

**SÍNTESIS DE BIOPELÍCULAS DE ALMIDÓN - HIDROLATO DE
CÚRCUMA PARA DETECCIÓN DE HIERRO Y COBRE EN SOLUCIONES
ACUOSAS**

LUISA FERNANDA RIVERA CAPACHO



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
PAMPLONA, COLOMBIA**

2024

**SÍNTESIS DE BIOPELICULAS DE ALMIDÓN – HIDROLATO DE
CÚRCUMA PARA DETECCIÓN DE HIERRO Y COBRE EN SOLUCIONES
ACUOSAS**

LUISA FERNANDA RIVERA CAPACHO

**Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título de
Químico**

Tutores

JOSÉ HERNANDO QUINTANA MENDOZA

Magister

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

DIANA ALEXANDRA TORRES SÁNCHEZ

Doctora

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
PAMPLONA, COLOMBIA**

2024

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi madre, quien siempre ha sido mi mayor inspiración y apoyo incondicional a lo largo de este camino académico. Gracias por su infinito amor, paciencia y sacrificio, que han sido la luz que guio cada paso de este camino.

A mi querida hermana, quiero reconocerle su presencia inquebrantable en los momentos en que más la necesitaba. Gracias por su constante apoyo y amor infinito, que han sido un pilar invaluable durante este proceso.

A mis amigos, les estoy agradecido por las risas compartidas y los momentos inolvidables que hemos vivido juntos. El compañerismo que compartimos ha hecho que incluso los momentos más difíciles sean más llevaderos.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecerle a Dios por haberme permitido culminar esta etapa de mi vida, agradezco profundamente a mi mamá y a mi hermana por su apoyo incondicional a lo largo de este camino.

Agradezco especialmente a mis tutores, el Profesor José Hernando Quintana y la Profesora Diana Alexandra Torres, quienes me brindaron su invaluable ayuda y me guiaron en este proceso de aprendizaje.

Al grupo de investigación Biocalorimetría por apoyarme y colaborar con las instalaciones del laboratorio para poder realizar la parte experimental de mi tesis.

Agradezco también a mi pareja por su constante apoyo y por ser mi fuente de ánimo en los momentos más difíciles.

Por último, agradezco a mis compañeros de trabajo de grado, y a mis compañeros de curso, quienes, con su compañerismo, sus aportes y colaboración contribuyeron de manera significativa en mi proceso de aprendizaje.

CONTENIDO

DEDICATORIA	3
Agradecimientos	4
Lista de tablas	7
Lista de FIGURAS	8
Lista de ecuaciones	10
Lista de abreviaturas.....	11
Resumen.....	12
Abstract.....	13
INTRODUCCIÓN	14
1. Marco Referencial	16
1.1 Biopolímeros	16
2. Objetivos	25
2.1 Objetivo general	25
2.2 Objetivos específicos	25
3. Metodología.....	26
3.1 Reactivos.....	26
3.2 Equipos.....	26
3.3 Procedimiento	27
3.4 Recolección del residuo de la yuca.....	27
3.5 Extracción del almidón	27
3.6 Determinación del porcentaje de amilosa	28
3.7 Morfología del almidón.....	28
3.8 Caracterización del almidón	28
3.8.1 ATR-FTIR	29
3.8.2 TGA	29
3.9 Determinación de las propiedades fisicoquímicas	29
3.9.1 Humedad.....	29
3.9.2 Ceniza.....	29

4.	Recolección de la cúrcuma.....	30
4.1	Preparación del hidrolato	30
4.2	Caracterización del hidrolato	30
4.2.1	Cromatografía de gases acoplada a masas GC-MS	30
4.3	Síntesis de biopelículas	30
4.4	Caracterización de las biopelículas.....	31
4.5	Permeabilidad de biopelícula.....	31
4.6	Estudio de la capacidad de determinación de hierro y cobre.....	31
5.	Resultados y análisis	34
5.1	Extracción del almidón	34
5.2	ATR-FTIR del almidón.....	35
5.3	Estabilidad térmica del almidón mediante TGA	36
5.4	Morfología del almidón.....	37
5.5	Determinación del porcentaje de amilosa	38
5.6	Preparación del hidrolato de cúrcuma (<i>Curcuma longa</i>)	39
5.7	Cromatografía de masas acoplada a espectrometría de masas (GC-MS).....	40
5.8	Espectroscopía UV-vis del hidrolato de cúrcuma	44
5.9	Análisis infrarrojo de la cúrcuma antes y después de la extracción	45
6.	Síntesis de las biopelículas.....	48
6.1	Análisis SEM de las biopelículas con cúrcuma y con almidón de yuca	49
6.2	Análisis ATR-FTIR de las biopelículas de almidón y con hidrolato cúrcuma	49
6.3	Análisis termogravimétrico TGA de las biopelículas de almidón sin hidrolato	51
6.4	Análisis termogravimétrico TGA de las biopelículas con hidrolato de cúrcuma.....	52
	CONCLUSIONES	59
	RECOMENDACIONES.....	60
	BIBLIOGRAFÍA	61
	ANEXOS	69

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Concentraciones y longitudes del cobre (Cu^{+2}).....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 2. Concentraciones y longitudes del hierro (Fe^{+3})</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 3. Asignación de grupos funcionales del espectro de almidón de yuca</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 4. Identificación de compuestos en el hidrolato de cúrcuma (GC-MS)</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 5. Asignación de los grupos funcionales de la cúrcuma antes y después de la extracción</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 6. Asignaciones de las biopelículas de almidón de yuca y biopelículas de hidrolato de cúrcuma.</i>	<i>50</i>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Estructuras de metabolitos de la cúrcuma. (Elaborada por los autores basada en las referencias: (Paula et al., 2024), (Wang et al., 2023), (DALL·E 2, s. f.)</i>	20
<i>Figura 2. Estructura de la amilosa, (Elaborada por los autores basada en la referencia) (SIERRA et al., 2010)</i>	22
<i>Figura 3. Estructura de la amilopectina, (Elaborada por los autores basada en la referencia) (SIERRA et al., 2010)</i>	22
<i>Figura 4. Proceso de extracción del almidón.</i>	34
<i>Figura 5. Espectro FT- IR del almidón de yuca.</i>	35
<i>Figura 6. TGA con su derivada para el almidón de yuca</i>	37
<i>Figura 7. Morfología del almidón por SEM Y microscopio (a) SEM, (b) 4x. (c) 10x. (d) 40X, (e) 100x.</i>	38
<i>Figura 8. Curva de calibración de la amilosa</i>	38
<i>Figura 9. Proceso de extracción del hidrolato de cúrcuma</i>	40
<i>Figura 10. GC-MS del hidrolato de cúrcuma</i>	41
<i>Figura 11. Espectro de masas y posible ruta de fragmentación</i>	43
<i>Figura 12. Espectro UV-vis del hidrolato de cúrcuma</i>	44
<i>Figura 13. Espectros FTIR de la cúrcuma antes de la extracción (CUR) y la cúrcuma después de la extracción etanólica (EXTR)</i>	46
<i>Figura 14. PCA antes (Cur) (A, B, C, D, E) y después de la extracción etanólica (EXT) (A, B, C, D, E) con Rstudio</i>	47
<i>Figura 15. Proceso de pesado y síntesis de las biopelículas</i>	48
<i>Figura 16. Análisis SEM de las biopelículas con almidón de yuca y con hidrolato de cúrcuma</i>	49
<i>Figura 17. Espectros FT- IR de las biopelículas con almidón (BIOP BLANCO) y con almidón e hidrolato de cúrcuma (BIOP CUR)</i>	50
<i>Figura 18. TGA con su segunda derivada para las biopelículas de almidón</i>	52
<i>Figura 19. Termograma TGA de las biopelículas de almidón con hidrolato de cúrcuma</i>	53
<i>Figura 20. Curva de calibración de la permeabilidad</i>	54

<i>Figura 21. Proceso de detección de hierro</i>	<i>55</i>
<i>Figura 22. Curva de calibración de detección de hierro</i>	<i>56</i>
<i>Figura 23. Espectro UV-vis de las láminas de hierro a diferentes concentraciones</i>	<i>57</i>
<i>Figura 24. Proceso de detección de cobre</i>	<i>57</i>
<i>Figura 25. Curva de calibración de la cuantificación de las absorbancias de cobre</i>	<i>58</i>
<i>Figura 26. Espectro UV-vis de las láminas de cobre a diferentes concentraciones.....</i>	<i>58</i>

Lista de ecuaciones

<i>Ecuación 1. Permeabilidad</i>	<i>53</i>
--	-----------

LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Término
PCA	Análisis de componentes principales (Principal component analysis)
FTIR	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (Fourier transform infrared spectroscopy)
ATR	Reflectancia total atenuada (Attenuated total reflectance)
SEM	Microscopía electrónica de barrido (Scanning electron microscopy)
TGA	Análisis termogravimétrico (Thermogravimetric analysis)
GC	Cromatografía de gases (Gas chromatography)
MS	Espectrometría de masas (Mass spectrometry)
UV-VIS	Espectroscopía ultravioleta-visible (Ultraviolet–visible spectroscopy)

Resumen

En la presente investigación se sintetizaron biopelículas de almidón de yuca impregnadas con hidrolato de cúrcuma. Esta investigación se centró en el desarrollo de un biosensor para la detección de cationes de Fe^{+3} y Cu^{+2} en soluciones acuosas.

El almidón extraído de residuos de yuca presentó un rendimiento de $14,07 \pm 0,70$ %, presentando gránulos elipsoidales truncados y una temperatura de descomposición térmica entre $270,17$ °C a $343,72$ °C. Cada biopelícula ($3,8 \pm 0,1$ g) se elaboró mezclando $4,87$ % de almidón, $1,33$ % de glicerina, $90,68$ % de agua y $3,10$ % de hidrolato de cúrcuma. Las biopelículas obtenidas presentaron una distribución homogénea y una estabilidad térmica hasta $262,31$ °C.

El hidrolato de cúrcuma fue extraído con etanol al 96 %, obteniendo un porcentaje de peso disuelto de $6,27 \pm 0,80$ %. Su análisis cromatográfico mostró que sus constituyentes mayoritarios son: α -curcumeno, curcumina, α -turmerona y β -sesquifelandreno.

Las biopelículas fueron impregnadas con el hidrolato de cúrcuma, en el cual la curcumina actúa como cromóforo formando complejos con los metales y produciendo cambios de color visibles. Para la detección de la concentración por espectroscopía UV-vis, de los iones Fe^{+3} y Cu^{+2} , se diseñaron láminas de detección de 10 mm x 15 mm con un paso óptico de $12,83$ mm x $5,13$ mm. El análisis espectrofotométrico se realizó a 455 nm para el hierro y 430 nm para el cobre. Las curvas de calibración (para ambos metales) presentaron un comportamiento exponencial para concentraciones de 0 , 3 , 5 , 7 y 10 ppm de ambos metales.

Este biosensor ofrece una alternativa sostenible y económica a los métodos convencionales, aprovechando recursos locales y residuos agrícolas. El método proporciona una detección visual rápida y cuantificación espectrofotométrica, con potencial aplicación en monitoreo ambiental y análisis en campo.

Palabras Claves: Biosensor, cuantificación, hierro, cobre, almidón, hidrolato de cúrcuma.

Abstract

In this research, cassava starch biofilms impregnated with turmeric hydrolate were synthesized. This research focuses on the development of a biosensor for the detection of Fe^{+3} and Cu^{+2} cations in aqueous solutions.

The starch extracted from cassava residues had a yield of 14.07 ± 0.70 %, with truncated ellipsoidal granules and a thermal decomposition temperature between 270.17 °C to 343.72 °C. Each biofilm (3.8 ± 0.1 g) was made by mixing 4.87 % starch, 1.33 % glycerin, 90.68% water and 3.10% turmeric hydrolate. The biofilms obtained have a homogeneous distribution and thermal stability up to 262.31 °C.

Turmeric hydrolate was extracted with 96 % ethanol, obtaining a dissolved weight percentage of 6.27 ± 0.80 %. Its chromatographic analysis showed that its major constituents are α -curcumene, curcumin, α -turmerone and β -sesquiphellandrene.

The biofilms were impregnated with turmeric hydrolate, in which curcumin acts as a chromophore, forming complexes with metals and producing visible color changes, for the detection of the concentration by UV-vis spectroscopy of the Fe^{+3} and Cu^{+2} ions, 10 mm x 15 mm detection sheets are designed with an optical path of 12.83 mm x 5.13 mm. Spectrophotometric analysis was performed at 455 nm for iron and 430 nm for copper. The calibration curves (for both metals) showed exponential behavior for concentrations of 0, 3, 5, 7 and 10 ppm of both metals.

This biosensor offers a sustainable and economical alternative to conventional methods, taking advantage of local resources and agricultural waste. The method provides rapid visual detection and spectrophotometric quantification, with potential application in environmental monitoring and field analysis.

Keywords: Biosensor, quantification, iron, copper, starch, turmeric hydrolate.

INTRODUCCIÓN

En el mundo, en general, en Colombia en particular, se presenta un desafío ambiental en la detección y el monitoreo de contaminantes metálicos en recursos de fuentes hídricas. La presencia de metales pesados como el hierro y el cobre en aguas naturales o residuales, incluso en concentraciones bajas, puede tener impactos significativos tanto en la salud humana como en los ecosistemas acuáticos. En este contexto, surge la necesidad de desarrollar métodos de detección que sean no solo efectivos y precisos, sino también económicos y ambientalmente sostenibles (Ali et al., 2023).

El presente trabajo de investigación se centra en la síntesis de biopelículas de almidón-hidrolato de cúrcuma como una innovadora solución para la detección colorimétrica de hierro y cobre en soluciones acuosas, utilizando la versatilidad y biodegradabilidad del almidón con las propiedades únicas del hidrolato de cúrcuma, conocido por su capacidad para interactuar con iones metálicos.

El objetivo principal de este estudio fue sintetizar estas biopelículas y evaluar su eficacia como biosensores para la detección de hierro y cobre. La detección se realizó mediante la cuantificación de absorbancias a longitudes de onda específicas para cada concentración de metal, permitiendo una medición precisa y reproducible. Este enfoque no solo promete ser una alternativa más ecológica a los métodos tradicionales de detección, sino que también podría ofrecer una solución accesible y fácil de implementar en diversos contextos, desde laboratorios de investigación hasta aplicaciones en campo.

Esta investigación se estructuró en dos fases principales que están alineadas con los objetivos específicos. En primer lugar, se abordó el proceso de obtención de las biopelículas, explorando diferentes composiciones y técnicas de síntesis para optimizar sus propiedades sensoriales. Posteriormente, se evaluó minuciosamente la capacidad de estas biopelículas para detectar hierro y cobre en soluciones acuosas, en un rango específico, mediante análisis espectrofotómetro.

Este trabajo, no solo busca contribuir al campo de los biosensores y la química de materiales, sino que también aspira a ofrecer una herramienta práctica para el monitoreo ambiental. Adicionalmente, la posibilidad de contar con un método de detección colorimétrico, basado en materiales naturales y biodegradables, puede representar un avance

significativo en la gestión sostenible de recursos hídricos y en el control de la contaminación por metales pesados (L. Li et al., 2024); (Sharma et al., 2024).

Al finalizar esta investigación, se espera no solo desarrollar un nuevo biosensor, sino también abrir caminos para futuras innovaciones en el campo de la detección de contaminantes utilizando materiales basados en biopolímeros. Los resultados de este estudio podrían tener implicaciones importantes para la protección ambiental, la salud pública y el desarrollo de tecnologías sostenibles en el ámbito del análisis y tratamiento de aguas.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 Biopolímeros

Los biopolímeros son polímeros obtenidos de fuentes naturales y seres vivos; algunos ejemplos comunes son el quitosano, el alginato, la celulosa y el almidón. Estas sustancias tienen la ventaja de ser biodegradables, renovables y generalmente presentan baja toxicidad. Una de las aplicaciones prometedoras de los biopolímeros modificados es su uso como alternativa ecológica y sostenible para remover contaminantes de las aguas residuales (Joshi & Yadav, 2023).

Los biopolímeros inteligentes son biopolímeros sensibles a estímulos como temperatura, pH, luz y campos eléctricos o magnéticos. Exhiben cambios rápidos y reversibles en su microestructura cuando se exponen a pequeños estímulos ambientales, expresando cambios macroscópicos como precipitación, separación de fases, cambios de color o cambios de tamaño en los hidrogeles (Neumann et al., 2023). Lo anterior permite el uso de estos materiales en envases para alimentos, láminas agrícolas, bolsas de residuos y embalajes como telas no tejidas, que se utilizan en agricultura, filtración, higiene y ropa protectora (Roopan & Tammineni, 2015).

Una de las aplicaciones de los biopolímeros es la elaboración de biosensores, que generando cambios colorimétricos indican la frescura de alimentos de forma visual y en tiempo real. Estas características han permitido el desarrollo de envases inteligentes como RipeSense y VanProb, los cuales se emplean para detectar madurez de frutas y estimar frescura relacionando tiempo y temperatura; en este caso la polianilina detecta amoníaco para indicar frescura mediante cambio de color (Sobhan et al., 2021);(Rivero Berti et al., 2021).

La detección de metabolitos, también se puede realizar para matrices inorgánicas que facilitan a los biosensores la determinación de los metales tóxicos como cadmio y mercurio mediante la inclusión de quelantes formadores de complejos que generen desdoblamiento de su campo cristalino llevando al cambio de color. Ejemplo de ello, los biopolímeros de polianilina con quelantes aromáticos como el 2-metildifenil diisocianato, el cual, se dispersa en celulosa (Ramdzan et al., 2020).

El anterior ejemplo se puede concebir desde la interacción ligando-metal de compuestos de coordinación, donde el metal se comporta como un ácido de Lewis y el ligando como una base de Lewis, generando las esferas de coordinación que promueven cambios en las transiciones electrónicas, los cuales son observables en el rango de 190 nm a 900nm. La diversidad de materiales empleados en estos biosensores se centra en el tipo de base de Lewis (ligando) a la que se coordina el metal. Esta variedad de ligandos facilita la detección de cambios observables mediante señales eléctricas, ópticas o magnéticas, lo que permite la identificación y cuantificación de metales tóxicos como cadmio y mercurio en matrices inorgánicas. Entre los diversos tipos de ligandos utilizados, destacan:

Las bases de Schiff, que gracias a sus grupos donantes tanto duros como blandos provenientes de centros nitrogenados tipo amina, carbonilos ácidos y cetónicos, facilitan sistemas de detección acumulativa o escalonada de iones metálicos. Esta detección depende de factores como el tiempo, la temperatura, el pH y la concentración. Un ejemplo es el sensor acumulativo basado en el ligando salicilaldehído-piridina funcionalizado con trifenilamina, que reacciona selectivamente con Cu^{2+} en dos pasos, alcanzando una alta sensibilidad en medios THF/agua con un límite de detección de 26,87 μM (Kaswan, 2023); (Zhang et al., 2021).

Otro ejemplo son los ligandos NTB (tris ((1 H -benzo [d] imidazol-2-il) metil) amina) y BBP (2,6- bis (1H -benzo [d] imidazol-2-il) piridina, derivados de benzimidazol que funcionan como ligandos multidentados que pueden coordinarse con átomos de metal en diferentes proporciones metal-ligando. La sustitución del enlace N-H en el anillo de benzimidazol por grupos alquilo permite estudiar la red de enlaces de hidrógeno. Los iones lantánidos y sus complejos de coordinación son importantes en los diferentes campos como, los materiales, biología y medicina. Aunque los iones lantánidos (III) son débilmente luminiscentes debido a las transiciones 4f prohibidas por paridad (regla de Laporte), su excitación indirecta se logra mediante "emisión sensibilizada" o "efecto antena". Esto compensa sus bajos coeficientes de absorción y estados excitados de larga duración (Cruz-Navarro et al., 2021).

Por otro lado, la sustitución en el átomo de carbono C4 del anillo de pirazolona permite crear ligandos quelantes adaptables para coordinarse eficientemente con iones metálicos específicos. Las pirazolonas, especialmente aquellas con fracciones hidrazona,

semicarbazona y tiosemicarbazona, han ganado interés como materiales fotocromicos potenciales, exhibiendo cambios de color reversibles en estado sólido en respuesta a la luz. Estas propiedades les confieren aplicaciones en sistemas de almacenamiento de información, interruptores ópticos y como sondas fluorescentes selectivas para iones metálicos como aluminio y hierro. Esta variedad de ligandos permite diseñar biosensores con diferentes propiedades y sensibilidades, adaptados a la detección de distintos metales y condiciones específicas (Marchetti et al., 2019); (Parihar et al., 2015);(Liu et al., 2024a).

