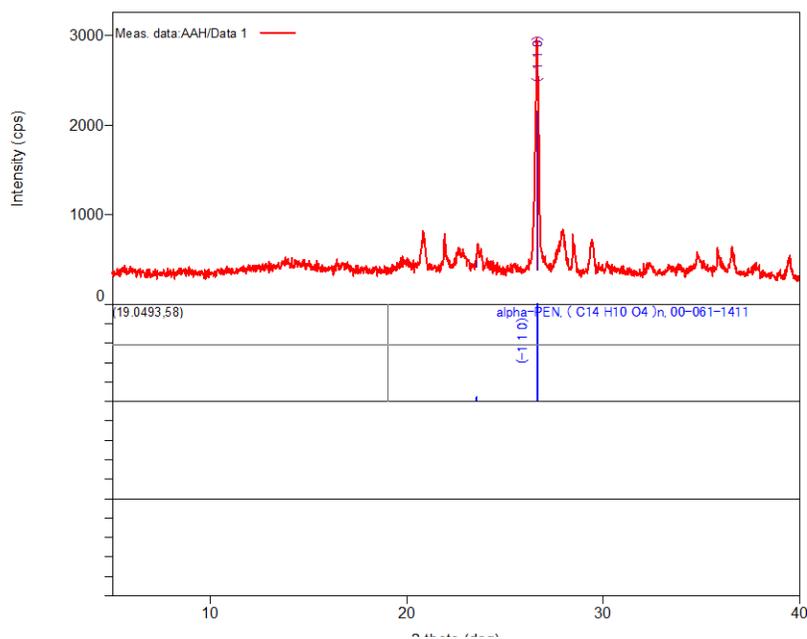


**Figura 19.** Comparación de la solubilidad en agua de los biopolímeros de almidón de maíz (B-Maíz) y del biopolímero a base de algas (B-Algas) al estar en agitación constante durante 6 h.

## 4.7 CARACTERIZACIÓN DEL POLVO EXTRAÍDO CON RAYOS X.

El polvo extraído de algas se caracterizó con Rayos X; con la finalidad de observar impureza que no se removieron durante el tratamiento de NaOH. En la Figura 20 se observa que se detectó peróxido de benzoílo ( $C_{14}H_{10}O_4$ ) en el polvo extraído, al presentar un pico que resalta de las demás lecturas. La aparición del  $C_{14}H_{10}O_4$  en el polvo podría deberse a la liberación de lípidos o proteínas durante el proceso de extracción experimental de almidón, provocando que dichos compuestos se adhieran al almidón (Guedes *et al.*, 2021).

Balcerczyk *et al.*, 2019 menciona que los organismos de la familia de las eucariotas almacenan benzoil-CoA durante la síntesis de los lípidos. Por tanto, este lípido se liberó durante el proceso de extracción, debido a que el etanol degrada y destruye la pared celular de la biomasa. El  $C_{14}H_{10}O_4$  es un compuesto que se utiliza como catalizador para la producción de biopolímeros. Tal como lo afirma Guyo *et al.*, 2017; cual menciona que sintetizó un biopolímero de rastrojo de maíz-g-metacrilato de metilo (MS-g-MMA) mediante polimerización de radicales libre, utilizando un indicador de peróxido de benzoílo. Asimismo, se utilizó para la formación de materiales porosos (Yamago *et al.*, 2012).



**Figura 20.** Rayos X al polvo extraído de las algas.

## 5 CAPITULO V: CONCLUSIÓN.

---

Con base en los resultados obtenidos, se observó que, en términos de rendimiento del polvo extraído de las algas, el método Alga-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O fue el método que presento mayor eficiencia, el cual fue de 9.7 gr. En comparación con los métodos Alga-H<sub>2</sub>O y Alga-NaHSO<sub>3</sub>, donde se obtuvo un rendimiento de extracción de almidón de 6.8 gr y 7.4 gr respectivamente. Por tanto, se determinó que el método Alga-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O es viable, debido que tiene la capacidad de oxidar la pared celular de la biomasa, provocado una exposición de un precursor; para la formación de un producto de interés (peróxido de benzoílo) para la formación del biopolímero.

La elaboración de los biopolímeros de almidón maíz y del polvo extraído de las algas se llevó a cabo con el propósito de comparar ambos materiales. Sin embargo, presentan diferencias en sus propiedades físicas. El biopolímero de almidón de algas presenta una estructura más heterogénea y con mayor espesor y menor densidad que el biopolímero de almidón de maíz, Lo que se puede atribuir según la literatura, al compuesto de peróxido de benzoílo; ocasionado que el biopolímero de almidón de algas presente una estructura más porosa que el biopolímero de almidón de maíz, ya que el peróxido de benzoílo es un catalizador que se utiliza para la formación de polímeros porosos; provocando que el biopolímero de algas presente alta solubilidad, absorbancia y biodegradabilidad y bajo contenido de humedad comparado con el biopolímero de almidón de maíz.

Finalmente, el biopolímero de almidón de algas presenta una estructura más heterogénea que el almidón de maíz, lo convierte en un material de interés para su aplicación en dispositivos de almacenamiento y conversión de energía. Por lo tanto, en este trabajo se propone al biopolímero a base de algas como un candidato para aplicaciones en celdas de combustión, electrodos, electrolitos biopoliméricos y celdas solares sensibilizadas por colorantes (DSSC).

## 6 ABREVIATURAS.

---

- **1,3-BPG:** 1,3-bifosfoglicerato
- **3-PGA:** 3-fosfoglicerato.
- **ADP-Glc:** Adenosín difosfato-glucosa.
- **ATP:** Adenosín trifosfato o trifosfato de adenosina.
- **CMC:** carboximetilcelulosa.
- **DBE:** Enzima desramificadora.
- **F6P:** fructosa-6-fosfato.
- **G3P:** gliceraldehído 3-fosfato.
- **GBSS:** Almidón sintasa unido a gránulos.
- **Glc-1,6-P:** glucosa-1,6-fosfato.
- **GPI:** fosfoglucosa isomerasa.
- **HEC:** Hidroxietilcelulosa.
- **HPC:** hidroxipropilcelulosa.
- **NADPH:** Nicotinamida adenina dinucleótido fosfato.
- **PBAT:** Poli (Butilén Adipato-co-Tereftalato).
- **PBS:** poli(butilensuccinato).
- **PEG:** polietilenglicol.
- **PEO:** Polioxido de etileno.
- **PGM.** Fosfoglucomutasa.
- **PHA:** polihidroxialcanoato.
- **PLA:** ácido láctico.
- **PLC:** policaprolactona.
- **PVA:** Alcohol de polivinilo.
- **RuBP:** ribulosa-1,5-bisfosfato.
- **Rubisco:** RuBP carboxilasa/oxigenasa.
- **SBE:** Enzima ramificadora de almidón.
- **SSS:** Almidón sintasa soluble.
- **TFA:** ácido trifluoroáctico.

## BIBLIOGRAFÍA.

---

- Abotbina, W., Sapuan, S. M., Sultan, M. T. H., Alkbir, M. F. M., & Ilyas, R. A. (2021). Development and characterization of cornstarch-based bioplastics packaging film using a combination of different plasticizers. *Polymers*, *13*(20). doi: 10.3390/polym13203487
- Abreu, J. K., Pereira, L. C., & da Silva, J. I. S. (2023). Comparative Study of Properties of Biopolymers from Corn Starch with Addition of Microalgae *Spirulina platensis*. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, *16*(1), 29–43. doi: 10.3844/ajeassp.2023.29.43
- Ahsan, W. A., Hussain, A., Lin, C., & Nguyen, M. K. (2023). Biodegradation of Different Types of Bioplastics through Composting—A Recent Trend in Green Recycling. In *Catalysts* (Vol. 13, Issue 2). MDPI. doi: 10.3390/catal13020294
- Alday, P. P., Barros, S. C., Alves, R., Esperança, J. M. S. S., Navarro-Segarra, M., Sabaté, N., Silva, M. M., & Esquivel, J. P. (2020). Biopolymer Electrolyte Membranes (BioPEMs) for Sustainable Primary Redox Batteries. *Advanced Sustainable Systems*, *4*(2). doi: 10.1002/adsu.201900110
- Appiah, E. S., Dzikunu, P., Mahadeen, N., Among, D. N., Mensah-Darkwa, K., Kumar, A., Gupta, R. K., & Adom-Asamoah, M. (2022). Biopolymers-Derived Materials for Supercapacitors: Recent Trends, Challenges, and Future Prospects. In *Molecules* (Vol. 27, Issue 19). MDPI. doi: 10.3390/molecules27196556
- Arrieta, A. A., Nuñez de la Rosa, Y., & Palencia, M. (2023). Electrochemistry Study of Bio-Based Composite Biopolymer Electrolyte—Starch/Cardol. *Polymers*, *15*(9). doi: 10.3390/polym15091994
- Arun, J., Shri, S., Swetha, A., Panchamoorthy, K., Basha, S., Brindhadevi, K., & Pugazhendhi, A. (2022). Bio-based algal (*Chlorella vulgaris*) refinery on de-oiled algae biomass cake: A study on biopolymer and biodiesel production. *Science of the Total Environment*, *816*, 151579. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151579
- Ashter, S. A. (2016a). Introduction. In *Introduction to Bioplastics Engineering* (Vol. 1, pp. 1–17). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-323-39396-6.00001-4
- Ashter, S. A. (2016b). Overview of Biodegradable Polymers. *Introduction to Bioplastics Engineering*, *1*, 19–30. doi: 10.1016/B978-0-323-39396-6.00002-6