Las bases mencionadas anteriormente son de origen sintético presentando un desafío en términos de costo y accesibilidad. Como alternativa, se han estado empleando medios biológicos de fácil acceso para la quelación de iones metálicos, donde los curcuminoides podrían ser una muy buena opción. Los curcuminoides existen en dos formas tautoméricas, siendo la forma β - ceto-enol la más estable. Esta fracción β - ceto-enol de la curcumina ha demostrado la capacidad de formar quelatos con iones metálicos como Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+} en proporciones 1:1 y 1:2 (metal:ligando); (Mary et al., 2018); (Barzegar, 2012).

Estudios teóricos han demostrado que estos cambios de absorción en el UV-vis se deben a que el complejo de curcumina con cobre (II), con una configuración electrónica d^9 , adopta una estructura planar cuadrada. Al aumentar el porcentaje de intercambio de Hartree-Fock, aumenta la brecha HOMO-LUMO del complejo. El espectro electrónico del complejo está dominado por transiciones intraligando de la curcumina, oscureciendo las transferencias de carga metal-ligando o ligando-metal, las cuales tienen bajas intensidades debido a la disposición centro simétrica del complejo (Corrêa et al., 2023).

La curcumina (1,7-bis[4-hidroxi-3-metoxifenil]-1,6-heptadieno-3,5-diona) es el principal componente de la raíz de la planta de cúrcuma (*Curcuma longa*), la cual posee metabolitos como la tetrahidrocurcumina (THC), (Figura 1a.), dihidrocurcumina (DHC), (Figura 1b.) y hexahidrocurcumina (HHC), (Figura 1c.). Por el contrario, la forma ceto-enólica de la curcumina exhibe propiedades antioxidantes al eliminar radicales libres, el THC posee capacidad quelante de metales (López González, 2020).

A su vez, el DHC, HHC, THC, presentan propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antitumorales, cardioprotectoras, además de otras actividades fisiológicas beneficiosas (Lin et al., 2023). Estos metabolitos generalmente presentan una mayor estabilidad química y mejores propiedades antioxidantes que la curcumina original. Igualmente, inhiben vías inflamatorias y la proliferación celular, convirtiéndolos en compuestos prometedores para terapias contra enfermedades inflamatorias, cáncer y trastornos cardiovasculares. El estudio de sus mecanismos moleculares y actividades biológicas puede brindar información valiosa sobre la eficacia y potencial terapéutico de la curcumina y sus metabolitos (Luo et al., 2019).

Estos compuestos, se extraen de forma etanólica y la curcumina constituye aproximadamente entre el 2% y el 9%. Entre los componentes más predominantes y ampliamente empleados comercialmente, se encuentra el diferuloilmetano (Figura 1d.), también conocido como curcumina I, representando el 77% del total de los metabolitos. La demetoxicurcumina (Figura 1e.), o curcumina II, constituye alrededor del 17%, mientras que la bisdemetoxicurcumina (Figura 1f.), o curcumina III, representa aproximadamente el 3%, también, se encuentra la ciclocurcumina (Figura 1g.). Los componentes mayoritarios del aceite esencial de cúrcuma son la ar-turmerona (Figura 1h.), la α -turmerona y la β -turmerona (α/β) (Figura 1i.) (Bernal Loyola et al., 2019). En la Figura 1 se indica en color azul los sitios de interacción de algunos de estos compuestos con los cationes metálicos.

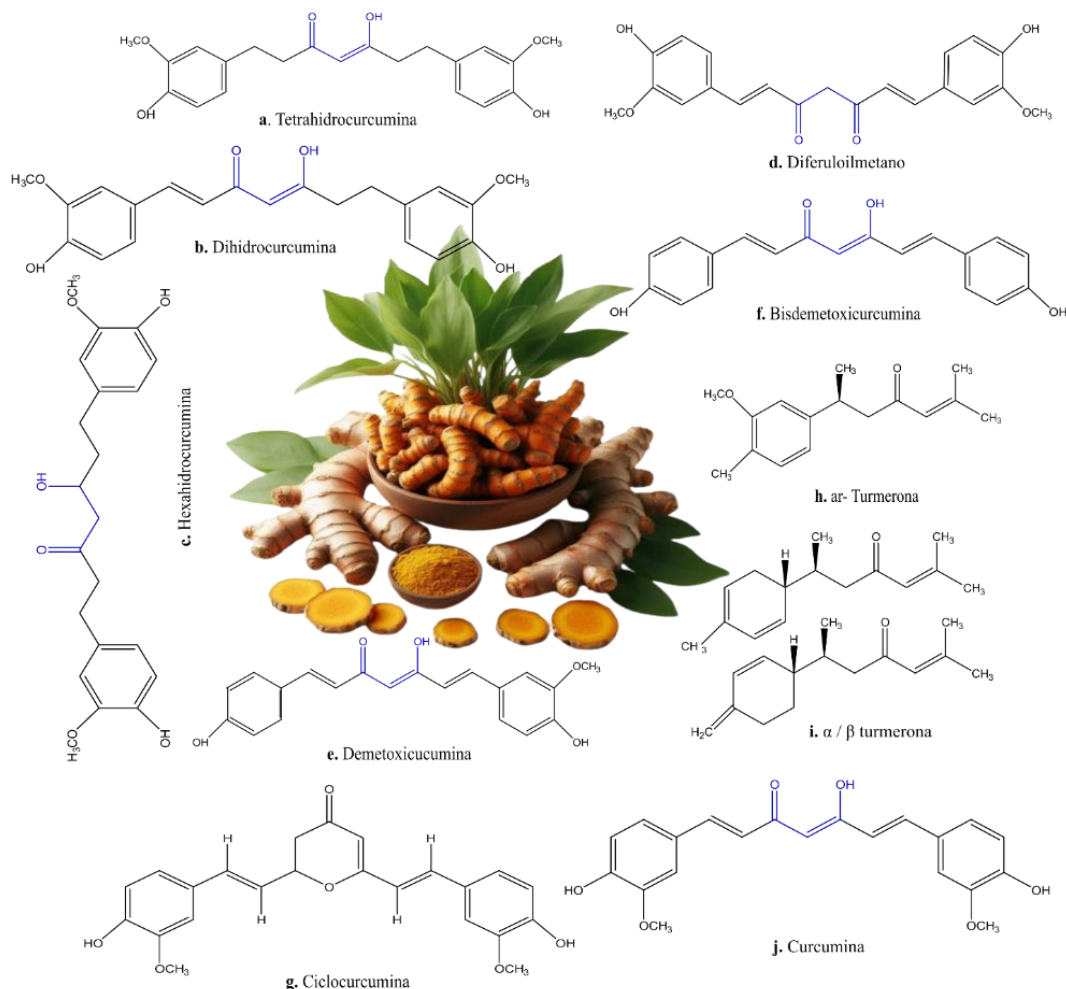


Figura 1. Estructuras de metabolitos de la cúrcuma. (Elaborada por los autores basada en las referencias: (Paula et al., 2024), (Wang et al., 2023), (DALL·E 2, s. f.)

La curcumina actuando como ligando quelante, posee la capacidad de formar complejos metálicos, como el hierro-curcumina y cobre-curcumina (Maghool et al., 2023), propiedad que puede ser aprovechada para la incorporación de estos ligandos en diferentes matrices como biopelículas; generando así sistemas eficientes de detección de metales, estables y de fácil uso, combinando las propiedades quelantes de los ligandos con las características favorables de las biopelículas, induciendo cambios de color en la misma cuando los iones metálicos presentes en una solución acuosa difunden hacia ella. Estos iones interactúan con los grupos funcionales de la curcumina, incluyendo el hidroxilo, metoxilo, β -dicetona y α , β -insaturados, formando complejos a través de quelación. La formación de estos complejos altera la simetría molecular de la curcumina, generando propiedades ópticas,

manifestándose con una mayor absorción de la luz visible y la aparición de colores intensos (Barik et al., 2007).

La curcumina tiene la capacidad de formar complejos con Fe^{2+} (ion ferroso) o Fe^{3+} (ion férrico) sin embargo, es más estable la formación de complejos de hierro – curcumina del Fe^{3+} en comparación del Fe^{2+} . Esta diferencia de estabilidad puede atribuirse a las propiedades químicas específicas del ion férrico, como su mayor estado de oxidación, fuerte acidez de Lewis, y catión duro, haciendo que el Fe^{3+} sea adecuado para la formación de complejos metal-curcumina (mediante la presencia de un grupo funcional β -dicetona α , β -insaturado en su estructura), para aplicaciones como la detección de metales con biopelículas basadas en curcumina (Borsari et al., 2002); (C. et al., 2017).

Los iones metálicos, además de interactuar con la curcumina, también pueden formar complejos de coordinación con los grupos hidroxilo presentes en las cadenas de almidón. Estas interacciones múltiples dan lugar a la formación de un complejo ternario estabilizado por una combinación de puentes de hidrógeno, efectos quelantes e interacciones electrostáticas. En este complejo el ion metálico se une simultáneamente a la curcumina y al almidón dentro de la matriz polimérica de la biopelícula. Sin embargo, en muestras sintéticas el biopolímero ayuda a la dispersión de los ligandos para que genere complejos con los metales de interés como el hierro y el cobre (S. Li et al., 2021). En matrices poliméricas, el almidón, un biopolímero que puede extraerse de diversas fuentes como la papa, semillas y yuca, juega un papel fundamental presentando una función doble: facilita la dispersión de los ligandos y contribuye a la estabilización del complejo metal-curcumina (Prasad et al., 2021).

La yuca, cuyo nombre científico es (*Manihot esculenta Crantz*), es una planta que produce raíces ricas en almidón y se cultiva en regiones tropicales y subtropicales del mundo. Existen numerosas variedades de yuca, las cuales producen almidón con propiedades físicas y químicas distintas. Estas diferencias en las propiedades del almidón se deben a variaciones en la relación entre amilosa y amilopectina, que son los dos tipos mayoritarios de moléculas que componen el almidón, así como a cambios en la estructura molecular de los mismos (Mohidin et al., 2023).

El almidón es un polisacárido de reserva que se encuentra de forma natural en las plantas. Está compuesto por largas cadenas de moléculas de glucosa unidas entre sí, formando una estructura ramificada (Yong & Liu, 2024). Este polisacárido cumple un papel

esencial al proveer alimento, carbono y energía a las plantas durante su ciclo de vida. Además de su importancia biológica, el almidón tiene aplicaciones significativas en diversos sectores industriales como el textil, farmacéutico, paplero, plástico y en el área biomédica (Botticella et al., 2024).

Los gránulos de almidón se organizan en partículas semicristalinas de diversos tamaños. La amilosa, como se aprecia en la (Figura 2), tiene estructura lineal formada por unidades de glucosa unidas mediante enlaces glucosídicos del tipo α (1-4), mientras que la amilopectina (Figura 3), es un polímero ramificado unido mediante enlaces α -1,4-glucosídicos. Además, tiene la capacidad de conectarse con otras cadenas mediante enlaces α -1,6-glucosídicos (Zuo et al., 2024) .

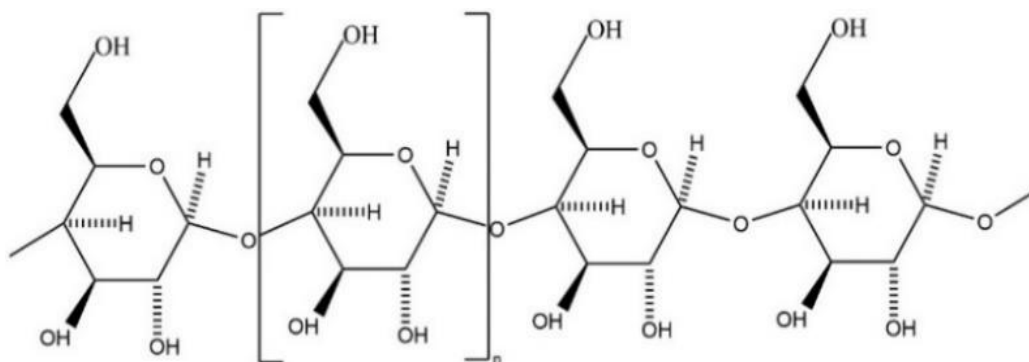


Figura 2. Estructura de la amilosa, (Elaborada por los autores basada en la referencia) (SIERRA et al., 2010)

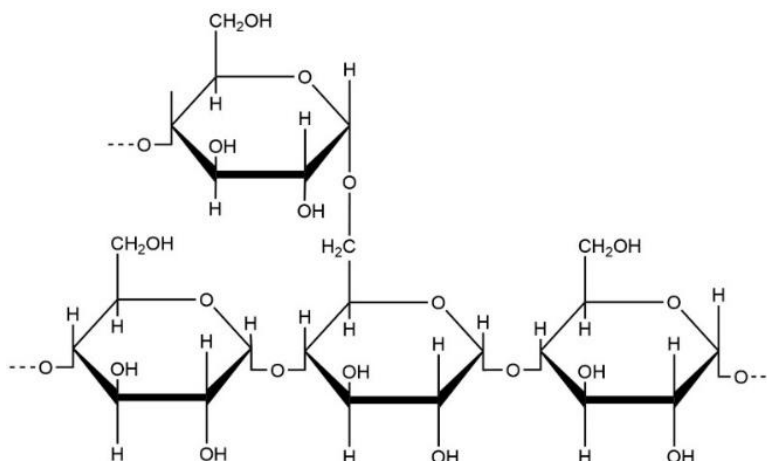


Figura 3. Estructura de la amilopectina, (Elaborada por los autores basada en la referencia) (SIERRA et al., 2010)

Las biopelículas elaboradas a partir del almidón de yuca sirven para optimizar la interacción entre la curcumina y el almidón, Esta interacción se produce principalmente a través de la formación de puentes de hidrógeno entre un compuesto polifenólico que contiene varios grupos hidroxilo (-OH) en su estructura, un polisacárido formado por largas cadenas de glucosa, lo cual estabiliza el complejo curcumina-almidón (Yao et al., 2023).

La formación de complejos almidón-curcumina-metal induce a cambios de color, que permite la generación de complejos catiónicos observables por UV-vis, lo cual convierte a este complejo en un biosensor (Yao et al., 2023). Esta estrategia representa un avance importante hacia métodos de control ambiental más accesibles, eficientes y sostenibles. Al proporcionar una alternativa de bajo costo a los métodos tradicionales, se abre la posibilidad de implementar programas de monitoreo más amplios y frecuentes, lo que podría tener un impacto significativo en la protección de la salud pública y la preservación del medio ambiente.

La contaminación de metales como el hierro, el cobre y otros metales pesados, proviene principalmente de actividades industriales, extracción de minerales y prácticas agrícolas. Si bien la industrialización ha impulsado el mejoramiento de las condiciones económicas y la generación de empleo, también ha surgido el problema de la contaminación ambiental por metales pesados que dañan el medio ambiente, la agricultura, los alimentos y la salud (GadelHak et al., 2023).

Estos contaminantes metálicos no solo afectan al ecosistema y los cultivos, sino también tienen un impacto significativo en la cadena alimentaria y la salud humana. Actualmente, para abordar esta necesidad, se están aplicando los marcos orgánicos covalentes (COF, sigla en inglés: Covalent Organic Frameworks) como materiales de detección inteligentes y versátiles. Estos COF se utilizan principalmente con técnicas de fluorescencia, colorimetría y métodos electroquímicos, ofreciendo soluciones prometedoras para la detección eficaz de iones metálicos contaminantes (Li et al., 2024).

Existen varias metodologías utilizadas en la detección de metales pesados y otros contaminantes en fuentes hídricas, incluyendo enfoques portátiles, desechables y sistemas miniaturizados. (Zhao et al., 2017) Una de las técnicas prometedoras es la detección colorimétrica, que se basa en cambios de color para indicar la presencia de estos

contaminantes. Ejemplo práctico de esta metodología es el uso de BC-antocianinas como indicador de frescura en la carne. Este método aprovecha el cambio de color de las antocianinas en función del pH. Durante el deterioro de los filetes a 4°C y 25°C, se observó y cuantificó un cambio de color total, pasando de rosa a azul-violeta, permitiendo utilizar el cambio de color como un indicador visual semicuantitativo de la frescura de la carne (Shi et al., 2022).

La curcumina purificada, al formar complejos con matrices de almidón, ha demostrado ser eficaz para la detección y cuantificación de metales como el cobre y el hierro en sus formas catiónicas. Este método ha permitido la construcción de curvas de calibración con buena linealidad, lo que facilita la obtención de datos cuantitativos precisos. Estudios recientes de León et al. (2024) y Hosry et al., 2023) han validado esta técnica, proporcionando una herramienta analítica confiable para la medición de estos metales en diversas muestras (León et al., 2024); (Hosry et al., 2023).

En la actualidad, la técnica que cuenta con una determinación de calidad, en su linealidad, repetibilidad, límite de detección y cuantificación, robustez y efecto matriz es la ICP-OES (Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente), la cual ha logrado (cumpliendo la Ley de Beer) rangos de detección lineal de los iones metálicos: Mg^{+2} , Al^{+3} , Si^{+4} , Cr^{+3} , Cd^{+2} , Co^{+3} , As^{+3} , Cu^{+2} y Th^{+4} en solución acuosa en concentraciones de 0 a 10 ppm (GadelHak et al., 2023). Teniendo en cuenta el alto costo de estos equipos, se han realizado estudios con espectroscopía UV-visible e infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para la detección y cuantificación del complejo de cobre-amoniaco $[Cu(NH_3)_4]^{2+}$ en solución acuosa, logrando su detección y cuantificación en el rango de 5 a 200 ppm, lo cual es promisorio (Liu et al., 2024b).

Teniendo en cuenta los resultados prometedores de la generación de biosensores a partir de curcumina-almidón y las técnicas espectroscópicas la presente investigación se enfocó en la síntesis del complejo almidón-hidrolato de cúrcuma para evaluar su capacidad de detección de cationes de Fe^{3+} y Cu^{2+} , con el objeto de establecer su capacidad de detección y cuantificación.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Sintetizar las biopelículas de almidón – hidrolato de cúrcuma para la detección de hierro y cobre en soluciones acuosas.

2.2 Objetivos específicos

- Establecer las condiciones óptimas de la síntesis de biopelículas de almidón – hidrolato de cúrcuma
- Determinar el rango de detección de las biopelículas de los iones Fe^{+3} y Cu^{+2} en solución acuosa.

3. METODOLOGÍA

A continuación, se indican los reactivos, materiales, equipos y el procedimiento usado en esta investigación.

3.1 Reactivos

- Agua destilada
- Hidróxido de sodio (NaOH) (Merk)
- Yoduro de potasio (KI) (Merk)
- Yodo (I₂) (Merk)
- Metanol (CH₃OH) (Sigma-aldrich)
- Sulfato de cobre pentahidratado (CuSO₄ * 5 H₂O) (Honeywell)
- Ácido tricloroacético (C₂HCl₃O₂) (Merck)
- Nitrato de hierro nanohidratado (Fe (NO₃)₃ * 9 H₂O) (Panreac)
- Etanol al 96% (C₂H₆O) (Sigma-aldrich)
- Glicerol del 99% (Panareac)

3.2 Equipos

- Microscopio óptico PRIMO STAR ZEISS.
- Balanza de precisión 0,01g calibración externa, marca Ohaus.
- Balanza analítica de precisión 0,0001g, marca aeADAM.
- Horno mufla, 50°C a 900°C marca Ney VULCAN D-550.
- Licuadora OSTERIZER.
- Horno incubador, marca MEMMERT.
- Espectrofotómetro UV-vis, marca GENESYS 10uV.
- Cromatógrafo de gases (GC) AT 7890A, marca Agilent Technologies.
- Espectrofotómetro infrarrojo IRPrestige-21, marca Shimadzu.
- Ultrasonido, marca BRANSON 5800.
- Centrífuga, marca Hettich Zentrifugen ROTOFIX 32.
- Ultrasonido, marca BRANSON 5800.
- pH-metro, marca H-METER-SCHOTT.
- Colorímetro digital marca FRU ® Modelo: WR-10QC.

- Bomba de vacío, marca BOECO Germany R-400.
- Para graficar y analizar los diferentes espectros, como también para el análisis estadístico por PCA, se usó la licencia académica de aprendizaje del software OriginPro 2024b.
- Software RStudio versión 4.4.1
- Software ChemSketch para graficar moléculas versión 2022.22.

3.3 Procedimiento

Para el cumplimiento de los objetivos propuestos en esta investigación se planteó la siguiente metodología.

3.4 Recolección del residuo de la yuca

Se recolectaron aproximadamente 6,1 kg de despuntes de residuos de yuca en diferentes puntos de la plaza de mercado del municipio de Pamplona, Norte de Santander. Los residuos fueron clasificados, asegurándose de que no estuvieran en estado de descomposición. Posteriormente, se trasladaron al laboratorio de Biocalorimetría, donde se seleccionaron aleatoriamente 50 despuntes. Se realizó un seguimiento fotográfico de estos usando un celular OPPO Reno 10 con una amplitud de cámara de 1,0X.