- Aswathi Mohan, A., Robert Antony, A., Greeshma, K., Yun, J. H., Ramanan, R., & Kim, H. S. (2022). Algal biopolymers as sustainable resources for a net-zero carbon bioeconomy. *Bioresource Technology*, 344(PB), 126397. doi: 10.1016/j.biortech.2021.126397
- Azeem, M., Batool, F., Iqbal, N., & Ikram-ul-Haq. (2017). Algal-Based Biopolymers. In *Algae Based Polymers, Blends, and Composites: Chemistry, Biotechnology and Materials Science* (pp. 1–31). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-812360-7.00001-X
- Bashir, K., & Aggarwal, M. (2019). Physicochemical, structural and functional properties of native and irradiated starch: a review. In *Journal of Food Science and Technology* (Vol. 56, Issue 2, pp. 513–523). Springer. doi: 10.1007/s13197-018-3530-2
- Bharti, V., Singh, P. K., & Sharma, J. P. (2021). Development of polymer electrolyte membranes based on biodegradable polymer. *Materials Today: Proceedings*, 34, 856–862. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.463>
- Bicu, I., & Mustata, F. (2011). Cellulose extraction from orange peel using sulfite digestion reagents. *Bioresource Technology*, 102(21), 10013–10019. doi: 10.1016/j.biortech.2011.08.041
- Colussi, R., Nascimento, L., & Singh, J. (2021). *Potential Use of Starch from Different Sources in The Preparation of Mucoadhesive Films*. 13, 1–9.
- Dall'Asta, V., Berbenni, V., Mustarelli, P., Ravelli, D., Samorì, C., & Quartarone, E. (2017). A biomass-derived polyhydroxyalkanoate biopolymer as safe and environmental-friendly skeleton in highly efficient gel electrolytes for lithium batteries. *Electrochimica Acta*, 247, 63–70. doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.07.005>
- Demiante, I. M., Bet, C. D., Ito, V. C., & Lacerda, L. G. (2023). Chapter 7 - Laboratory methods for starch extraction. In M. Pascoli Cereda & O. François Vilpoux (Eds.), *Starchy Crops Morphology, Extraction, Properties and Applications* (pp. 165–187). Academic Press. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90058-4.00012-8>
- Dome, K., Podgorbunskikh, E., Bychkov, A., & Lomovsky, O. (2020). Changes in the crystallinity degree of starch having different types of crystal structure after mechanical pretreatment. *Polymers*, 12(3). doi: 10.3390/polym12030641

- El Halal, S. L. M., Kringel, D. H., Zavareze, E. da R., & Dias, A. R. G. (2019). Methods for Extracting Cereal Starches from Different Sources: A Review. *In Starch/Staerke* (Vol. 71, Issues 11–12). Wiley-VCH Verlag. doi: 10.1002/star.201900128
- Fabra, M. J., Martínez-Sanz, M., Gómez-Mascaraque, L. G., Gavara, R., & López-Rubio, A. (2018). Structural and physicochemical characterization of thermoplastic corn starch films containing microalgae. *Carbohydrate Polymers*, 186, 184–191. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.01.039>
- Gamage, A., Liyanapathirana, A., Manamperi, A., Gunathilake, C., Mani, S., Merah, O., & Madhujith, T. (2022). Applications of Starch Biopolymers for a Sustainable Modern Agriculture. *In Sustainability (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 10). MDPI. doi: 10.3390/su14106085
- Garcia-Pichel, F., & Belnap, J. (2021). 7 - Cyanobacteria and algae. In T. J. Gentry, J. J. Fuhrmann, & D. A. Zuberer (Eds.), *Principles and Applications of Soil Microbiology* (Third Edition) (Third Edition, pp. 171–189). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820202-9.00007-1>
- González-Prolongo. (1997). *Propiedades químicas y físicas de polímeros*.
- Gopinath, G., Ayyasamy, S., Shanmugaraj, P., Swaminathan, R., Subbiah, K., & Kandasamy, S. (2023). Effects of biopolymers in energy storage applications: A state-of-the-art review. *Journal of Energy Storage*, 70, 108065. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108065>
- Guedes, J. S., Santos, K. C., Castanha, N., Rojas, M. L., Matta Junior, M. D., Lima, D. C., & Augusto, P. E. D. (2021). Structural modification on potato tissue and starch using ethanol pre-treatment and drying process. *Food Structure*, 29. doi: 10.1016/j.foostr.2021.100202
- Guo, L. Q., Tao, J., Zhu, L. Q., Xiao, H., Gao, W. T., Yu, F., & Fu, Y. M. (2018). Starch-based biopolymer electrolyte gated oxide synaptic transistors. *Organic Electronics*, 61, 312–317. doi: <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2018.06.009>
- Guyo, U., Matewere, N., Matina, K., Nharingo, T., & Moyo, M. (2017). Fabrication of a sustainable maize stover-graft-methyl methacrylate biopolymer for remediation of methyl red contaminated wastewaters. *Sustainable Materials and Technologies*, 13, 9–17. doi: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.05.001>

- Hadad, S., Hamrahjoo, M., Dehghani, E., Salami-Kalajahi, M., Eliseeva, S. N., Moghaddam, A. R., & Roghani-Mamaqani, H. (2022). Starch acetate and carboxymethyl starch as green and sustainable polymer electrolytes for high performance lithium ion batteries. *Applied Energy*, *324*, 119767. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119767>
- Haslam, M. (2004). The decomposition of starch grains in soils: implications for archaeological residue analyses. *Journal of Archaeological Science*, *31*(12), 1715–1734. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2004.05.006>
- Hassan, M. E., Bai, J., & Dou, D. Q. (2019). Biopolymers; Definition, classification and applications. In *Egyptian Journal of Chemistry* (Vol. 62, Issue 9, pp. 1725–1737). NIDOC (Nat.Inform.Document.Centre). doi: 10.21608/EJCHEM.2019.6967.1580
- Hoseini, S. S., Seyedkanani, A., Najafi, G., Sasmito, A. P., & Akbarzadeh, A. (2023). Multiscale architected porous materials for renewable energy conversion and storage. *Energy Storage Materials*, *59*, 102768. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2023.102768>
- Huang, L., Tan, H., Zhang, C., Li, Q., & Liu, Q. (2021). Starch biosynthesis in cereal endosperms: An updated review over the last decade. *Plant Communications*, *2*(5), 100237. doi: <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2021.100237>
- Ibrahim, M. I. J., Sapuan, S. M., Zainudin, E. S., & Zuhri, M. Y. M. (2020). Preparation and characterization of cornhusk/sugar palm fiber reinforced Cornstarch-based hybrid composites. *Journal of Materials Research and Technology*, *9*(1), 200–211. doi: 10.1016/j.jmrt.2019.10.045
- Ibrahim, M., Salman, M., Kamal, S., Rehman, S., Razzaq, A., & Akash, S. H. (2017). Algae-Based Biologically Active Compounds. In *Algae Based Polymers, Blends, and Composites: Chemistry, Biotechnology and Materials Science* (pp. 155–271). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-812360-7.00006-9
- Jaiswal, L., Shankar, S., & Rhim, J.-W. (2019). Chapter 3 - Applications of nanotechnology in food microbiology. In V. Gurtler, A. S. Ball, & S. Soni (Eds.), *Nanotechnology* (Vol. 46, pp. 43–60). Academic Press. doi: <https://doi.org/10.1016/bs.mim.2019.03.002>
- Jha, A., & Kumar, A. (2019). Biobased technologies for the efficient extraction of biopolymers from waste biomass. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, *42*(12), 1893–1901. doi: 10.1007/s00449-019-02199-2