Cada despunte con corteza fue pesado individualmente, luego lavado y secado con toallas de papel absorbente. Se registró nuevamente su peso sin corteza para hacer un seguimiento de la cantidad de pulpa recuperada por cada residuo.

3.5 Extracción del almidón

Para la extracción del almidón, los residuos fueron cortados en trozos, lavados con agua e hipoclorito comercial (0,4%) dejándolos en remojo durante 2 horas. Luego, se seleccionaron 10 trozos, se pesaron y se secaron en un horno a 30 °C durante 7 días para su caracterización mediante ATR-FTIR.

Se seleccionaron cinco muestras representativas de yuca cada una con peso aproximado de 500 g. Posteriormente, cada una fue licuada con un litro de agua destilada. Esta mezcla se filtró con ayuda de un colador de tela, separando la fibra y la lechada. La lechada se llevó a decantación en un baño de agua fría a una temperatura aproximada de 4 °C durante 1 hora. Pasado este tiempo, se retiró el sobrenadante, se separó el sólido (almidón)

y se transfirió a cajas de Petri previamente pesadas, luego se secaron en un horno a 30°C durante 5 días. Una vez secas se registró su peso. El material obtenido se molturó con un mortero de ágata, extrayendo una muestra para su caracterización y el resto se almacenó para su posterior uso.

3.6 Determinación del porcentaje de amilosa

Se tomaron de 0,0200 g del almidón extraído y se llevaron a un tubo de ensayo con 5 mL de metanol (99,9%), la mezcla se calentó en baño María a 60 °C durante 30 minutos, al finalizar el tiempo se dejó enfriar a temperatura ambiente y se centrifugó a 2.500 rpm durante 5 minutos, se desechó el sobrenadante y el sólido se lavó tres veces con metanol, luego se le agregó 4 mL de agua destilada y 2 mL de una solución 1M de NaOH y se agitó hasta disolución completa del sólido. El tubo con la disolución se llevó a calentamiento en baño de aceite mineral a 85 °C por 30 minutos, al término de este tiempo, se tomó 0,1mL de la solución y se llevó a un tubo de ensayo, luego se le agregó 5 mL de TCA al 0,5% p/p y 50 µL de un complejo de I₂-KI 0,01 N. Por último, la mezcla se agitó y se mantuvo en reposo protegida de la luz por 30 minutos, para posteriormente hacer la lectura UV-vis a una longitud de onda de 600 nm.

Para determinar la concentración de amilosa en la muestra de almidón mediante UV-vis, se realizó una curva de calibración de soluciones de un estándar de amilosa disuelto en una mezcla de NaOH 1M y TCA 0,5% p/p; a concentraciones de 10, 20, 30, 40, 50 y 60% p/p. Para el blanco se utilizó una solución de NaOH 1M y TCA 0,5% p/p.

3.7 Morfología del almidón

En la determinación de la morfología de los gránulos de almidón se empleó un microscopio óptico (Zeiss) usando aumentos de 4X, 10X, 40X y 100X. Los gránulos fueron fotografiados mediante un celular OPPO RENO 10 con una amplitud de 1.0X.

3.8 Caracterización del almidón

El almidón se caracterizó por las técnicas ATR-FTIR y TGA. A continuación, se describen los parámetros de medida en cada equipo.

3.8.1 ATR-FTIR

El almidón obtenido se caracterizó por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier con Reflectancia total atenuada (ATR-FTIR). Para ello se utilizó un espectrofotómetro FTIR Prestige-21, de marca Shimadzu, con un detector DLATGS (Deuterated L-Alanine Doped Triglycene Sulphate), equipado con un ATR MIRacle de marca Pike Technologies, que contiene un cristal de diamante y cuyo rango de medición se encuentra de 4.000 a 500 cm^{-1} . Las mediciones se realizaron con 24 escaneos y una resolución de 4,0 por muestra. El tratamiento de los espectros infrarrojos se realizó con el software Origin Pro 2024b. Los datos fueron suavizados con el método Suavitzky-Golay a 5 puntos, polynomial order 2, se realizó una normalización de 0 a 1, y se determinó la primera y segunda derivada de cada espectro. Para la línea base se realizó un spline con 7 puntos en los diferentes números de onda.

3.8.2 TGA

Para el análisis termogravimétrico (TGA) se empleó un analizador térmico Instrument Serie Discovery, bajo un flujo de nitrógeno de 50 mL/min. Las muestras fueron calentadas desde temperatura ambiente hasta 600 °C a una rampa de calentamiento de 10 °C/min, utilizando una celda de alúmina.

3.9 Determinación de las propiedades fisicoquímicas

3.9.1 Humedad

Para determinar el porcentaje de humedad, se tomaron 10 muestras de 0,5 g de almidón cada una y se pesaron. Estas muestras se llevaron a una mufla y se calentaron a una temperatura de 110 °C durante 4 horas. Posteriormente, se trasladaron a un desecador con sílice y se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente. Luego, se registraron sus pesos. El porcentaje de pérdida de masa se determinó por diferencia de peso, y este valor se relacionó con el porcentaje de humedad presente en las muestras de almidón.

3.9.2 Ceniza

Para determinar el porcentaje de cenizas, se tomaron 5 muestras de 1,5 g de almidón cada una, se pesaron. Luego se sometieron a calentamiento en la mufla a una temperatura de 50 °C, aumentando la temperatura de 4 °C por minuto hasta 550 °C durante 12 horas. Posteriormente, la temperatura se redujo a 50 °C, las muestras fueron llevadas al desecador

donde se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente, luego se registró el peso de las muestras y el porcentaje de pérdida de masa se determinó por diferencia de peso. Este valor de pérdida de masa se relacionó con el porcentaje de cenizas presente en las muestras de almidón.

4. RECOLECCIÓN DE LA CÚRCUMA

Se recolectaron 509,4589 g de raíz de cúrcuma que fue donada por la finca los espejos de Cucutilla – Norte de Santander.

4.1 Preparación del hidrolato

Se pelaron las raíces de cúrcuma y se pesaron antes y después del pelado, obteniendo 364,3744 g de cúrcuma pelada. Luego, fueron llevados los trozos de cúrcuma al horno para un secado a 50 °C durante 2 días. Después del secado, se molturaron hasta obtener un polvo fino, quedando 70,65 g de cúrcuma molturada.

Se pesaron 0,15 g de la cúrcuma molturada y se agregaron a un tubo de centrifuga con 15 mL de etanol al 96%. Esta mezcla se llevó al ultrasonido durante 40 minutos a una temperatura de 60 °C. Luego, se centrifugó a 2.500 rpm durante 5 minutos y se filtró.

4.2 Caracterización del hidrolato

4.2.1 Cromatografía de gases acoplada a masas GC-MS

Se determinó la composición presuntiva del hidrolato de cúrcuma mediante análisis cromatográfico, empleando un cromatógrafo de gases (GC) AT 7890A (Agilent Technologies, Palo Alto, California, EE.UU.), acoplado a un detector de espectrometría de masas de triple-cuadrupolo (Agilent Technologies 6400). La inyección se realizó en modo splitless (Viny = 1 µL) con una columna HP-5MS (30 m longitud × 250 µm diámetro × 0,25 µm recubrimiento).

Se tomaron espectros infrarrojos (ATR-FTIR) de la raíz de cúrcuma antes y después de la preparación del hidrolato, que fueron sometidos a suavizado, normalizado, corrección de línea base y determinación de primera y segunda derivada mediante la técnica y software mencionado en 3.8.1.

4.3 Síntesis de biopelículas

Se tomaron 7,5 g de almidón molturado y se agregaron a un Erlenmeyer. Luego, se añadieron 140 g de agua destilada y 2 g de glicerol (99%). A esta mezcla se agregó un

determinado volumen de hidrolato de cúrcuma. Una vez preparada la mezcla, el Erlenmeyer se colocó en una plancha de agitación, y las burbujas de aire atrapadas se eliminaron mediante un proceso de arrastre al vacío. Después de enfriar un poco las biopelículas se vertieron en cajas Petri (3 cajas), cada una con un peso aproximado de 38 g, y se tomaron evidencias fotográficas. Los volúmenes de hidrolato agregados fueron :1,5 mL, 3 mL, 4,5 mL, 6 mL y 7,5 mL. En total se prepararon 15 biopelículas.

Las biopelículas se dejaron secar en un horno a 50 °C durante 24 horas. Finalmente, se pesaron las biopelículas secas y se recolectaron las evidencias correspondientes.

4.4 Caracterización de las biopelículas

Las biopelículas se caracterizaron por ATR-FTIR y TGA, con las especificaciones de medida ya mencionadas anteriormente en la sección 3.8.1, 3.8.2 y 3.2 respectivamente.

La determinación de la morfología de las biopelículas se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), por medio de un microscopio electrónico QUANTA FEG 650 ubicado en el laboratorio de microscopía en el Parque Tecnológico Guatiguará, aplicando la técnica de adsorción-desorción de gases que se llevó a cabo en un equipo Micromeritics Asap 2020 plus que usa como gas de adsorción nitrógeno a 77 K. Para ello, con anterioridad las muestras se sometieron a desgasificación durante 10 horas hasta alcanzar 10 μ mHg, durante este proceso se elevó la temperatura hasta 180 °C.

4.5 Permeabilidad de biopelícula

Se tomaron 5 viales a los cuales se les retiró la parte superior para permitir la incrustación de la biopelícula y el contacto con la atmósfera del desecador. Cada vial se pesó vacío y luego se agregaron aproximadamente 1,5 g de $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ y se incrustó un trozo de la biopelícula, luego se registró nuevamente su peso. Seguidamente, se colocaron en un desecador que contenía una solución concentrada de KBr en el fondo. Se realizó el control de peso durante las tres primeras horas para cada ensayo, luego dos veces por día hasta observar una estabilización de peso y luego un aumento del mismo.

4.6 Estudio de la capacidad de determinación de hierro y cobre.

Para esta actividad, se prepararon soluciones acuosas sintéticas de nitrato de hierro nanohidratado y sulfato de cobre pentahidratado. Se inició preparando una solución madre

de 1000 ppm de cada compuesto, y luego se prepararon diluciones de 3, 5, 7, 10, 20 y 30 ppm.

Las biopelículas se cortaron con precisión en tiras de 11 mm x 19 mm, con un grosor de 0,35 mm. Para protegerlas y facilitar su manejo, se utilizaron hojas de laminación plástica transparente de la marca PANAFARGO. Se estandarizó un tamaño para asegurar la consistencia en las mediciones posteriores. En un extremo de cada tira, se creó un orificio rectangular. Este orificio fue esencial para el análisis espectroscópico, ya que expone directamente la biopelícula al haz de luz del espectrofotómetro. El proceso de laminación implicó aplicar calor con una plancha, lo que ayudó a sellar la biopelícula entre las capas de plástico. Esto no solo protegió la muestra, sino que también permitió un secado más uniforme y controlado.

Las láminas preparadas se sumergieron en soluciones de diferentes concentraciones durante una hora. Esto permitió que las biopelículas absorbieran los iones metálicos (cobre o hierro) de las soluciones. Después, las láminas se secaron en el horno a 30 °C por 24 horas, lo que aseguró la eliminación del exceso de humedad y estabilizó la muestra para el análisis. Posteriormente, se utilizó un espectrofotómetro UV-vis (190 a 900 nm) para determinar los cambios de color que son indicativos de la presencia y concentración de los iones metálicos absorbidos.

Para cada metal (hierro y cobre) se seleccionan longitudes de onda específicas para medir la absorbancia. Estas longitudes de onda y concentraciones se presentan en la tabla 1 para el cobre y, en la tabla 2 para el hierro. La medición a estas longitudes de onda específicas permitió una cuantificación más precisa de la concentración de cada metal.

Cada concentración se midió 10 veces. Los datos de absorbancia obtenidos se utilizaron para construir curvas de calibración que relacionan la absorbancia con la concentración del metal en la solución original.

Cada una de las concentraciones de cobre se evaluaron en las siguientes longitudes de onda.

Tabla 1. Concentraciones y longitudes del cobre (Cu^{+2})

Concentración (ppm)	Longitud de onda (nm)				
0	428	455	227		
3	433	226			
5	459	430	316	227	221
7	316	227			
10	457	428			
20	459	430	228		
30	460	430	229	225	

Las concentraciones de hierro se evaluaron en las siguientes longitudes de onda.

Tabla 2. Concentraciones y longitudes del hierro (Fe^{+3})

Concentración (ppm)	Longitudes de onda (nm)			
0	470	455	430	
3	455	427	228	
5	454	426	315	228
7	454	425	228	
10	454	425	228	
20	458	425	316	278
30	455	432	316	

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Aplicando la metodología se obtuvieron los siguientes resultados, las cuales se discutirán a continuación verificando el cumplimiento de los objetivos planteados.

5.1 Extracción del almidón

Como se mencionó anteriormente, se recolectaron los despuntes de la yuca en diferentes puestos de la plaza de mercado del municipio de Pamplona. En la Figura 4, se puede observar la selección de los despuntes que no tuvieran ningún signo de descomposición. Se inició el proceso de extracción con el registro de peso de cada despunte recolectado, contando 50 de ellos, con un peso promedio de $96,67 \pm 46,39$ g, la alta dispersión del dato se debe a las características heterogéneas del cultivo y a la altura a la que se realiza el corte. Posteriormente, se les retiró la cáscara que recubre la raíz de la yuca, la cual representó el $23,5 \pm 1,2$ % del total de la masa. De los trozos sin cáscara se extrajo la fibra y el almidón, para ello los trozos sin cáscara (pulpa) se dividieron en 10 fracciones cada una de aproximadamente 450 g.

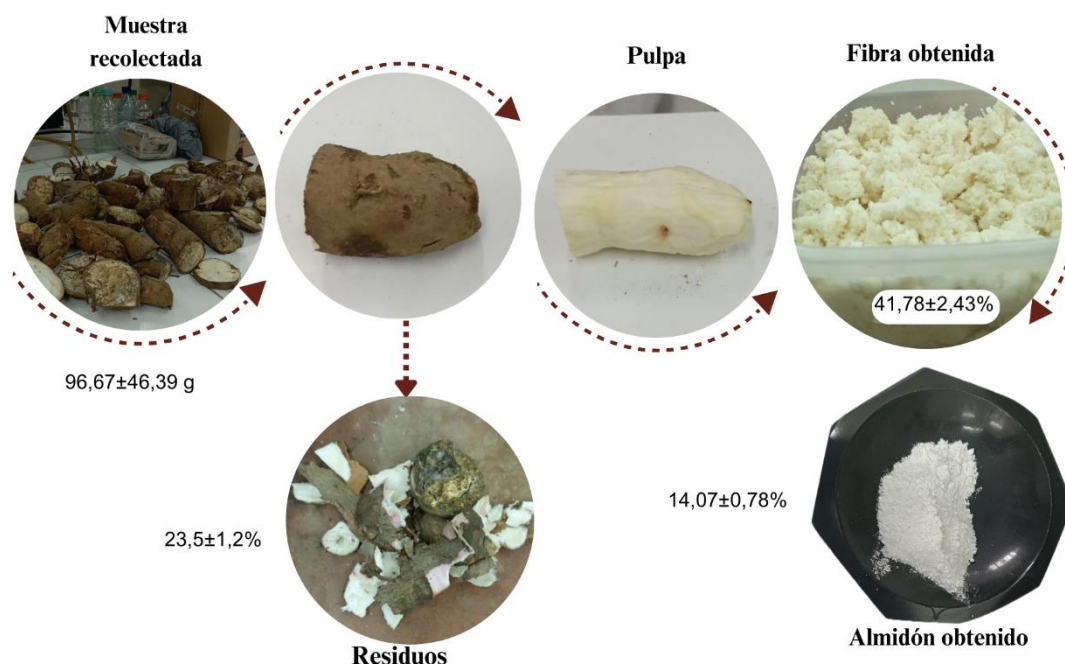


Figura 4. Proceso de extracción del almidón.

Luego de la extracción del almidón mediante la metodología indicada en la sección 3.5, se obtuvo $41,78 \pm 2,43$ % en peso de fibra y $14,07 \pm 0,78$ % en peso de almidón con

respecto a la masa de la pulpa. Estos resultados son comparables con los reportados por (Sriroth et al., 2000), quienes realizaron la extracción en la parte consumible de la yuca, obteniendo porcentajes de fibra de 43 % y de almidón del 13 al 15 %, lo que evidencia la viabilidad de usar desechos (despunte) para la extracción del almidón (Thuppahige, 2023).

Como se mencionó en las secciones 3.6 a 3.8, el almidón extraído se caracterizó mediante espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier con reflectancia total atenuada, análisis termogravimétrico, estudio morfológico y determinación de porcentaje de amilosa.

5.2 ATR-FTIR del almidón

En la Figura 5, se exhibe los espectros de 5 fracciones de la muestra seca de almidón. La similitud de los espectros (en el anexo A se puede consultar el espectro FT-IR en 3D) y el análisis de su primera y segunda deriva por PCA (anexo B) para dos componentes con un intervalo de representatividad de 99,92 %, permitió corroborar la reproducibilidad en la extracción debido a que los grupos funcionales característicos se encuentran en posiciones muy similares.

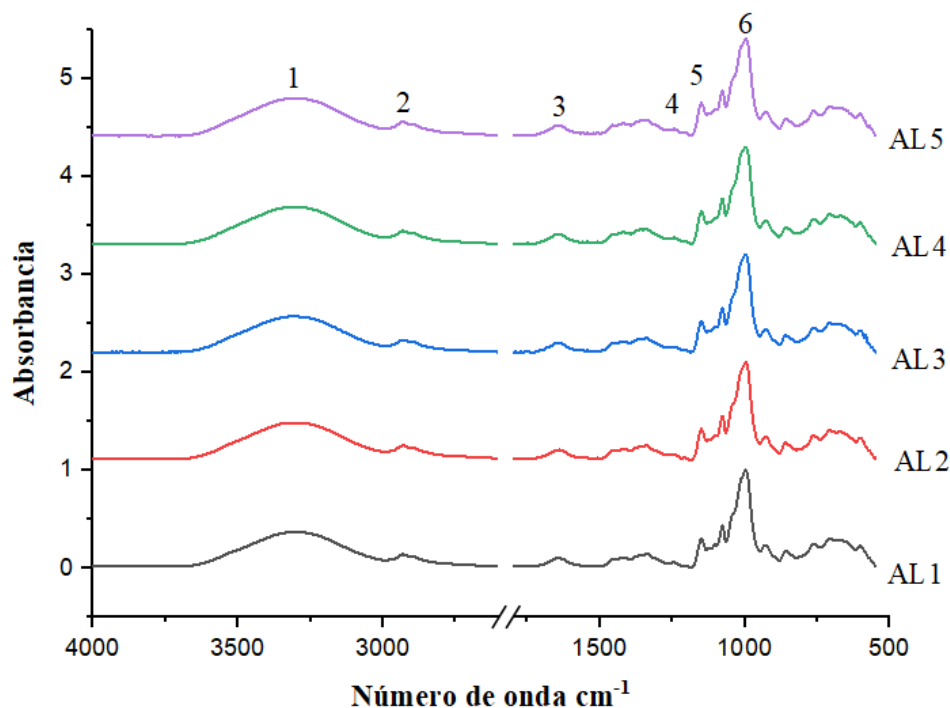


Figura 5. Espectro FT- IR del almidón de yuca.

A partir de la Figura 5, se logró la identificación de los grupos funcionales que se muestran en la tabla 3, los cuales, corresponden a una estructura del tipo glucosídica característica de la estructura de la amilosa y amilopectina que componen al almidón, lo cual concuerda con lo publicado por otros autores (Lomeli Ramirez et al., 2014); (Betiku & Alade, 2014); (Méité et al., 2024).