- Kasturi, P. R., Ramasamy, H., Meyrick, D., Sung Lee, Y., & Kalai Selvan, R. (2019). Preparation of starch-based porous carbon electrode and biopolymer electrolyte for all solid-state electric double layer capacitor. *Journal of Colloid and Interface Science*, *554*, 142–156. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.06.081>
- Kögel-Knabner, I. (2002). The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, *34*(2), 139–162. doi: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00158-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00158-4)
- Kong, L., Yuan, Z., Sun, N., Ding, J., Liu, S., Zhang, S., Lv, Z., Xu, W., Liu, G., & Liu, X. (2023). Advances in flexible hydrogels for light-thermal-electricity energy conversion and storage. *Journal of Energy Storage*, *60*, 106618. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106618>
- Li, T., Xu, J., Wu, H., Wang, G., Dai, S., Fan, J., He, H., & Xiang, W. (2016). A saponification method for chlorophyll removal from microalgae biomass as oil feedstock. *Marine Drugs*, *14*(9). doi: [10.3390/md14090162](https://doi.org/10.3390/md14090162)
- Machado, G., Santos, F., Lourega, R., Mattia, J., Faria, D., Eichler, P., & Auler, A. (2020). Biopolymers from Lignocellulosic Biomass. *Lignocellulosic Biorefining Technologies*, 125–158. doi: [10.1002/9781119568858.ch7](https://doi.org/10.1002/9781119568858.ch7)
- Malekzadeh, E., Tatari, A., & Firouzabadi, M. D. (2023). Preparation, characteristics, and soil-biodegradable analysis of corn starch/nanofibrillated cellulose (CS/NFC) and corn starch/nanofibrillated lignocellulose (CS/NFLC) films. *Carbohydrate Polymers*, *309*, 120699. doi: [10.1016/j.carbpol.2023.120699](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120699)
- Martínez-Córdova, L. R., Robles-Porchas, G. R., Vargas-Albores, F., Porchas-Cornejo, M. A., & Martínez-Porchas, M. (2022). Chapter 20 - Microbial bioremediation of aquaculture effluents. In S. Das & H. R. Dash (Eds.), *Microbial Biodegradation and Bioremediation (Second Edition)* (Second Edition, pp. 409–417). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85455-9.00009-6>
- Mastropetros, S. G., Pispas, K., Zagklis, D., Ali, S. S., & Kornaros, M. (2022). Biopolymers production from microalgae and cyanobacteria cultivated in wastewater: Recent advances. *Biotechnology Advances*, *60*, 107999. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2022.107999>

- Mehrpouya, M., & VAHABI, H. (2023). *Additive Manufacturing of Biopolymers: Handbook of Materials, Techniques, and Applications*. doi: 10.1016/C2021-0-02412-3
- Mehrpouya, M., & Vahabi, H. (2023). Chapter 1 - Additive manufacturing of biopolymers. In M. Mehrpouya & H. Vahabi (Eds.), *Additive Manufacturing of Biopolymers* (pp. 1–10). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95151-7.00002-8>
- Mittal, V. (2013). *Polymers for Energy Storage and Conversion*.
- Niaounakis, M. (2015a). Definitions of Terms and Types of Biopolymers. In *Biopolymers: Applications and Trends* (pp. 1–90). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-323-35399-1.00001-6
- Niaounakis, M. (2015b). Properties. In *Biopolymers: Processing and Products* (pp. 79–116). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-323-26698-7.00002-7
- Nixon Richard. (2024, January 3). *The Effects: Dead Zones and Harmful Algal Blooms*. Retrieved from <https://www.epa.gov/nutrientpollution/effects-dead-zones-and-harmful-algal-blooms#:~:text=The%20overgrowth%20of%20algae%20consumes,for%20aquatic%20life%20to%20survive.>
- Ojogbo, E., Ogunsona, E. O., & Mekonnen, T. H. (2020). Chemical and physical modifications of starch for renewable polymeric materials. In *Materials Today Sustainability* (Vols. 7–8). Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.mtsust.2019.100028
- Oluwasina, O. O., Olaleye, F. K., Olusegun, S. J., Oluwasina, O. O., & Mohallem, N. D. S. (2019). Influence of oxidized starch on physicochemical, thermal properties, and atomic force micrographs of cassava starch bioplastic film. *International Journal of Biological Macromolecules*, 135, 282–293. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.05.150
- Onyeaka, H., Obileke, K., Makaka, G., & Nwokolo, N. (2022). Current Research and Applications of Starch-Based Biodegradable Films for Food Packaging. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 6). MDPI. doi: 10.3390/polym14061126
- Panawala, L. (2017). *Difference Between Chlorophyll A and B Difference Between Chlorophyll A and B Main Difference-Chlorophyll A vs Chlorophyll B*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/316584030>