Tabla 3. Asignación de grupos funcionales del espectro de almidón de yuca

N°	Grupo funcional	Asignación de banda (cm ⁻¹)	Referencias
1	Vibración de estiramiento O-H	3.300	(Lomeli Ramirez et al., 2014),
2	Estiramiento C-H	2.927	
3	Deformación O-H	1.638	(Betiku & Alade, 2014),
4	Cadena lateral CH ₂ -OH	1.247	(Méité et al., 2024).
5	Estiramiento de C-O y C-C	1.145	(Perera et al., 2021)
6	Vibración tensión fuerte C-O-H	997	

5.3 Estabilidad térmica del almidón mediante TGA

La Figura 6, muestra el resultado del análisis termogravimétrico del almidón de yuca y su primera derivada. En ella se observa que el material presenta una pérdida de peso inicial de 16,43 % a una temperatura de 111,92 °C, atribuible al agua fisisorbida. El contenido de humedad de los almidones de acuerdo con lo establecido en el Codex Alimentarius es de 10,00 a 13,50 % para una muestra de almidón de buena calidad (Algar et al., 2019); (Karmakar et al., 2024). Posteriormente, se determinó la temperatura de descomposición principal que inicia alrededor de 270,17 °C, con una pérdida de masa de 82,32 % y termina en 343,72 °C con una pérdida de peso de 78,54 %, y, con una temperatura de descomposición (de acuerdo con la primera derivada) de 329 °C; esta estabilidad térmica es comparable con lo reportado por (Thuppahige et al., 2023), donde inicia teniendo una pérdida de masa de 13,50 %, que se presenta por la ruptura de las cadenas moleculares del almidón y la segunda pérdida de masa es de 74,56 %. En el termograma también se pudo determinar que el porcentaje de ceniza fue de 1,74 % a 499,67 °C, valor que concuerda con un estudio realizado por (Chinma et al., 2013) en el cual reportaron una variación de 0,45 a 2,67 %.

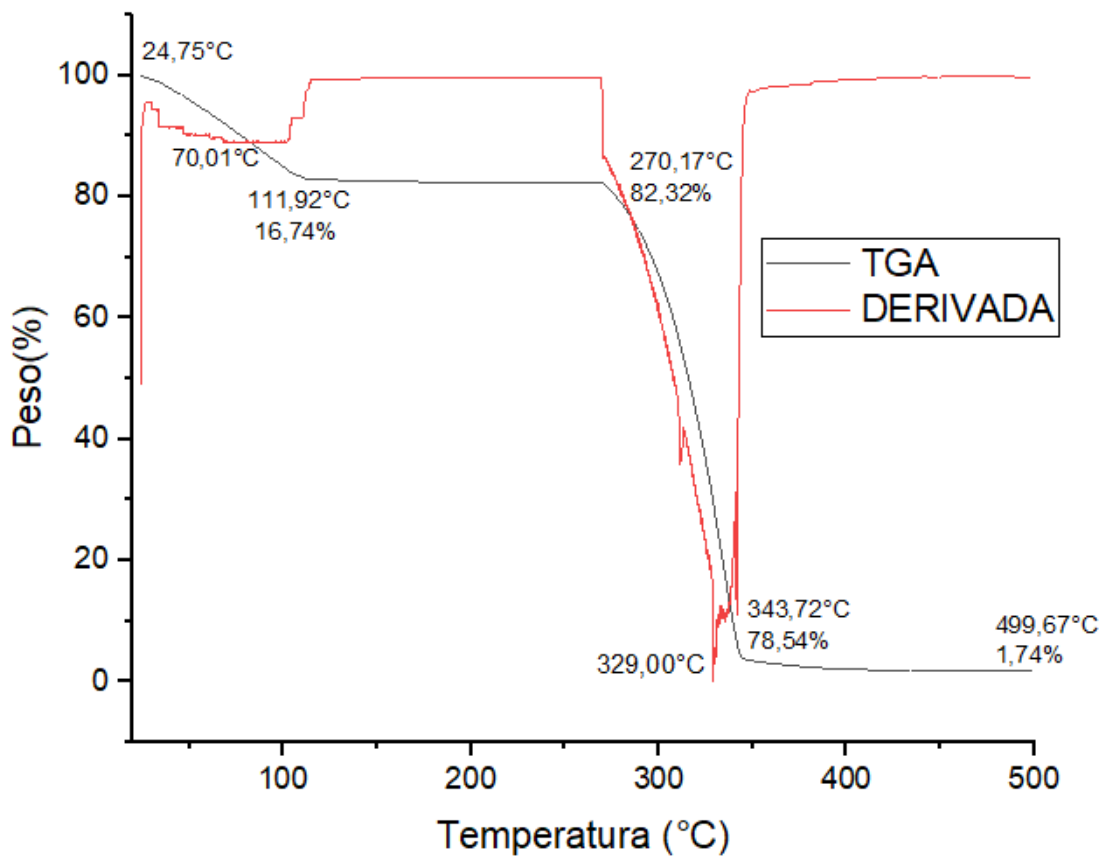


Figura 6. TGA con su derivada para el almidón de yuca

5.4 Morfología del almidón

La Figura 7, presenta un análisis morfológico detallado del almidón. En la Figura 7 (a) (micrografía SEM), se observa que los gránulos del almidón tienen un tamaño aproximado de 5 μm , no presentan una forma esférica, aunque presentan formas elipsoidales-truncadas con deformidades y las estructuras son lisas sin poros (Sívoli et al., 2009). En la Figura 7, (b, c, d, e) se presentan los registros fotográficos del almidón tomados con un microscopio a diferentes aumentos: (b) 4x. (c) 10x. (d) 40X, (e) 100x, al igual que en la micrografía SEM se nota que el gránulo del almidón no es totalmente esférico (Zambelli et al., 2024); (Méité et al., 2024); (Akonor et al., 2023).

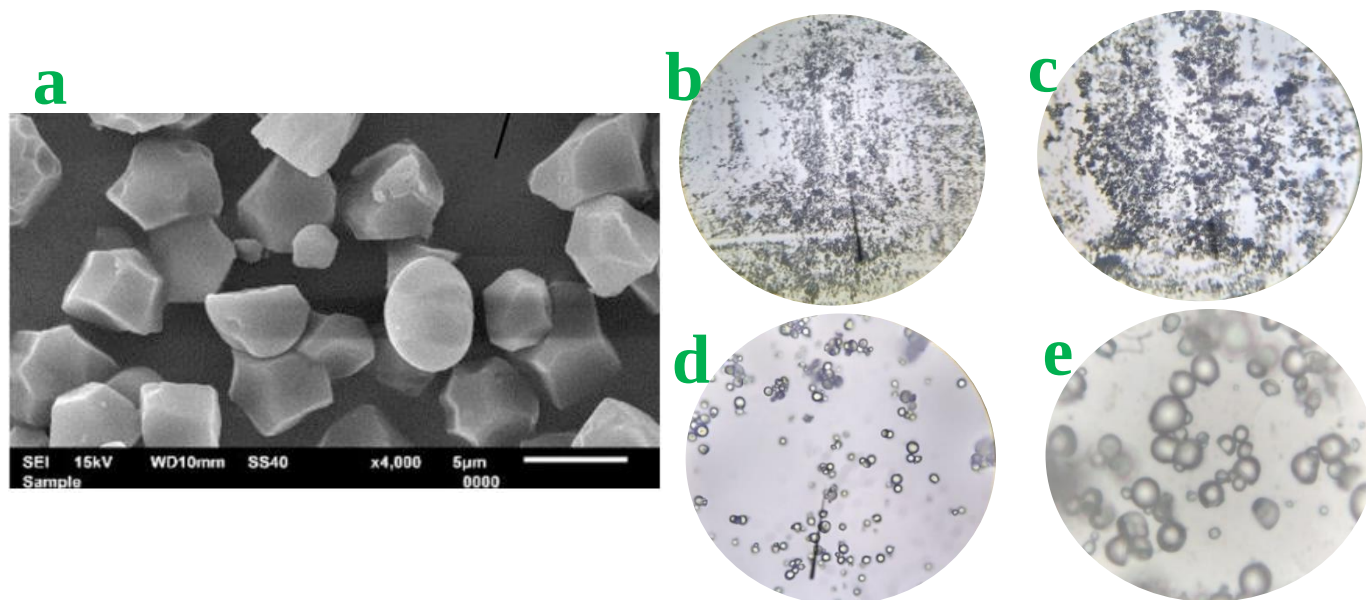


Figura 7. Morfología del almidón por SEM Y microscopio (a) SEM, (b) 4x. (c) 10x. (d) 40X, (e) 100x.

5.5 Determinación del porcentaje de amilosa

Como se mencionó anteriormente, el porcentaje de amilosa se determinó por espectroscopía UV-vis mediante un método colorimétrico, que permitió obtener una curva de calibración lineal (Figura 8) con una absorptividad del $0,0149 \text{ cm}^{-1}\%^{-1}$. Para 5 de las extracciones de almidón, a partir de la ecuación se calculó un porcentaje de amilosa de $17,40 \pm 1,11 \%$, este resultado se encuentra en el rango de lo reportado en literatura: 17 a 20 % de amilosa (Cruz-Benítez et al., 2019), (Akinde et al., s. f.), (Akonor et al., 2023), confirmando que de los desechos de yuca (despunte) se puede obtener almidón de buena calidad en cuanto al contenido de amilosa.

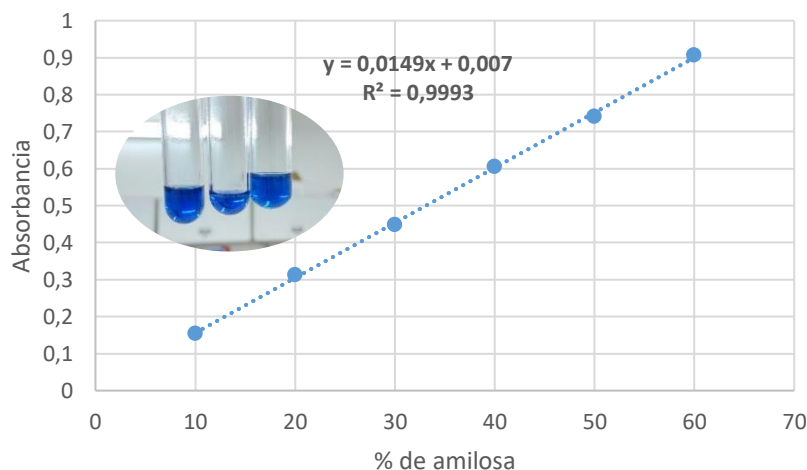


Figura 8. Curva de calibración de la amilosa

Una vez completada la caracterización del almidón, se procedió a elaborar el hidrolato en etanol de la cúrcuma.

5.6 Preparación del hidrolato de cúrcuma (*Curcuma longa*)

En la Figura 9, se muestra el proceso de elaboración del hidrolato de cúrcuma, del cual se realizaron 10 réplicas. La primera fase inició con la separación de la cáscara, obteniendo un $26,12 \pm 0,23$ % en peso de esta. Posteriormente, la cúrcuma pelada se sometió a un proceso de secado a una temperatura de 30°C , después del secado y molturado, se determinó el porcentaje de peso evaporado que fue de $74,17 \pm 0,67$ %. Este valor se encuentra dentro del rango esperado, considerando que estudios previos han reportado contenidos de humedad de hasta 83,16 % en rodajas de cúrcuma fresca (Ocampo Quintero & López, 2018); (Long et al., 2022a).

La elaboración del hidrolato se realizó a partir de la fracción secada a 30°C , obteniendo un porcentaje de peso disuelto de $6,27 \pm 0,80$ %. En la literatura el porcentaje de disolución varía de 3,5 a 7,4 % (Hazim et al., 2021); (Garimella & Pradhan, 2024a). Los resultados de esta investigación se encuentran dentro del rango reportado. Aunque la variación puede atribuirse a la metodología de cultivo y a las condiciones de potencia del equipo de ultrasonido usado para hacer el proceso de extracción (Yusoff et al., 2022); (Patil et al., 2021).

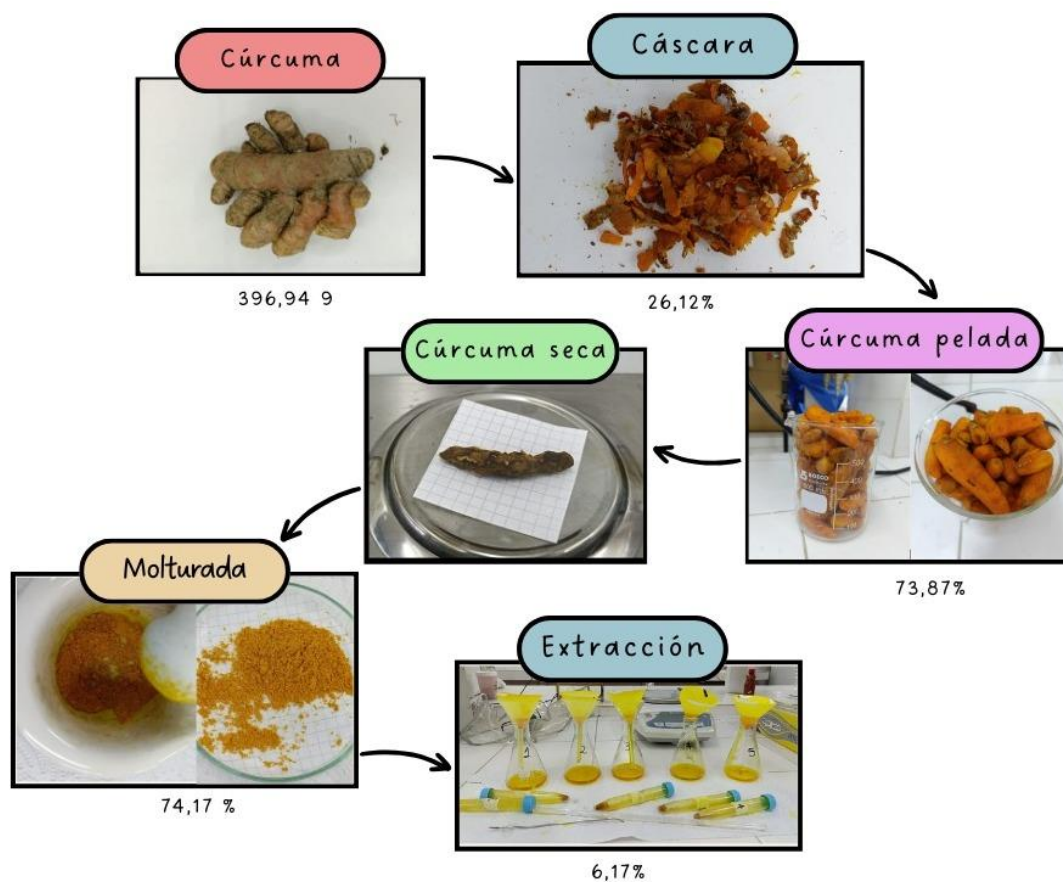


Figura 9. Proceso de extracción del hidrolato de cúrcuma

Para determinar los compuestos presentes en el hidrolato se realizó un análisis cromatográfico, que se presenta a continuación.

5.7 Cromatografía de masas acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)

En la Figura 10, se muestra el cromatograma GC-MS del hidrolato de cúrcuma, en el cual se pueden identificar 10 picos. El análisis se realizó en un rango de tiempo de retención de 9 a 13 minutos.

De acuerdo con la ruta de fragmentación de cada señal se logró identificar la fórmula molecular y nombre del compuesto, junto con su abundancia relativa, tal como se muestra en la tabla 4. La composición obtenida es concordante con lo reportado para extractos etanólicos de cúrcuma que buscaban ser aprovechados para análisis biológico (Carvalho et al., 2015);

(Pantharos et al., 2022). Aunque, Kasemwattananrot et al., 2024, reportaron que se obtiene mayor abundancia de tumeronas cuando los extractos se realizan con etanol del 13 a 31 %.

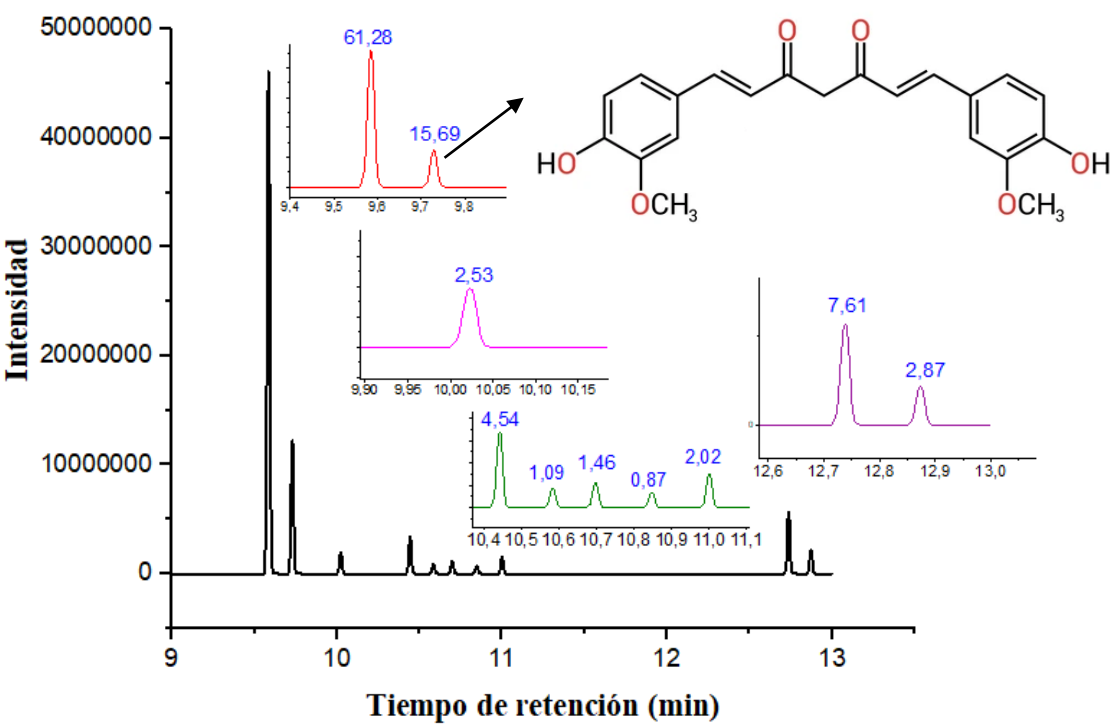
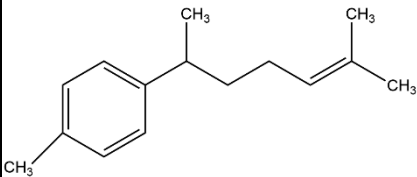
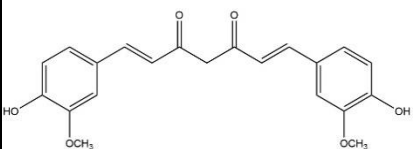
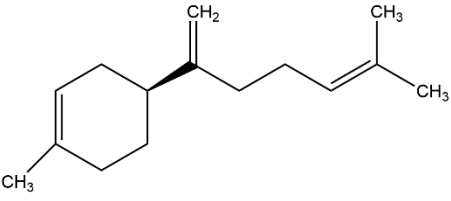
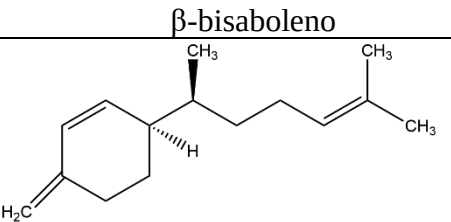
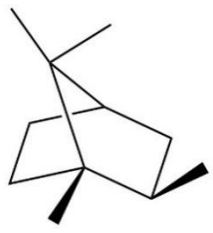
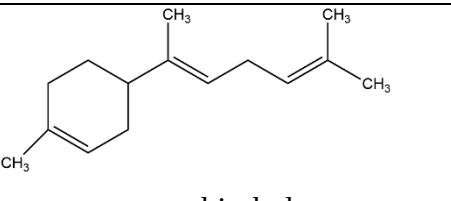
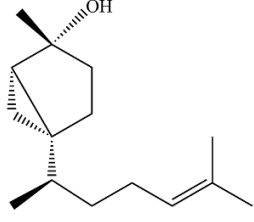
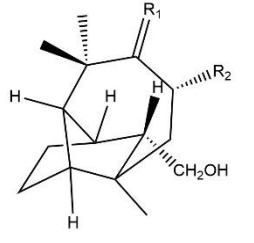
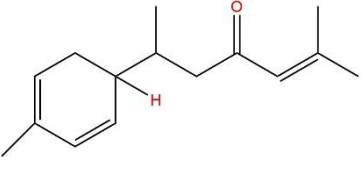
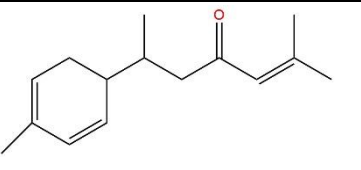


Figura 10. GC-MS del hidrolato de cúrcuma

Tabla 4. Identificación de compuestos en el hidrolato de cúrcuma (GC-MS)

Tiempo	Abundancia relativa	Estructura molecular y nombre	Referencia que reporta el compuesto en hidrolato
9,58	61,2818	 α-Curcumenol	(Barton & Chickos, 2020)
9,72	15,6985	 Curcumina	(Barton & Chickos, 2020)

10,02	2,5317	 β-bisaboleno	(Barton & Chickos, 2020)
10,44	4,5448	 β-sesquifelandreno	(Siripoltangman & Chickos, 2019)
10,58	1,0922	 Isoborneol	Siripoltangman & Chickos, 2019)
10,69	1,4618	 α -bisaboleno	(El-Sharoud et al., 2023)
10,84	0,8781	 hidrato de cis - sesquisabineno	(Sun et al., 2017)
11,00	2,0240	 Isolongifolol	(Choudhary et al., 2005)

12,74	7,6125	 α-Turmerona	(Dosoky & Setzer, 2018)
12,87	2,8746	 Turmerona	(Monton et al., 2019)

En la figura 11 se muestra el cromatograma de la curcumina y la posible ruta de fragmentación que permitió su identificación, la cual. está de acuerdo con lo reportado en literatura (Garimella & Pradhan, 2024b).

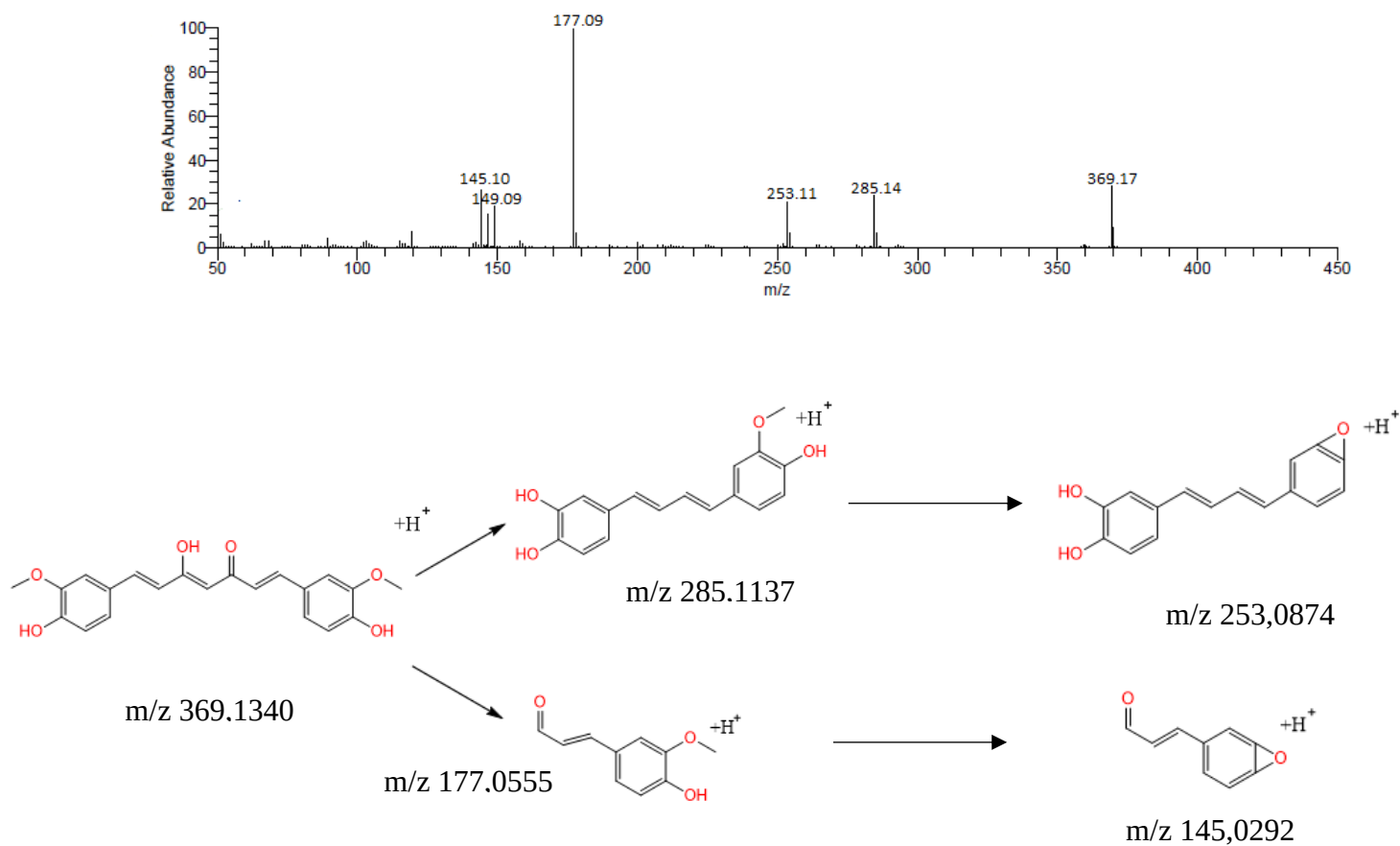


Figura 11. Espectro de masas y posible ruta de fragmentación

Establecida la composición presuntiva del hidrolato etanólico de la cúrcuma, se procedió a realizar su análisis por espectroscopía UV-vis en el rango de 900 a 190 nm.

5.8 Espectroscopía UV-vis del hidrolato de cúrcuma

Para la toma del espectro de absorción UV-vis mostrado en la Figura 12, se realizó una dilución del hidrolato original tomando 1 mL de este y diluyéndolo a 50 mL con etanol al 96 %, de esta dilución se tomaron 3 muestras que corresponden a D1, D2 y D3. En el espectro se observan tres máximos de absorción así: a 468 nm atribuibles a la α -tumerona y tumerona (Dosoky & Setzer, 2018); a 415 nm correspondientes a la curcumina y α -curcumeno (Barton & Chickos, 2020); y a 239 nm atribuibles a los grupos insaturados totales que tiene el hidrolato (Barton & Chickos, 2020); (Hoang et al., 2016).

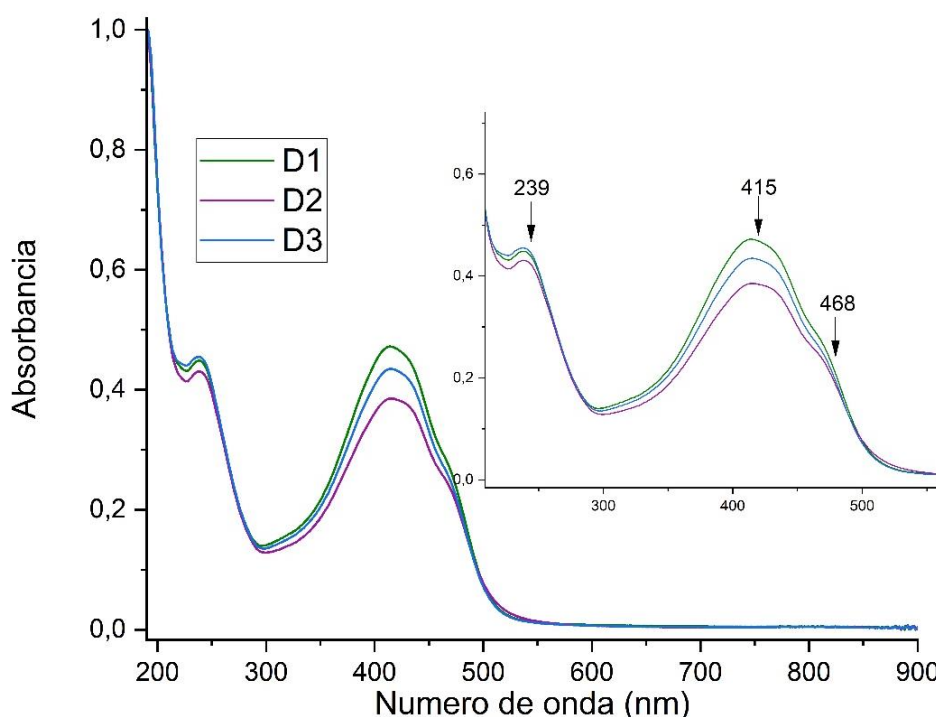


Figura 12. Espectro UV-vis del hidrolato de cúrcuma

De acuerdo con lo mencionado en la sección 4.2, se tomaron espectros IR de la cúrcuma deshidratada antes y después de la preparación del hidrolato, a continuación, se muestran los resultados.

5.9 Análisis infrarrojo de la cúrcuma antes y después de la extracción

En la Figura 13. se exhiben dos de los espectros ATR-FTIR normalizados de la cúrcuma en polvo antes y después de la extracción con etanol al 96 %. Para la toma de los espectros se seleccionaron 10 réplicas (5 antes de la extracción y 5 después de la extracción), (en los anexos C y D se encuentran los espectros de las réplicas que no se muestran en la Figura 13).

Los cambios encontrados en algunas regiones de los espectros se señalan con círculos negros y corresponden a: la vibración de estiramiento C=C que se encuentra de 600 a 1.654 cm^{-1} presenta la ausencia bandas en el sector cercano a 1.630 cm^{-1} (3), disminución de la intensidad en la vibración de estiramiento de C=C en 1.512 cm^{-1} (4), en la flexión de CH_2 en 1.430 cm^{-1} (5), en las vibraciones de estiramiento de C–O rango 1.277 – 1.146 cm^{-1} (9) y vibraciones de C–O y vibraciones de C–H 853 - 804 cm^{-1} (10).

Estos cambios son concordantes con los compuestos químicos encontrados en el hidrolato mediante el análisis por GC-MS, puesto que, después de la extracción la cúrcuma ha perdido compuestos con estos grupos funcionales. Adicionalmente, en la literatura se ha reportado diversas causas en los cambios de algunas bandas del espectro infrarrojo: entre las que se resalta el efecto de la disolución de componentes y la degradación de metabolitos debido a la metodología de extracción (Long et al., 2022b);(Fernández-Marín et al., 2021);(Kusumadewi et al., 2022).

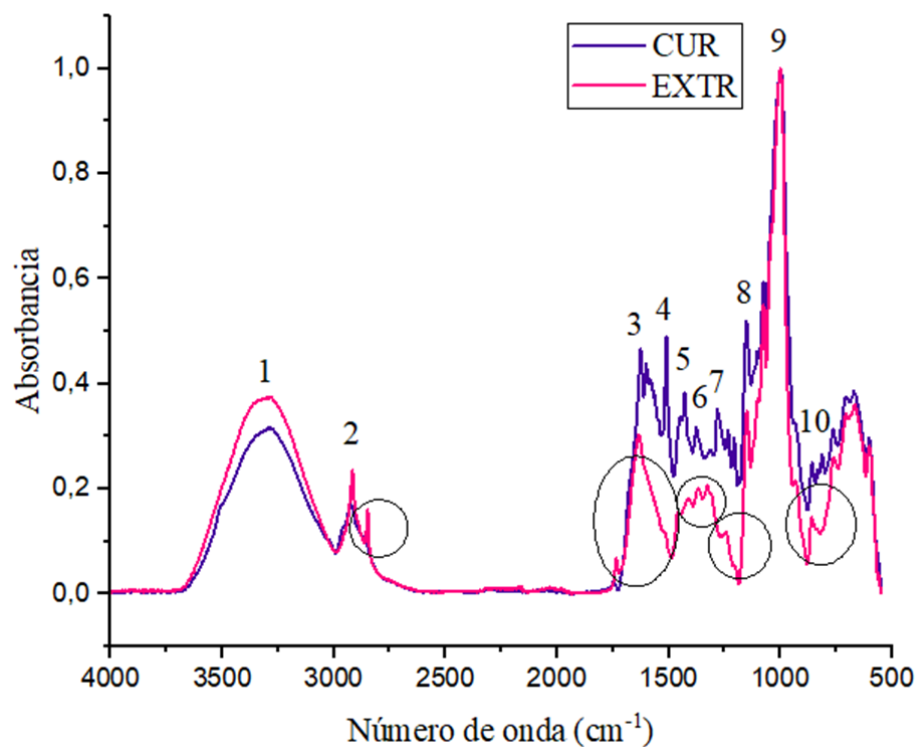


Figura 13. Espectros FTIR de la cúrcuma antes de la extracción (CUR) y la cúrcuma después de la extracción etanólica (EXTR)

En la tabla 5, se consigna la información contrastada con literatura de los grupos funcionales que están presentes tanto en la cúrcuma antes y después de la extracción; de acuerdo con la Figura 13. Se realizó una comparación cualitativa de los espectros con una línea base spline.

Tabla 5. Asignación de los grupos funcionales de la cúrcuma antes y después de la extracción

Nº	Grupo funcional (cúrcuma)	Asignación de banda (cm ⁻¹)	Referencia
1	Estiramiento de O-H	3.300	(Long et al., 2022a)
2	Estiramiento CH ₃ -CH ₂	2.922	
3	Estiramiento de C=O y C=C	1.627-1.600	
4	Vibración de estiramiento C=C	1.512	(Fernández-Marín et al., 2021),
5	Flexión de CH ₂	1.430	
6	flexión de -CH en O = C-CH ₂ -C = O	1.377	

7-8	Vibración de estiramiento C-O	1.277 – 1.146	(Kusumadewi et al., 2022)
9	Estiramiento C-OH	1.002	
10	Vibraciones de C–O y vibraciones de C–H	853-804	(Perera et al., 2021)

Considerando las variaciones en las absorbancias observadas en la región de la huella dactilar de los espectros infrarrojos de la cúrcuma (antes y después de la extracción), se implementó la metodología propuesta por (Perera et al., 2021). Donde se realiza un análisis de componentes principales (PCA) para la clasificación de los espectros. Este enfoque implica el cálculo de la segunda derivada del espectro, previamente suavizado y sin línea base, para evitar que la determinación de esta última altere la intensidad de las señales.

En la Figura 14, se muestra el análisis PCA resultante, mediante el cual se logra establecer que las componentes se pueden reducir a dos, con un porcentaje de representatividad del 79,31 % del total de la información. Lo anterior, permite corroborar que la cúrcuma antes de la extracción (Cur), es diferenciable por ATR-FTIR de la cúrcuma después de la extracción (Ext) (Perera et al., 2021). Lo anterior, plantea la posibilidad de hacer seguimiento espectroscópico de la extracción cuando no se cuente con suficientes recursos para el seguimiento por métodos cromatográficos.

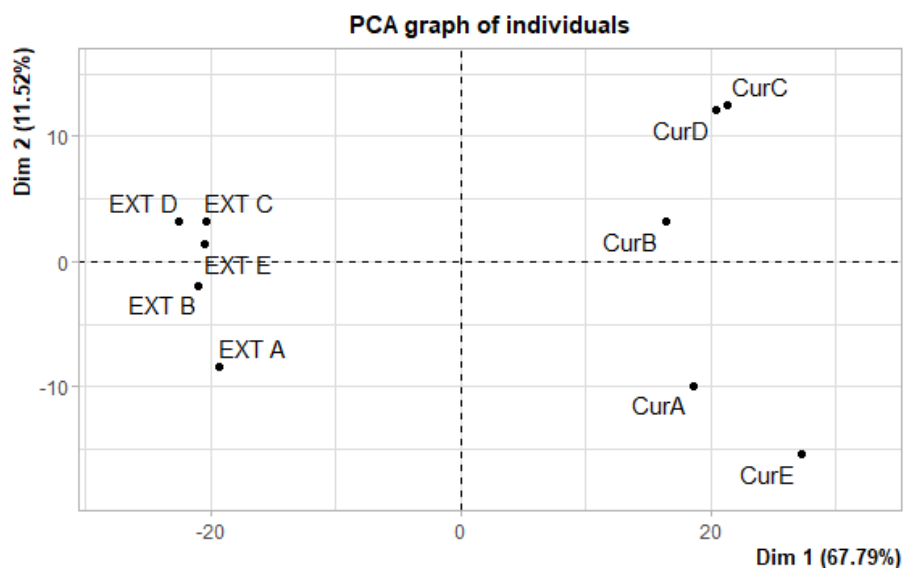


Figura 14. PCA antes (Cur) (A, B, C, D, E) y después de la extracción etanólica (EXT) (A, B, C, D, E) con Rstudio

Habiendo caracterizado el almidón, la cúrcuma (antes y después de la extracción) y el hidrolato de cúrcuma, se procedió a la síntesis de las biopelículas.

6. SÍNTESIS DE LAS BIOPELÍCULAS

Se sintetizaron dos tipos de biopelículas; unas de almidón de yuca y otras de almidón con hidrolato de cúrcuma, el porcentaje de hidrolato de cúrcuma en la composición inicial fue de 3,10 %, y el proceso de preparación se muestra en la Figura 15. Las biopelículas presentaron unas características físicas similares, flexibilidad, delgadez y una apariencia homogénea, las dimensiones de las biopelículas fueron: diámetro de $87,82 \pm 0,34$ mm, un radio de $43,91 \pm 0,49$ mm, con un grosor de $0,35 \pm 0,05$ mm. El parámetro comparable con la literatura es el grosor, el cual depende de la aplicación que se le quiera dar a la biopelícula. Para empaques y recubrimientos se espera que sea alrededor o por debajo de 0,30 mm (Bodírlău et al., 2012); (Ilvis et al., 2024), en este caso se decidió aumentar el grosor a 0,35 mm con el objeto de favorecer la interacción con el agua durante la detección del metal.

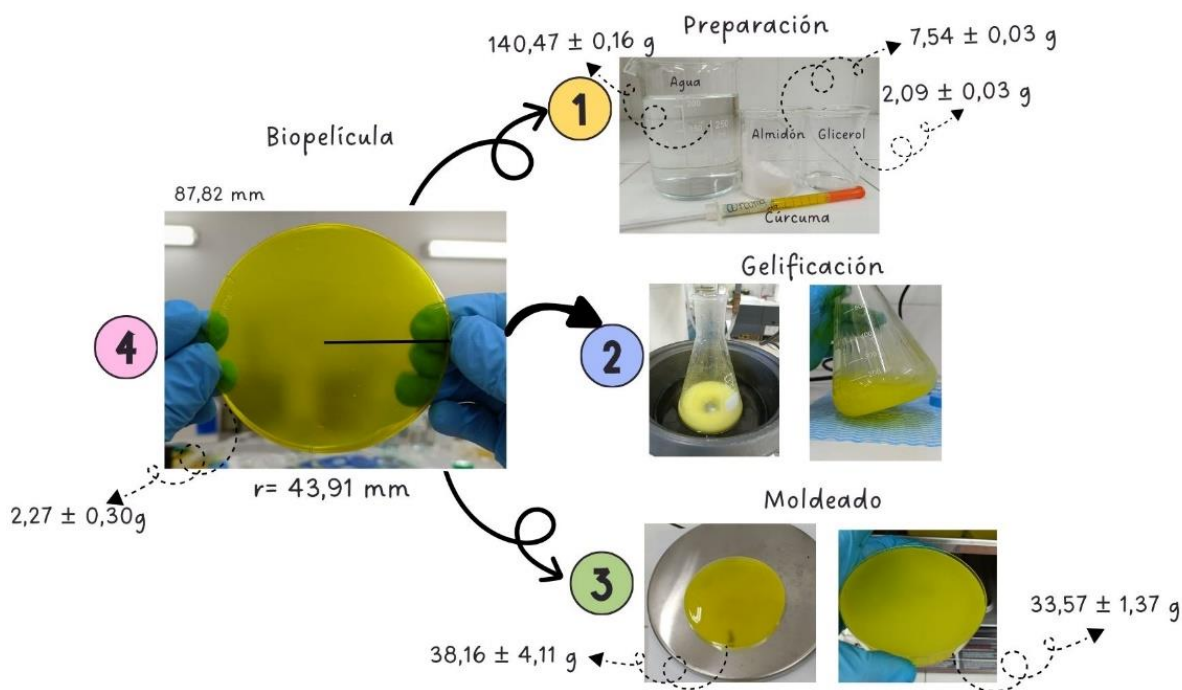


Figura 15. Proceso de pesado y síntesis de las biopelículas

Las biopelículas obtenidas presentaron una distribución homogénea del color procedente de la adición del hidrolato. Para corroborar que la morfología se conservó, se realizó un análisis por SEM.

6.1 Análisis SEM de las biopelículas con cúrcuma y con almidón de yuca

En la Figura 16, se presentan las imágenes tomadas por el microscopio electrónico de barrido para las dos clases de biopelículas sintetizadas: las biopelículas de almidón de yuca y las biopelículas de almidón con hidrolato de cúrcuma. En ellas se evidencia una morfología lisa, sin grietas y porosa, que demuestra la homogeneidad y la generación de alteraciones en el área superficial con la incorporación del hidrolato al biopolímero (de Castro et al., 2024).