- Peter, S., Lyczko, N., Gopakumar, D., Maria, H., Nzihou, A., & Thomas, S. (2021). Chitin and Chitosan Based Composites for Energy and Environmental Applications: A Review. *Waste and Biomass Valorization*, 12. doi: 10.1007/s12649-020-01244-6
- Qin, Y., Zhang, H., Dai, Y., Hou, H., & Dong, H. (2019). Effect of alkali treatment on structure and properties of high amylose corn starch film. *Materials*, 12(10). doi: 10.3390/MA12101705
- Rahmadi Putri, T., Adhitasari, A., Paramita, V., Endy Yulianto, M., & Dwi Ariyanto, H. (2023). Effect of different starch on the characteristics of edible film as functional packaging in fresh meat or meat products: A review. *Materials Today: Proceedings*. doi: 10.1016/j.matpr.2023.02.396
- Ramli, R. N., Lee, C. K., & Kassim, M. A. (2020). Extraction and Characterization of Starch from Microalgae and Comparison with Commercial Corn Starch. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 716(1). doi: 10.1088/1757-899X/716/1/012012
- Ran, W., Wang, H., Liu, Y., Qi, M., Xiang, Q., Yao, C., Zhang, Y., & Lan, X. (2019). Storage of starch and lipids in microalgae: Biosynthesis and manipulation by nutrients. *Bioresource Technology*, 291(July), 121894. doi: 10.1016/j.biortech.2019.121894
- Seung, D. (2020). Amylose in starch: towards an understanding of biosynthesis, structure and function. *In New Phytologist* (Vol. 228, Issue 5, pp. 1490–1504). Blackwell Publishing Ltd. doi: 10.1111/nph.16858
- Shahabi-Ghahfarrokhi, I., Goudarzi, V., & Babaei-Ghazvini, A. (2019). Production of starch based biopolymer by green photochemical reaction at different UV region as a food packaging material: Physicochemical characterization. *International Journal of Biological Macromolecules*, 122, 201–209. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.10.154
- Singh, R., Gautam, S., Sharma, B., Jain, P., & Chauhan, K. D. (2021). Biopolymers and their classifications. *In Biopolymers and their Industrial Applications* (pp. 21–44). Elsevier. doi: 10.1016/b978-0-12-819240-5.00002-x
- Singh, S. N., Yunus, M., & Singh, N. (1990). Effect of sodium metabisulphite on chlorophyll, protein and nitrate reductase activity of tomato leaves. *Science of The Total Environment*, 91, 269–274. doi: [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(90\)90303-C](https://doi.org/10.1016/0048-9697(90)90303-C)

- Sinha Ray, S., & Banerjee, R. (2022). 4- Synthesis, properties, advantages, and challenges of bio-based and biodegradable polymers used for the preparation of blends with polylactide. In S. Sinha Ray & R. Banerjee (Eds.), *Sustainable Polylactide-Based Blends* (pp. 51–78). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85868-7.00010-X>
- Sudhakar, Y. N., Selvakumar, M., & Bhat, D. K. (2018). An introduction of Biopolymer Electrolytes. In *Biopolymer Electrolytes* (pp. 1–34). Elsevier. doi: 10.1016/b978-0-12-813447-4.00001-7
- Tarique, J., Sapuan, S. M., & Khalina, A. (2021). Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch biopolymers. *Scientific Reports*, 11(1), 13900. doi: 10.1038/s41598-021-93094-y
- Thakur, R., Pristijono, P., Scarlett, C. J., Bowyer, M., Singh, S. P., & Vuong, Q. V. (2019). Starch-based films: Major factors affecting their properties. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 132, pp. 1079–1089). Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.03.190
- Thang, N. H., Chien, T. B., & Cuong, D. X. (2023). Polymer-Based Hydrogels Applied in Drug Delivery: An Overview. In *Gels* (Vol. 9, Issue 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/gels9070523
- Tomoda, B. T., Yassue-Cordeiro, P. H., Ernesto, J. V., Lopes, P. S., Péres, L. O., da Silva, C. F., & de Moraes, M. A. (2020). Characterization of biopolymer membranes and films: Physicochemical, mechanical, barrier, and biological properties. In *Biopolymer Membranes and Films: Health, Food, Environment, and Energy Applications* (pp. 67–95). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-818134-8.00003-1
- Torres, F. G., & De-la-Torre, G. E. (2021). Algal-based polysaccharides as polymer electrolytes in modern electrochemical energy conversion and storage systems: A review. In *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* (Vol. 2). Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.carpta.2020.100023
- Torres-Magaña, M. F., Baltazar-Álvarez, J. L., Murillo-Alvarado, P. E., & Esquivel-Barajas, G. G. (2023). Design and Production of Biodiesel and Porous Filaments from Endemic Species of the Cienega de Chapala Region. In A. C. Kokossis, M. C. Georgiadis, & E. Pistikopoulos (Eds.), 33rd European Symposium on Computer Aided Process Engineering (Vol. 52, pp. 2375–2380). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15274-0.50377-2>