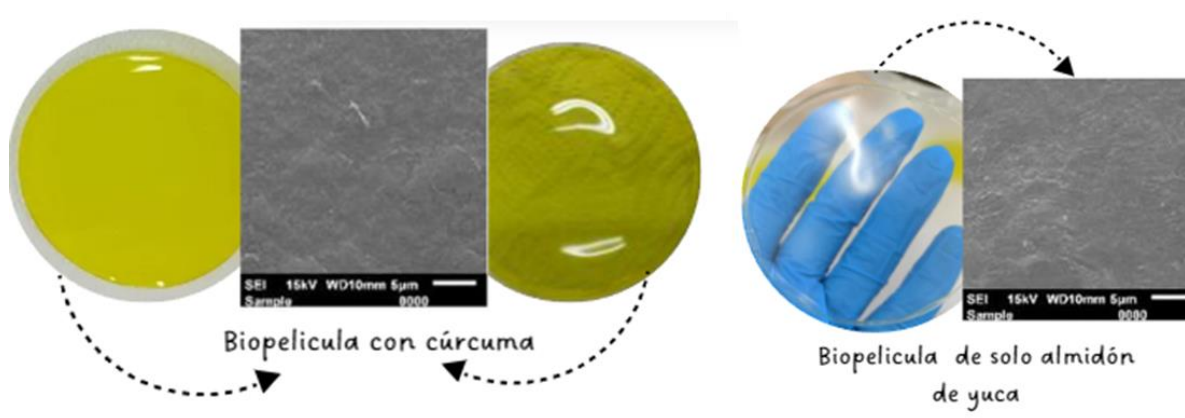


Figura 16. Análisis SEM de las biopelículas con almidón de yuca y con hidrolato de cúrcuma

A partir del análisis SEM y lo observado en la coloración a nivel macro, se pudo establecer la homogeneidad en la distribución del hidrolato en la biopelícula. A continuación, se presentan su caracterización por análisis ATR-FTIR y TGA.

6.2 Análisis ATR-FTIR de las biopelículas de almidón y con hidrolato cúrcuma

En la Figura 17, se presentan los espectros de infrarrojo de las biopelículas con almidón de yuca (BIOP BLANCO) y las biopelículas de almidón con hidrolato de cúrcuma (BIO CUR) de una de las 10 réplicas tomadas, (los espectros IR de las réplicas para las biopelículas con almidón y las biopelículas con hidrolato de cúrcuma se encuentran en los anexos E y F). Se observa que las señales son muy similares, en la mayor parte del rango espectral, aunque, se advierte un leve aumento en la región de 2.922 cm^{-1} en la biopelícula que está impregnada con el hidrolato, debido al aumento de compuestos con grupos metilos

CH₃ y metileno CH₂. La similitud entre los espectros (biopelícula con y sin hidrolato) se puede atribuir a la baja concentración de los metabolitos que se calcula en promedio de 15 a 100 ppm, una vez la biopelícula se ha secado, ya que lo reportado indica que la detección sobre matrices orgánicas en un análisis infrarrojo suele ser superior a 500 ppm en matrices con amplio contenido de grupos polares como los hidroxilos y carbonilos.

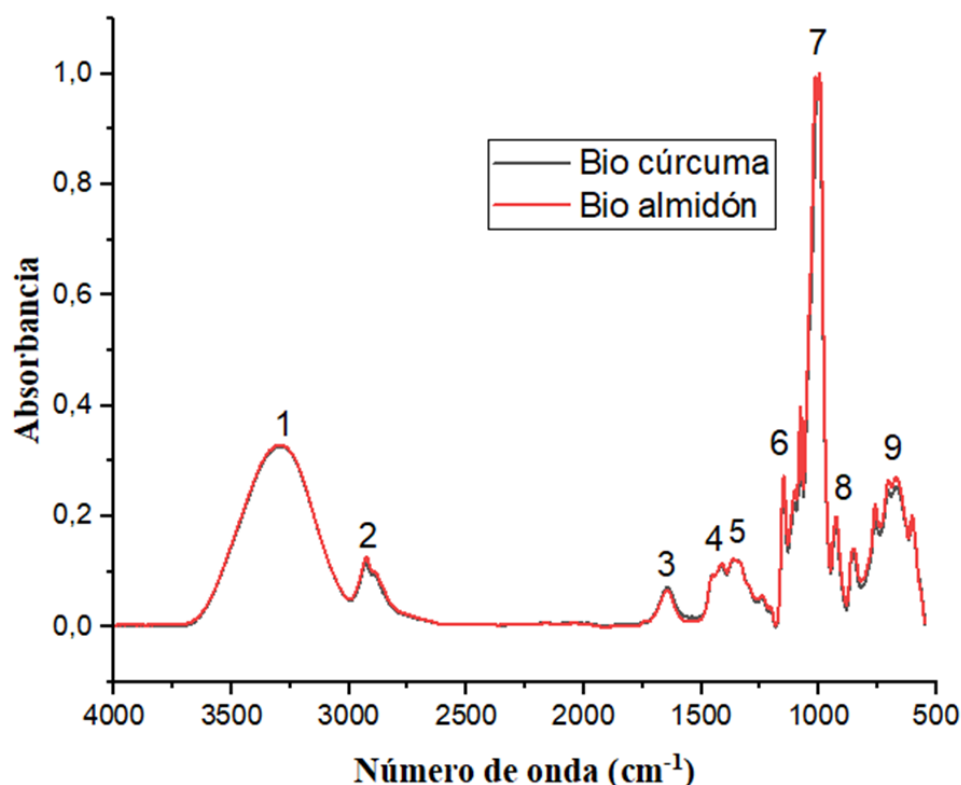


Figura 17. Espectros FT- IR de las biopelículas con almidón (BIOP BLANCO) y con almidón e hidrolato de cúrcuma (BIOP CUR)

En la tabla 6, se consigna la información contrastada con literatura de los grupos funcionales que están presentes en las biopelículas sin hidrolato.

Tabla 6. Asignaciones de las biopelículas de almidón de yuca y biopelículas de hidrolato de cúrcuma.

N°	Grupo funcional (cúrcuma)	Asignación de banda (cm ⁻¹)	Referencias
1	Estiramiento de O-H	3.300	(Hernández et al., 2024)
2	Estiramiento CH ₃ -CH ₂	2.922	

3	Flexión O-H	1.642	
4	Vibración de reflexión de C-H y C-C	1.407-1.456	(Gómez-Bachar et al., 2024)
5	Vibración de estiramiento C-O y C-C	1.200-1.370	
6	Estiramiento C-O-C	1.150	
7	Estiramiento C-O y deformaciones C-OH	1.000	(Wu et al., 2024)
8	Vibración del anillo de glucosa	1.146-854	
9	Deformaciones de CH	700-800	

A continuación, se presenta el análisis de la estabilidad térmica de las biopelículas con y sin hidrolato.

6.3 Análisis termogravimétrico TGA de las biopelículas de almidón sin hidrolato

Como se puede observar en la Figura 18. las biopelículas de almidón de yuca presentan dos etapas principales de pérdida de peso, la primera inicia a una temperatura de 24,14 °C y finaliza a una temperatura de 109,64 °C con un porcentaje de pérdida de 16,91 %. Se calculó la primera derivada para encontrar la temperatura de la máxima pérdida que ocurrió a 70,61 °C. Posteriormente, se identificó la temperatura de descomposición, que inicia alrededor de 279,68°C con una pérdida de masa de 82,05 % y, termina a 344,25 °C con una pérdida de masa de 78,71%. También se calculó la primera derivada para encontrar la temperatura de descomposición que se presentó a 328,52 °C. Los resultados son comparables con lo reportado por (Betancur-D´Ambrosio et al., 2024), donde en esta etapa, la mayor tasa de degradación térmica ocurre a una temperatura aproximada de 312 °C y es atribuible a la degradación de las cadenas de almidón, explicada por los enlaces éter y las estructuras insaturadas que se forman a partir de la condensación térmica de los grupos hidroxilo de las cadenas de almidón, eliminando así el agua fuertemente unida y las moléculas de bajo peso molecular (Mueller et al., 2024). Posteriormente a la degradación se pudo determinar el porcentaje de ceniza que fue de 1,34 % a una temperatura de 496,19 °C, valores que concuerdan con una investigación realizada por (Tapia-Blácido et al., 2005), el contenido de ceniza en la muestra varió de 1,3 % a 1,6 %.

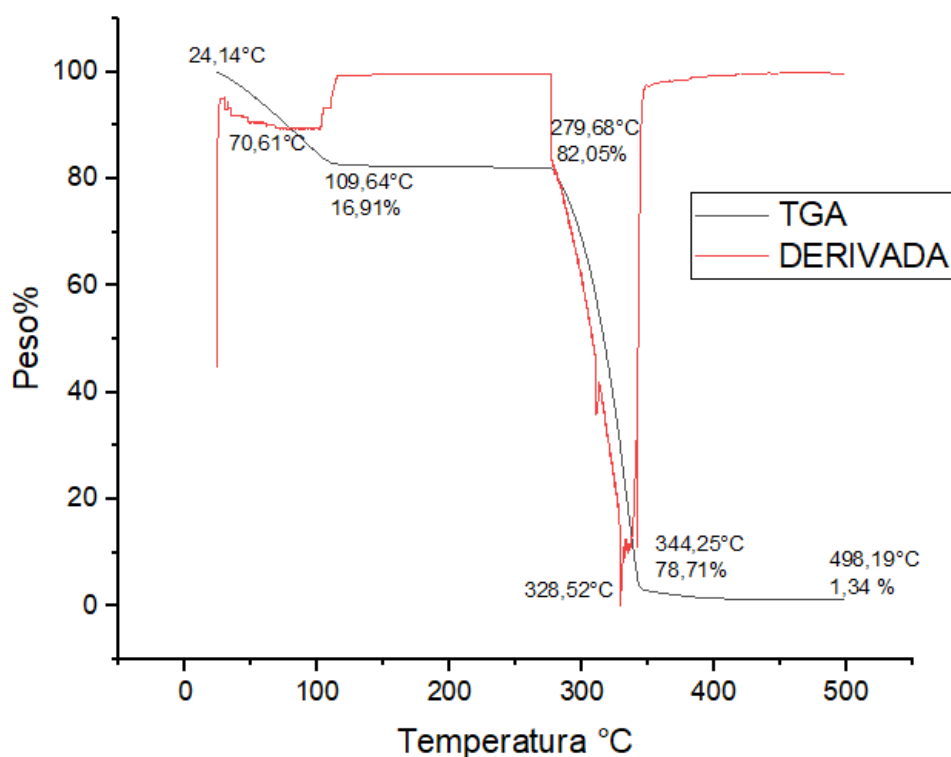


Figura 18. TGA con su segunda derivada para las biopelículas de almidón

6.4 Análisis termogravimétrico TGA de las biopelículas con hidrolato de cúrcuma

En la Figura 19, se muestra el termograma de las biopelículas de almidón de yuca con hidrolato de cúrcuma, que presenta dos etapas principales de pérdida de peso, la primera inicia a una temperatura de 52,28 °C y finaliza a 68,33 °C; con un porcentaje de pérdida de masa de 2,89 %. También, se identificó la temperatura de descomposición principal, que inicia con una pérdida de masa de 96,04 % a 262,31 °C y termina a 345,34 °C, con una pérdida de masa de 91,68 %. Con la primera derivada se determinó que la temperatura de descomposición fue de 329,06 °C, un valor ligeramente mayor al encontrado para la biopelícula usada como blanco. El porcentaje de ceniza fue de 2,35 % a 497,87 °C; valores que concuerdan con lo reportado por (Boonkanon et al., 2020).

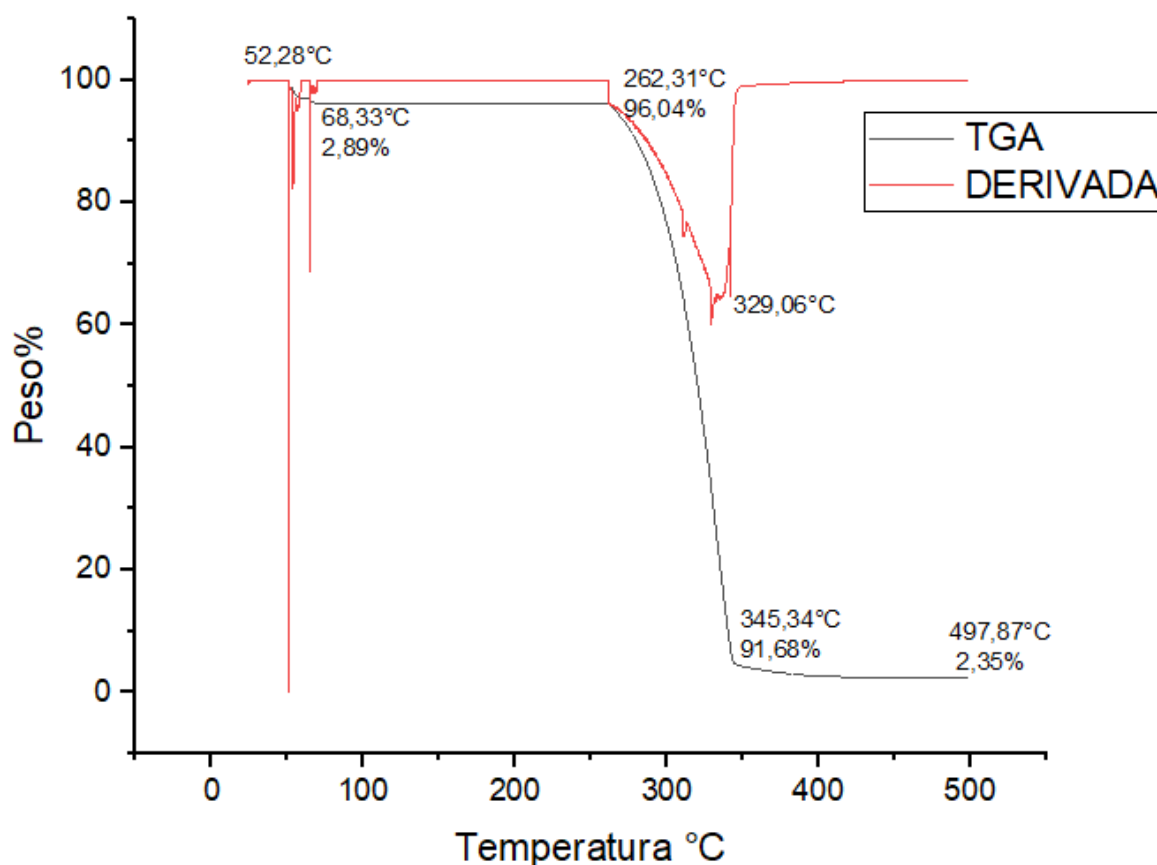


Figura 19. Termograma TGA de las biopelículas de almidón con hidrolato de cúrcuma

Para continuar con la caracterización de las biopelículas se procedió a calcular la permeabilidad en agua, para ello se obtuvo una pendiente lineal al graficar la masa ganada por el cloruro de calcio vs el tiempo, tal como se muestra en la Figura 20. (Fakhouri et al., 2004). Con la ecuación 1, se determinó la pendiente con la cual se estableció que la permeabilidad del material es de $7,90 \times 10^{18} \pm 0,20 \text{ g*mm/m}^2\text{kPa*h}$, lo anterior indica que el material tiene buena permeabilidad al vapor de agua para permitir solventes polares y es comparable a los resultados reportados en la literatura para biopolímeros con esta propiedad, valores de $5,0 \times 10^{18}$ a $20 \times 10^{18} \text{ g*mm/m}^2\text{kPa*h}$ (Fakhouri et al., 2004).

Ecuación 1. Permeabilidad

$$\text{Permeabilidad} = \frac{W * x}{A * \Delta p}$$

Donde w es la pendiente, x es el grosor de la biopelícula, A es el área de la biopelícula, Δp es el cambio entre la presión interna del recipiente y la presión externa.

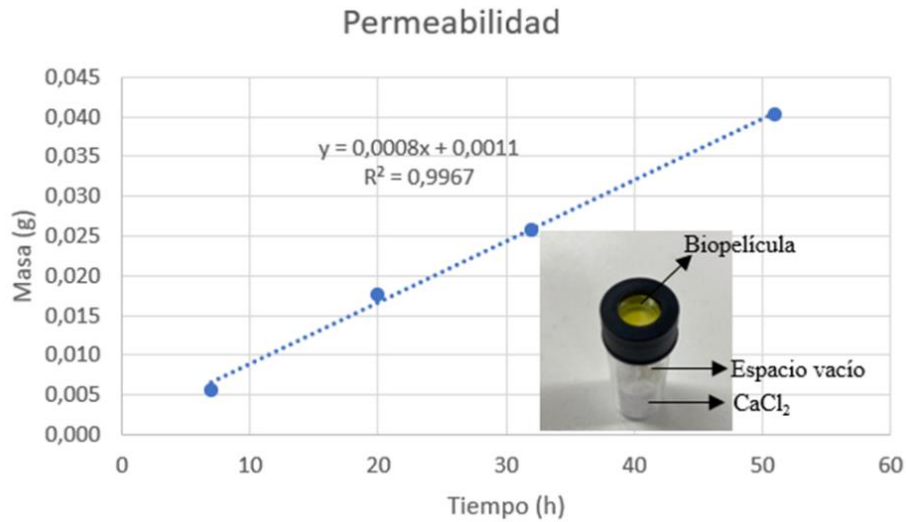


Figura 20. Curva de calibración de la permeabilidad

A continuación, se muestran los resultados de detección de hierro y cobre.

6.5 Detección de hierro y cobre

Para la detección de los metales por espectroscopía UV-vis fue necesario hacer una adaptación para la biopelícula (Figura 21) que permitiera la lectura en el equipo, emulando la celda que usualmente se usa para esta técnica. Para ello, se recortaron las biopelículas y se colocaron entre un orificio rectangular (10 mm x 15 mm) hecho en dos láminas plásticas transparentes de marca Panafargo (12,83 mm x 51,13 mm), que en adelante se nombrarán como “láminas de detección”.

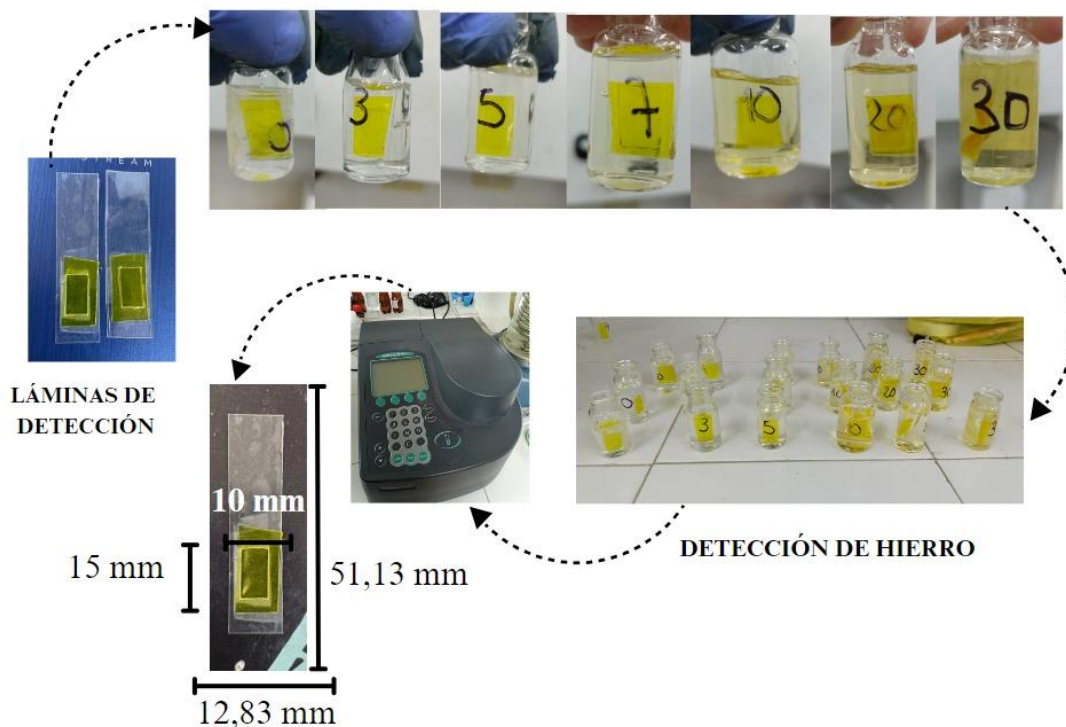


Figura 21. Proceso de detección de hierro

Las láminas de detección (Figura 21) se sumergieron durante 1 hora en las soluciones de nitrato ferroso a concentraciones de 0, 3, 5, 7, 10, 20 y 30 ppm. Durante este tiempo, no hubo decoloración de la biopelícula, lo que denota la estabilidad de la misma. Al terminar el tiempo de inmersión, el sector diseñado como paso óptico presentó un cambio de color de amarillo a marrón por la interacción de la curcumina con los iones Fe^{+3} , formando el complejo; concordando con lo reportado (Vonnice et al., 2022), (en el anexo G se muestra el espectro IR de las láminas de detección de hierro y en el anexo I el PCA de la detección de hierro).

Para la cuantificación del complejo mediante espectroscopía UV-vis, las láminas de detección (10 por cada concentración) se secaron al ambiente durante aproximadamente 24 horas. Posteriormente, se realizaron lecturas a una longitud de onda de 455 nm, utilizando como blanco la lámina con 0 ppm de complejo. Con los datos de lectura del equipo se realizó la curva de calibración (Figura 22) que mostró un comportamiento exponencial, característico de la formación de complejos ligando-metal, en los cuales pequeños cambios en la concentración producen grandes variaciones en la absorbancia. En este caso, se encontró que para concentraciones superiores a 10 ppm el valor de absorbancia es muy pequeño. Estos

resultados concuerdan con lo reportado por (Noble & Bailey, 2009), quienes, al intentar cuantificar proteínas, notaron que el cromóforo pierde intensidad de absorción y, por tanto, solo puede cuantificarse en un rango limitado de concentración.

Aunque se confirma la ausencia de otros metabolitos ceto-enólicos con capacidad de coordinación, el alcance de esta investigación no contemplaba establecer la interacción entre la biopelícula y el metal. Futuras investigaciones podrían centrarse en un análisis XPS para determinar los tipos de enlaces que se forman entre el hierro y la biopelícula con hidrolato de cúrcuma.

La Figura 23 exhibe los espectros UV-vis de las láminas de detección impregnadas con diferentes concentraciones de hierro, revelando en todos los casos se presentan cuatro picos a 450 nm, 428 nm, 316 nm y 270 nm.

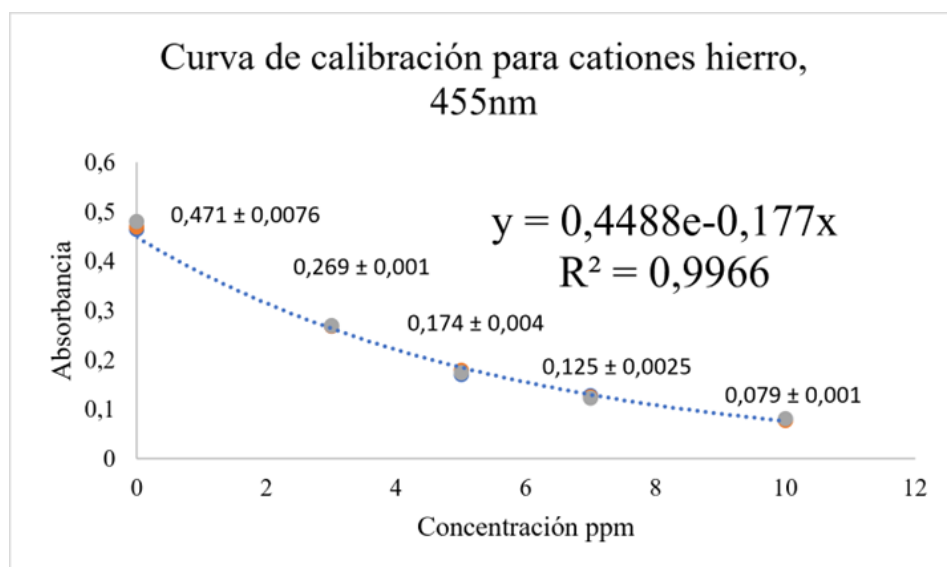


Figura 22. Curva de calibración de detección de hierro

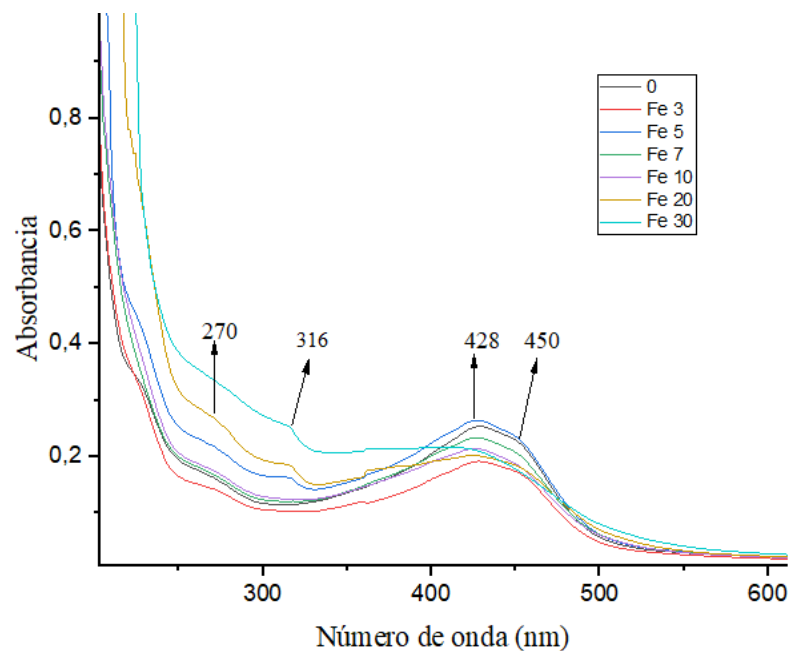


Figura 23. Espectro UV-vis de las láminas de hierro a diferentes concentraciones

Para la detección del cobre, se siguió el mismo proceso de elaboración de las láminas de detección (10 para cada concentración), tiempo de inmersión de la biopelícula, y secado descrito anteriormente. El cambio de coloración observado en la biopelícula fue de amarillo a rojo (Figura 24).



Figura 24. Proceso de detección de cobre

Para la cuantificación por espectroscopía UV-vis del complejo con cobre, las láminas de detección se midieron a una longitud de onda de 430 nm; utilizando como blanco la lámina con 0 ppm de complejo. Con los datos de lectura del equipo se realizó la curva de calibración (Figura 25) que presentó el mismo comportamiento exponencial que se observó para el complejo con hierro, y, el mismo límite de cuantificación de 10 ppm, (en el anexo H se

encuentra el espectro IR de las láminas de detección de cobre y en el anexo J el PCA de la detección de cobre).

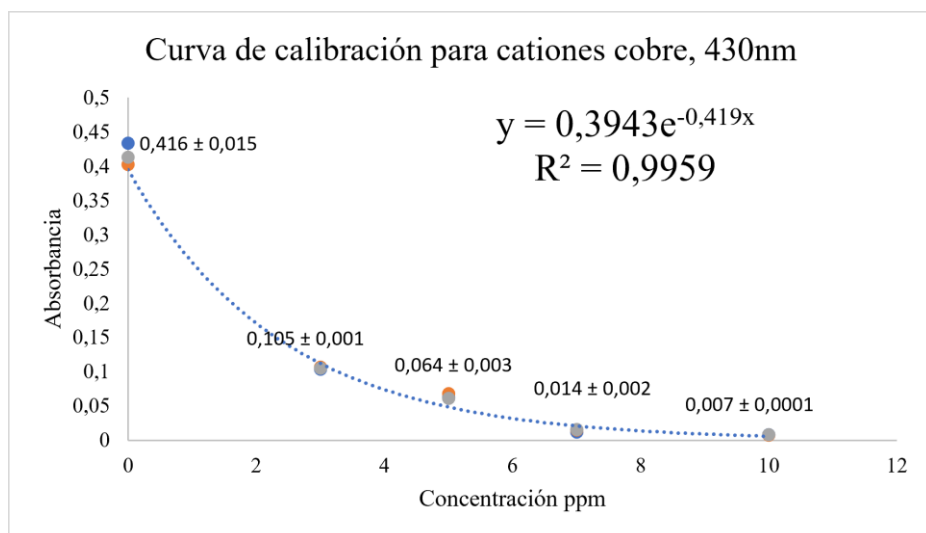


Figura 25. Curva de calibración de la cuantificación de las absorbancias de cobre

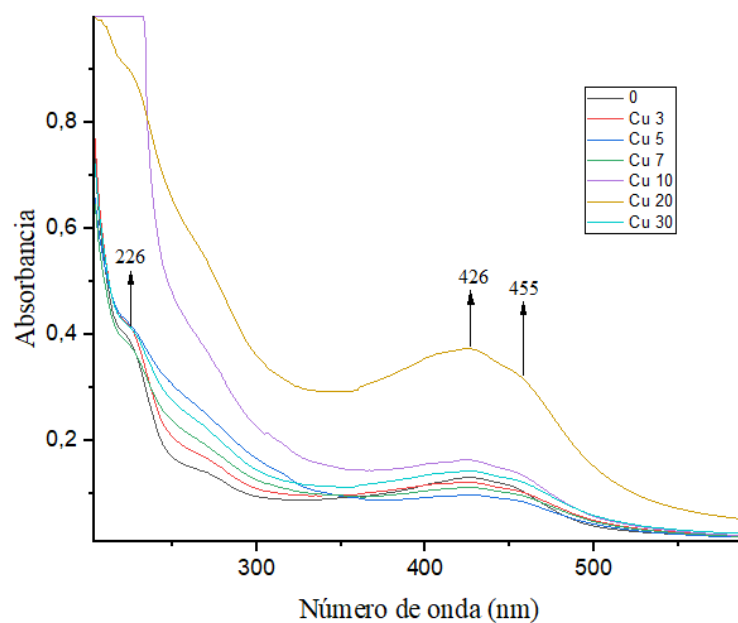


Figura 26. Espectro UV-vis de las láminas de cobre a diferentes concentraciones

La Figura 26 exhibe los espectros UV-vis de las láminas de detección impregnadas con diferentes concentraciones de cobre, revelando que para todas se presentan tres picos a 455 nm, 426 nm y 226 nm.

CONCLUSIONES

El estudio de los residuos de yuca reveló un potencial significativo para la obtención de almidón y fibra, con rendimientos del $14,07 \pm 0,78$ % y $41,78 \pm 2,43$ % respectivamente. El almidón extraído mostró características físicas y químicas consistentes con lo reportado en la literatura, incluyendo una morfología elipsoidal truncada y un contenido de amilosa del $17,40 \pm 1,11$ %.

La síntesis de biopelículas a partir del almidón obtenido, incorporando hidrolato de cúrcuma, resultó en un material con propiedades prometedoras para diversas aplicaciones. Estas biopelículas exhibieron una estructura homogénea y una estabilidad térmica considerable, manteniendo su integridad hasta los $262,31$ °C. Su permeabilidad al agua sugiere potenciales aplicaciones en sistemas que requieren interacción con solventes polares.

El análisis del hidrolato etanólico de cúrcuma reveló una composición química compleja, dominada por compuestos como α -curcumeno, curcumina y α -turmerona, lo que subraya el potencial de este extracto para diversas aplicaciones.

Se desarrolló un método innovador para la detección y cuantificación de iones metálicos Fe^{3+} y Cu^{2+} utilizando las biopelículas sintetizadas. Este método demuestra ser efectivo para concentraciones de hasta 10 ppm, presentando una respuesta exponencial que sugiere una alta sensibilidad a bajas concentraciones.

Estos hallazgos abren nuevas perspectivas para la cuantificación de residuos agroindustriales con aplicaciones en la detección de metales pesados. Futuros estudios podrían enfocarse en optimizar la sensibilidad y selectividad de estas biopelículas para su uso en aplicaciones ambientales y de seguridad alimentaria.

RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta que el valor del porcentaje de almidón encontrado en este estudio es mayor que el establecido en el Codex Alimentarius, se recomienda realizar el secado a temperaturas mayores para establecer si este parámetro realmente afecta este valor.

Para determinar si el porcentaje de curcumina en el extracto etanólico puede aumentarse se recomienda realizar extracciones etanólicas con porcentajes menores de etanol.

Se recomienda evaluar el funcionamiento de los biosensores elaborados en esta investigación en muestras reales, para conocer los rangos de concentración detectables y si se presentan interferencias.

Para corroborar la concentración de los metales acomplejados en las biopelículas se recomienda realizar análisis elemental de las mismas.

Teniendo en cuenta que el pH de las diferentes soluciones de cobre y hierro podría tener influencia en el mecanismo de acomplejamiento, se recomienda medir este parámetro.

BIBLIOGRAFÍA

- Akinde, H. A., Sanni, L. O., Shittu, T. A., Adegunwa, M. O., Abass, A., & Awoyale, W. (s. f.). Characterization of Starches from Some Selected White and Yellow Cassava Roots for Dry Starch Noodle Production. *Journal of Culinary Science & Technology*, 0(0), 1-19. <https://doi.org/10.1080/15428052.2022.2091072>
- Akonor, P. T., Osei Tutu, C., Arthur, W., Adjebeng-Danquah, J., Affrifah, N. S., Budu, A. S., & Saalia, F. K. (2023). Granular structure, physicochemical and rheological characteristics of starch from yellow cassava (*Manihot esculenta*) genotypes. *International Journal of Food Properties*, 26(1), 259-273. <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2161572>
- Algar, A. F. C., B.Umali, A., & Tayobong, R. R. P. (2019). PHYSICOCHEMICAL AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF STARCH FROM PHILIPPINE EDIBLE CANNA (*Canna indica* L.) RHIZOMES. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.15414/jmbfs.2019.9.1.34-37>
- Ali, S., Chen, X., Shi, W., Huang, G., Yuan, L., Meng, L., Chen, S., Zhonghao, X., & Chen, X. (2023). Recent Advances in Silver and Gold Nanoparticles-Based Colorimetric Sensors for Heavy Metal Ions Detection: A Review. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 53(3), 718-750. <https://doi.org/10.1080/10408347.2021.1973886>
- Barik, A., Mishra, B., Kunwar, A., Kadam, R., Shen, L., Dutta, S., Padhye, S., Satpati, A., Zhang, H.-Y., & Priyadarsini, I. (2007). Comparative study of copper(II)-curcumin complexes as superoxide dismutase mimics and free radical scavengers. *European journal of medicinal chemistry*, 42, 431-439. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2006.11.012>
- Barton, D., & Chickos, J. (2020). The vapor pressure and vaporization enthalpy of (–) β -Elemene and (–) β -Bisabolene by correlation gas chromatography. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 148, 106139. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2020.106139>
- Barzegar, A. (2012). The role of electron-transfer and H-atom donation on the superb antioxidant activity and free radical reaction of curcumin. *Food Chemistry*, 135(3), 1369-1376. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.05.070>
- Bernal Loyola, A. R., Wehinger Wehinger, S. (Prof G., & Forero Doria, O. (Prof I. (2019). *Actividad antitumoral in vitro de compuestos derivados de la curcumina en células de cáncer de colon HT29* [Thesis, Universidad de Talca (Chile). Escuela de Tecnología Médica.]. http://dspace.utalca.cl/handle/1950/12027?mode=full&submit_simple=Mostrar+registro+completo+del+art%C3%ADculo
- Betancur-D'Ambrosio, M. C., Pérez-Cervera, C. E., Barrera-Martinez, C., & Andrade-Pizarro, R. (2024). Antimicrobial activity, mechanical and thermal properties of cassava starch films incorporated with beeswax and propolis. *Journal of Food Science and Technology*, 61(4), 782-789. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05878-x>
- Betiku, E., & Alade, O. S. (2014). Media Evaluation of Bioethanol Production from Cassava Starch Hydrolysate Using *Saccharomyces cerevisiae*. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 36(18), 1990-1998. <https://doi.org/10.1080/15567036.2011.557690>

- Bodîrlău, R., Teacă, C.-A., Spiridon, I., & Tudorachi, N. (2012). Effects of chemical modification on the structure and mechanical properties of starch-based biofilms. *Monatshefte Für Chemie - Chemical Monthly*, 143(2), 335-343. <https://doi.org/10.1007/s00706-011-0659-3>
- Boonkanon, C., Phatthanawiwat, K., Wongniramaikul, W., & Choodum, A. (2020). Curcumin nanoparticle doped starch thin film as a green colorimetric sensor for detection of boron. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 224, 117351. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.117351>
- Borsari, M., Ferrari, E., & Saladini, M. (2002). Curcuminoids as potential new iron-chelating agents: Spectroscopic, polarographic and potentiometric study on their Fe(III) complexing ability. *Inorganica Chimica Acta*, 328, 61-68. [https://doi.org/10.1016/S0020-1693\(01\)00687-9](https://doi.org/10.1016/S0020-1693(01)00687-9)
- Botticella, E., Testone, G., Buffagni, V., Palombieri, S., Taddei, A. R., Lafiandra, D., Lucini, L., Giannino, D., & Sestili, F. (2024). Mutations in starch biosynthesis genes affect chloroplast development in wheat pericarp. *Plant Physiology and Biochemistry*, 207, 108354. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108354>
- C., P. V. M., Subramaniam, V., & Shankar, R. (2017). Metal chelating ability and antioxidant properties of Curcumin-metal complexes – A DFT approach. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.jmgm.2017.10.022>
- Carvalho, P. I. N., Osorio-Tobón, J. F., Rostagno, M. A., Petenate, A. J., & Meireles, M. A. A. (2015). Evaluación tecnoeconómica de la extracción de aceite de cúrcuma (*Curcuma longa* L.) y ar-turmerona mediante dióxido de carbono supercrítico. *The Journal of Supercritical Fluids*, 105, 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.03.020>
- Chinma, C. E., Ariahu, C. C., & Abu, J. O. (2013). Chemical composition, functional and pasting properties of cassava starch and soy protein concentrate blends. *Journal of Food Science and Technology*, 50(6), 1179-1185. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0451-8>
- Choudhary, M. I., Musharraf, S. G., Ahmad Nawaz, S., Anjum, S., Parvez, M., Fun, H.-K., & Atta-ur-Rahman. (2005). Microbial transformation of (–)-isolongifolol and butyrylcholinesterase inhibitory activity of transformed products. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 13(6), 1939-1944. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2005.01.015>
- Corrêa, R. L. G. Q., de Moraes, M. M. F., de Oliveira, K. T., Aoto, Y. A., Coutinho-Neto, M. D., & Homem-de-Mello, P. (2023). Diving into the optoelectronic properties of Cu(II) and Zn(II) curcumin complexes: A DFT and wavefunction benchmark. *Journal of Molecular Modeling*, 29(5), 166. <https://doi.org/10.1007/s00894-023-05560-1>
- Cruz-Benítez, M. M., Gómez-Aldapa, C. A., Castro-Rosas, J., Hernández-Hernández, E., Gómez-Hernández, E., & Fonseca-Florido, H. A. (2019). Efecto del contenido de amilosa y la modificación química del almidón de yuca sobre la microencapsulación de *Lactobacillus pentosus*. *LWT*, 105, 110-117. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.01.069>
- Cruz-Navarro, A., Hernández-Romero, D., Flores-Parra, A., Rivera, J. M., Castillo-Blum, S. E., & Colorado-Peralta, R. (2021). Structural diversity and luminescent properties of coordination complexes obtained from trivalent lanthanide ions with the ligands: *Tris*((1*H*-benzo[*d*]imidazol-2-

yl)methyl)amine and 2,6-bis(1H-benzo[d]imidazol-2-yl)pyridine. *Coordination Chemistry Reviews*, 427, 213587. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213587>

DALL·E 2. (s. f.). Recuperado 13 de julio de 2024, de <https://openai.com/index/dall-e-2/>

de Castro, L. L. R. L., Silva, L. G. L., Abreu, I. R., Braz, C. J. F., Rodrigues, S. C. S., Moreira-Araújo, R. S. dos R., Folkersma, R., de Carvalho, L. H., Barbosa, R., & Alves, T. S. (2024). Biodegradable PBAT/PLA blend films incorporated with turmeric and cinnamomum powder: A potential alternative for active food packaging. *Food Chemistry*, 439, 138146. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138146>

Dosoky, N. S., & Setzer, W. N. (2018). Chemical Composition and Biological Activities of Essential Oils of Curcuma Species. *Nutrients*, 10(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/nu10091196>

El-Sharoud, W. M., Zalma, S. A., Rios-Solis, L., & Ledesma-Amaro, R. (2023). Over-expression of α -bisabolene by metabolic engineering of *Yarrowia lipolytica* employing a golden gate DNA assembly toolbox. *Biotechnology Notes*, 4, 14-19. <https://doi.org/10.1016/j.biotno.2022.12.005>

Fakhouri, F. M., Tanada-Palmu, P. S., & Grosso, C. R. F. (2004). Characterization of composite biofilms of wheat gluten and cellulose acetate phthalate. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 21, 261-264. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322004000200016>

Fernández-Marín, R., Fernandes, S. C. M., Andrés, M., & Labidi, J. (2021). Microwave-Assisted Extraction of Curcuma longa L. Oil: Optimization, Chemical Structure and Composition, Antioxidant Activity and Comparison with Conventional Soxhlet Extraction. *Molecules*, 26, 1516. <https://doi.org/10.3390/molecules26061516>

GadelHak, Y., Hafez, S. H. M., Mohamed, H. F. M., Abdel-Hady, E. E., & Mahmoud, R. (2023). Nanomaterials-modified disposable electrodes and portable electrochemical systems for heavy metals detection in wastewater streams: A review. *Microchemical Journal*, 193, 109043. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.109043>