- Tran, T., Da, G., Moreno-Santander, M. A., Vélez-Hernández, G. A., Giraldo-Toro, A., Piyachomkwan, K., Sriroth, K., & Dufour, D. (2015). A comparison of energy use, water use and carbon footprint of cassava starch production in Thailand, Vietnam and Colombia. *Resources, Conservation and Recycling*, *100*, 31–40. doi: 10.1016/j.resconrec.2015.04.007
- Udayakumar, G. P., Muthusamy, S., Selvaganesh, B., Sivarajasekar, N., Rambabu, K., Banat, F., Sivamani, S., Sivakumar, N., Hosseini-Bandegharai, A., & Show, P. L. (2021). Biopolymers and composites: Properties, characterization and their applications in food, medical and pharmaceutical industries. In *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Vol. 9, Issue 4). Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.jece.2021.105322
- Valero-Valdivieso, M. F., Ortigón, Y., & Uscategui, Y. (2013). Biopolímeros: Avances y perspectivas. *DYNA (Colombia)*, *80*(181), 171–180.
- Vitova, M., Bisova, K., Kawano, S., & Zachleder, V. (2014). Accumulation of energy reserves in algae: From cell cycles to biotechnological applications. *Biotechnology Advances*, *33*(6), 1204–1218. doi: 10.1016/j.biotechadv.2015.04.012
- Wang, X., Yao, C., Wang, F., & Li, Z. (2017). Cellulose-Based Nanomaterials for Energy Applications. In *Small* (Vol. 13, Issue 42). Wiley-VCH Verlag. doi: 10.1002/smll.201702240
- Work, T. S., & Work, E. (Eds.). (1972). *Chapter 3 Lipid extraction procedures* (Vol. 3, pp. 347–353). Elsevier. doi: [https://doi.org/10.1016/S0075-7535\(08\)70549-7](https://doi.org/10.1016/S0075-7535(08)70549-7)
- Yahia, E. M., Carrillo-López, A., Barrera, G. M., Suzán-Azpiri, H., & Bolaños, M. Q. (2019). Chapter 3 - Photosynthesis. In E. M. Yahia (Ed.), *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables* (pp. 47–72). Woodhead Publishing. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813278-4.00003-8>
- Yamago, S., & Nakamura, Y. (2012). 3.08 - Other Degenerative Transfer Systems. In K. Matyjaszewski & M. Möller (Eds.), *Polymer Science: A Comprehensive Reference* (pp. 227–247). Amsterdam: Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53349-4.00067-4>
- Yun, S., Freitas, J. N., Nogueira, A. F., Wang, Y., Ahmad, S., & Wang, Z.-S. (2016). Dye-sensitized solar cells employing polymers. *Progress in Polymer Science*, *59*, 1–40. doi: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2015.10.004>

Zarski, A., Bajer, K., & Kapuśniak, J. (2021). Review of the most important methods of improving the processing properties of starch toward non-food applications. In *Polymers* (Vol. 13, Issue 5). MDPI AG. doi: 10.3390/polym13050832

Zhang, C., Pang, C., Mao, Y., & Tang, Z. (2022). Effect and Mechanism of Polyethylene Glycol (PEG) Used as a Phase Change Composite on Cement Paste. *Materials*, 15(8). doi: 10.3390/ma15082749