Garimella, J. N., & Pradhan, R. C. (2024a). Efecto del tratamiento con plasma frío atmosférico (de múltiples pines) sobre la extracción de curcumina e investigación de fitoquímicos, antioxidantes, propiedades físicas y morfológicas del polvo de cúrcuma (*Curcuma longa* L.). *Food Chemistry*, 449, 139233. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139233>

Garimella, J. N., & Pradhan, R. C. (2024b). Efecto del tratamiento con plasma frío atmosférico (de múltiples pines) sobre la extracción de curcumina e investigación de fitoquímicos, antioxidantes, propiedades físicas y morfológicas del polvo de cúrcuma (*Curcuma longa* L.). *Food Chemistry*, 449, 139233. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139233>

Gómez-Bachar, L., Vilcovsky, M., González-Seligra, P., & Famá, L. (2024). Effects of PVA and yerba mate extract on extruded films of carboxymethyl cassava starch/PVA blends for antioxidant and mechanically resistant food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 268, 131464. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131464>

Hazim, I., Younus, K., & Abachi, F. (2021). Investigation of some bioactive compounds in oil and ethanol extracts of ginger (*Zingerbiene officlica*) using GC-MS. *Iraqi Journal of Pharmacy*, 16. <https://doi.org/10.33899/iphr.2019.165707>

- Hernández, M. S., Ludueña, L. N., & Flores, S. K. (2024). Combined effect of oregano essential oil and glycerol on physicochemical properties of antimicrobial films based on chitosan and acetylated cassava starch. *Food Hydrocolloids*, 156, 110259. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110259>
- Hoang, N., Xuan Hung, L., Thằng, P., Chinh, V., Vu, L., Dung, P., Trung, T., & Nga, P. T. (2016). Fabrication and vibration characterization of curcumin extracted from turmeric (*Curcuma longa*) rhizomes of the northern Vietnam. *SpringerPlus*, 5. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2812-2>
- Hosry, L., Nicolas, S., Richa, R., Mashtoub, L., Cayot, P., & Bou-Maroun, E. (2023). Sample Preparation and Analytical Techniques in the Determination of Trace Elements in Food: A Review. *Foods*, 12, 895. <https://doi.org/10.3390/foods12040895>
- Ilvis, P., Acosta, J., Arancibia, M., & Casado, S. (2024). Nanoscopic Characterization of Starch-Based Biofilms Extracted from Ecuadorian Potato (*Solanum tuberosum*) Varieties. *Polymers*, 16(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/polym16131873>
- Joshi, G., & Yadav, K. S. (2023). Chapter 2—Applications of bioresins and biopolymers derived from natural resources as composites in drug delivery. En Dr. Inamuddin & T. Altalhi (Eds.), *Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science* (pp. 21-34). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95169-2.00007-9>
- Karmakar, B., Sarkar, S., Chakraborty, R., Saha, S. P., Thirugnanam, A., Roy, P. K., & Roy, S. (2024). Starch-based biodegradable films amended with nano-starch and tannic acid-coated nano-starch exhibit enhanced mechanical and functional attributes with antimicrobial activity. *Carbohydrate Polymers*, 341, 122321. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122321>
- Kaswan, P. (2023). Chalcogenated Schiff base ligands utilized for metal ion detection. *Inorganica Chimica Acta*, 556, 121610. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2023.121610>
- Kusumadewi, A. P., Martien, R., Pramono, S., Setyawan, A. A., Windarsih, A., & Rohman, A. (2022). Application of FTIR spectroscopy and chemometrics for correlation of antioxidant activities, phenolics and flavonoid contents of Indonesian *Curcuma xanthorrhiza*. *International Journal of Food Properties*, 25(1), 2364-2372. <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2134418>
- León, A. Y., Núñez-Méndez, K. S., Salas-Chia, L. M., Orozco-Agamez, J. C., Peña-Ballesteros, D. Y., Martínez-Vertel, J. J., León, P. A., & Molina-Velasco, D. R. (2024). Prediction of some physicochemical properties in Colombian crude oils upgraded by catalytic aquathermolysis using UV–VIS spectroscopy associated with chemometric methods. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 310, 123965. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.123965>
- Li, L., Bi, X., Zhen, M., Ren, Y., Zhang, L., & You, T. (2024). Recent advances in analytical sensing detection of heavy metal ions based on covalent organic frameworks nanocomposites. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 171, 117488. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117488>
- Li, S., Mu, B., Yan, P., Kang, Y., Wang, Q., & Wang, A. (2021). Incorporation of Different Metal Ion for Tuning Color and Enhancing Antioxidant Activity of Curcumin/Palygorskite Hybrid Materials. *Frontiers in Chemistry*, 9. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.760941>
- Lin, Y.-H., Sheu, S.-J., Liu, W., Hsu, Y.-T., He, C.-X., Wu, C.-Y., Chen, K.-J., Lee, P.-Y., Chiu, C.-C., & Cheng, K.-C. (2023). Retinal protective effect of curcumin metabolite hexahydrocurcumin against

blue light-induced RPE damage. *Phytomedicine*, 110, 154606. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2022.154606>

Liu, Z., Wu, X., Gao, T., Zhang, M., Min, X., Chen, W., & Tang, C.-J. (2024a). Monitoreo rápido de complejos de metales pesados y amoníaco en soluciones mediante espectroscopia UV- vis /ATR-FTIR y modelos quimiométricos. *Chemical Engineering Journal*, 481, 148692. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148692>

Liu, Z., Wu, X., Gao, T., Zhang, M., Min, X., Chen, W., & Tang, C.-J. (2024b). Rapid monitoring of heavy metal-ammonia complexes in solutions by UV-vis/ATR-FTIR spectroscopy and chemometric models. *Chemical Engineering Journal*, 481, 148692. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148692>

Lomeli Ramirez, M. G., Barrios-Guzmán, A., García-Enriquez, S., Rivera-Prado, J., & Manríquez-González, R. (2014). Chemical and Mechanical Evaluation of Bio-composites Based on Thermoplastic Starch and Wood Particles Prepared by Thermal Compression. *BioResources*, 9. <https://doi.org/10.15376/biores.9.2.2960-2974>

Long, Y., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Chen, J. (2022a). Valorization of turmeric (*Curcuma longa* L.) rhizome: Effect of different drying methods on antioxidant capacity and physical properties. *Drying Technology*, 40(8), 1609-1619. <https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2032135>

Long, Y., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Chen, J. (2022b). Valorization of turmeric (*Curcuma longa* L.) rhizome: Effect of different drying methods on antioxidant capacity and physical properties. *Drying Technology*, 40(8), 1609-1619. <https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2032135>

López González, A. M. (2020). *Uso de la nanotecnología para optimizar la biodisponibilidad de curcumina* [masterThesis, Tesis (M.C.)--Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N. Farmacología]. <https://repositorio.cinvestav.mx/handle/cinvestav/3435>

Luo, D.-D., Chen, J.-F., Liu, J.-J., Xie, J.-H., Zhang, Z.-B., Gu, J.-Y., Zhuo, J.-Y., Huang, S., Su, Z.-R., & Sun, Z.-H. (2019). Tetrahydrocurcumin and octahydrocurcumin, the primary and final hydrogenated metabolites of curcumin, possess superior hepatic-protective effect against acetaminophen-induced liver injury: Role of CYP2E1 and Keap1-Nrf2 pathway. *Food and Chemical Toxicology*, 123, 349-362. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.11.012>

Maghool, F., Emami, M. H., Alipour, R., Mohammadzadeh, S., Sereshki, N., Dehkordi, S., Fahim, A., Tayarani-Najaran, Z., Sheikh, A., Kesharwani, P., & Sahebkar, A. (2023). Rescue effect of curcumin against copper toxicity. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 78, 127153. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2023.127153>

Marchetti, F., Pettinari, C., Di Nicola, C., Tombesi, A., & Pettinari, R. (2019). Coordination chemistry of pyrazolone-based ligands and applications of their metal complexes. *Coordination Chemistry Reviews*, 401, 213069. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2019.213069>

Mary, C. P. V., Vijayakumar, S., & Shankar, R. (2018). Metal chelating ability and antioxidant properties of Curcumin-metal complexes – A DFT approach. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 79, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jmglm.2017.10.022>

Méité, N., Marie-Sandrine Kouakou, L. P., Kouamé, A. N., Kouassi, S. S., Silva e Silva, C., Sidibe Sandé, S. L., de Fátima Pinheiro Pereira, S., & Konan, L. K. (2024). Physical and chemical properties of

cassava starch biopolymer reinforced with coconut fiber and/or metakaolin. *Journal of the Indian Chemical Society*, 101(8), 101185. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2024.101185>

Mohidin, S. R. N. S. P., Moshawih, S., Hermansyah, A., Asmuni, M. I., Shafqat, N., & Ming, L. C. (2023). Cassava (*Manihot esculenta* Crantz): A Systematic Review for the Pharmacological Activities, Traditional Uses, Nutritional Values, and Phytochemistry. *Journal of Evidence-based Integrative Medicine*, 28, 2515690X231206227. <https://doi.org/10.1177/2515690X231206227>

Monton, C., Luprasong, C., & Charoenchai, L. (2019). Acceleration of turmeric drying using convection and microwave-assisted drying technique: An optimization approach. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(9), e14096. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14096>

Mueller, E., Hoffmann, T. G., Schmitz, F. R. W., Helm, C. V., Roy, S., Bertoli, S. L., & de Souza, C. K. (2024). Development of ternary polymeric films based on cassava starch, pea flour and green banana flour for food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 256, 128436. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128436>

Neumann, M., di Marco, G., Iudin, D., Viola, M., van Nostrum, C. F., van Ravensteijn, B. G. P., & Vermonden, T. (2023). Stimuli-Responsive Hydrogels: The Dynamic Smart Biomaterials of Tomorrow. *Macromolecules*, 56(21), 8377-8392. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.3c00967>

Noble, J. E., & Bailey, M. J. A. (2009). Chapter 8 Quantitation of Protein. En R. R. Burgess & M. P. Deutscher (Eds.), *Methods in Enzymology* (Vol. 463, pp. 73-95). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(09\)63008-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(09)63008-1)

Ocampo Quintero, J., & López, J. F. (2018). *Tecnificación del secado de cúrcuma permitiendo un proceso continuo de producción elaborado por pequeños productores orgánicos de Santa Rosa*.

Pantharos, P., Sukcharoen, P., Phadungrakwittaya, R., Akarasereenont, P., Booranasubkajorn, S., & Lumlerdikij, N. (2022). Utilization of UPLC-PDA and GC-MS/MS coupled with metabolomics analysis to identify bioactive metabolites in medicinal turmeric at different ages for the quality assurance. *Phytomedicine*, 102, 154157. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2022.154157>

Parihar, S., Boricha, V. P., & Jadeja, R. N. (2015). Pyrazolone as a recognition site: Rhodamine 6G-based fluorescent probe for the selective recognition of Fe³⁺ in acetonitrile-aqueous solution. *Luminescence*, 30(2), 168-174. <https://doi.org/10.1002/bio.2709>

Patil, S. S., Pathak, A., & Rathod, V. K. (2021). Optimización y estudio cinético de la extracción profunda con disolventes eutécticos asistida por ultrasonidos: Una ruta más ecológica para la extracción de curcuminoides de *Curcuma longa*. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105267. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105267>

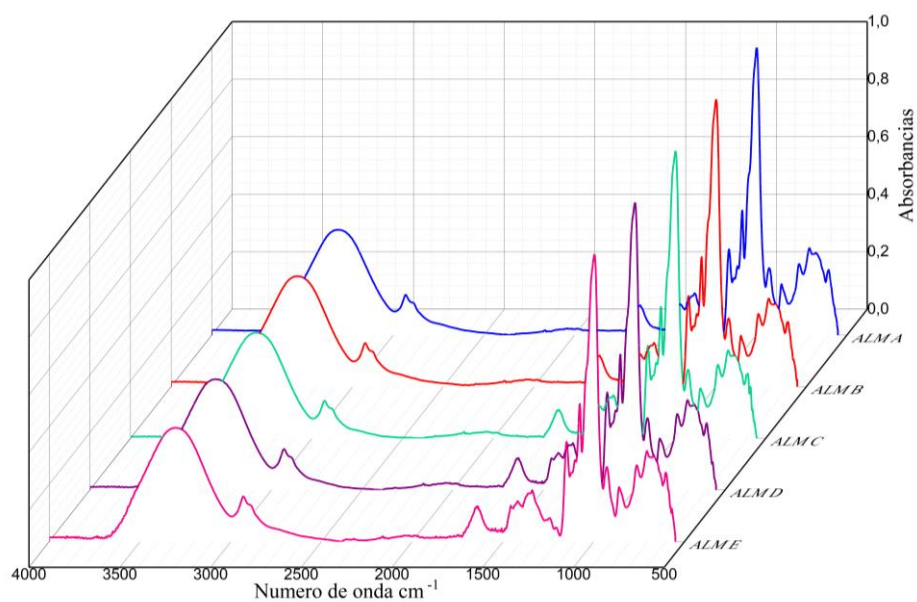
Paula, S., Floruta, S., Pajazetovic, K., Sobota, S., & Almahmodi, D. (2024). The molecular determinants of calcium ATPase inhibition by curcuminoids. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes*, 1866(7), 184367. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2024.184367>

Perera, K. D. C., Weragoda, G. K., Haputhanthri, R., & Rodrigo, S. K. (2021). Study of concentration dependent curcumin interaction with serum biomolecules using ATR-FTIR spectroscopy combined with Principal Component Analysis (PCA) and Partial Least Square Regression (PLS-R). *Vibrational Spectroscopy*, 116, 103288. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2021.103288>

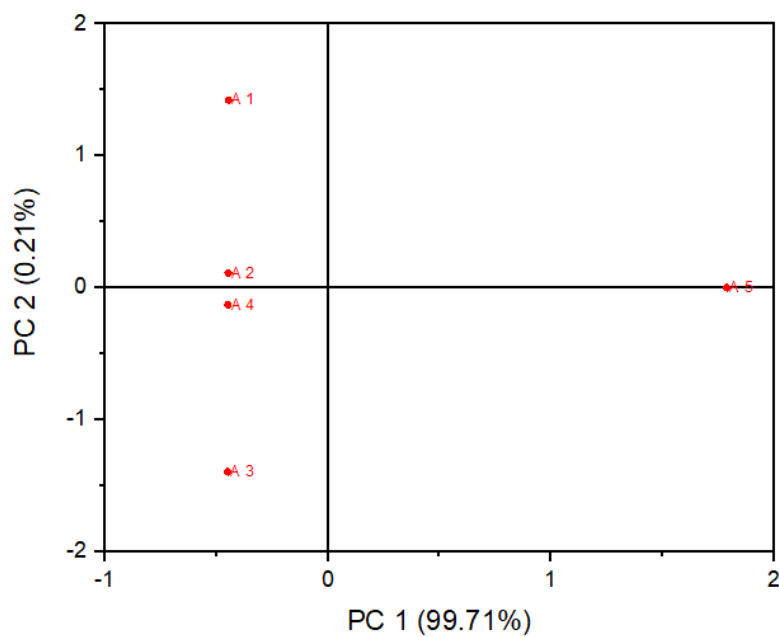
- Prasad, S., DuBourdieu, D., Srivastava, A., Kumar, P., & Lall, R. (2021). Metal–Curcumin Complexes in Therapeutics: An Approach to Enhance Pharmacological Effects of Curcumin. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(13), 7094. <https://doi.org/10.3390/ijms22137094>
- Rivero Berti, I., Islan, G. A., & Castro, G. R. (2021). Enzymes and biopolymers. The opportunity for the smart design of molecular delivery systems. *Bioresource Technology*, 322, 124546. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124546>
- Roopan, S., & Tammineni, S. (2015). Preparation and Properties of Biopolymers: A Critical Review. En *Handbook of Polymers for Pharmaceutical Technologies* (pp. 541-555). <https://doi.org/10.1002/9781119041450.ch16>
- Sharma, P., Ganguly, M., Doi, A., & Sahu, M. (2024). Recent advances in the application of copper nanocluster and copper nanoparticle in water for heavy metals detection: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 22, 100970. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2024.100970>
- Siripoltangman, N., & Chickos, J. (2019). Vapor pressure and vaporization enthalpy studies of the major components of ginger, α -zingiberene, β -sesquiphellandrene and (–) α -curcumene by correlation gas chromatography. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 138, 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2019.06.011>
- Sívoli, L., Pérez, E., Rodriguez, P., Raymúndez, M., & Ayesta, C. (2009). TECNICAS MICROSCOPICAS Y DE DISPERSION DE LUZ EMPLEADAS EN LA EVALUACION DE LA ESTRUCTURA DEL ALMIDON NATIVO DE YUCA (Manihot esculenta C). *Acta Microscopica*, 18, 195-203.
- Sobhan, A., Muthukumarappan, K., & Wei, L. (2021). Biosensors and biopolymer-based nanocomposites for smart food packaging: Challenges and opportunities. *Food Packaging and Shelf Life*, 30, 100745. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100745>
- Sriroth, K., Chollakup, R., Chotineeranat, S., Piyachomkwan, K., & Oates, C. G. (2000). Processing of cassava waste for improved biomass utilization. *Bioresource Technology*, 71(1), 63-69. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00051-6)
- Sun, W., Wang, S., Zhao, W., Wu, C., Guo, S., Gao, H., Tao, H., Lu, J., Wang, Y., & Chen, X. (2017). Chemical constituents and biological research on plants in the genus Curcuma. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(7), 1451-1523. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1176554>
- Tapia-Blácido, D. R., Sobral, P., & Menegalli, F. C. (2005). Development and characterization of biofilms based on Amaranth flour (Amaranthus caudatus). *Journal of Food Engineering*, 67, 215-223. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.054>
- Thuppahige, V. T. W. (2023). Extraction and characterisation of starch from cassava (Manihot esculenta) agro-industrial wastes. *LWT*, 182, 114787. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114787>
- Vonnie, J. M., Jing Ting, B., Rovina, K., Erna, K. H., Felicia, W. X. L., Nur ‘Aqilah, N. M., & Abdul Wahab, R. (2022). Development of Aloe Vera-Green Banana Saba-Curcumin Composite Film for Colorimetric Detection of Ferrum (II). *Polymers*, 14(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/polym14122353>

- Wang, Y., Yang, R., Zhu, S., Huang, Z., Xie, S., Zhang, X., Huang, G., Ma, M., & Chen, B. (2023). Highly selective adsorption of curcuminoids by ceria and hydrated ceria. *Food Chemistry Advances*, 3, 100526. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100526>
- Wu, X., Yan, X., Zhang, J., Wu, X., Luan, M., & Zhang, Q. (2024). Preparación y caracterización de películas de embalaje inteligentes sensibles al pH basadas en matrices de almidón de yuca/alcohol polivinílico que contienen antocianinas de *Aronia melanocarpa*. *LWT*, 194, 115818. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115818>
- Yao, T., Sui, Z., & Janaswamy, S. (2023). Complexing curcumin and resveratrol in the starch crystalline network alters in vitro starch digestion: Towards developing healthy food materials. *Food Chemistry*, 425, 136471. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136471>
- Yong, H., & Liu, J. (2024). Recent advances on the preparation conditions, structural characteristics, physicochemical properties, functional properties and potential applications of dialdehyde starch: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 259, 129261. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129261>
- Yusoff, I. M., Mat Taher, Z., Rahmat, Z., & Chua, L. S. (2022). A review of ultrasound-assisted extraction for plant bioactive compounds: Phenolics, flavonoids, thymols, saponins and proteins. *Food Research International*, 157, 111268. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111268>
- Zambelli, R. A., da Rocha, A. P., & de Mendonça, L. G. (2024). Importance of Starch Characterization. En S. Punia Bangar (Ed.), *Standardized Procedures and Protocols for Starch* (pp. 1-40). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-3866-8_1
- Zhang, X., Wu, S.-T., Yang, X.-J., Shen, L.-Y., Huang, Y.-L., Xu, H., Zhang, Q.-L., Sun, T., Redshaw, C., & Feng, X. (2021). Dynamic Coordination between a Triphenylamine-Functionalized Salicylaldehyde Schiff Base and a Copper(II) Ion. *Inorganic Chemistry*, 60(12), 8581-8591. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.1c00523>
- Zhao, G., Wang, H., & Liu, G. (2017). Recent Advances in Chemically Modified Electrodes, Microfabricated Devices and Injection Systems for the Electrochemical Detection of Heavy Metals: A review. *International Journal of Electrochemical Science*, 12(9), 8622-8641. <https://doi.org/10.20964/2017.09.39>
- Zuo, R., Kong, X., Wang, Y., He, Y., Deng, S., Zhuang, X., & Qiu, D. (2024). Isolation and characterization of natural nano starch from amaranth starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 260, 129525. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129525>

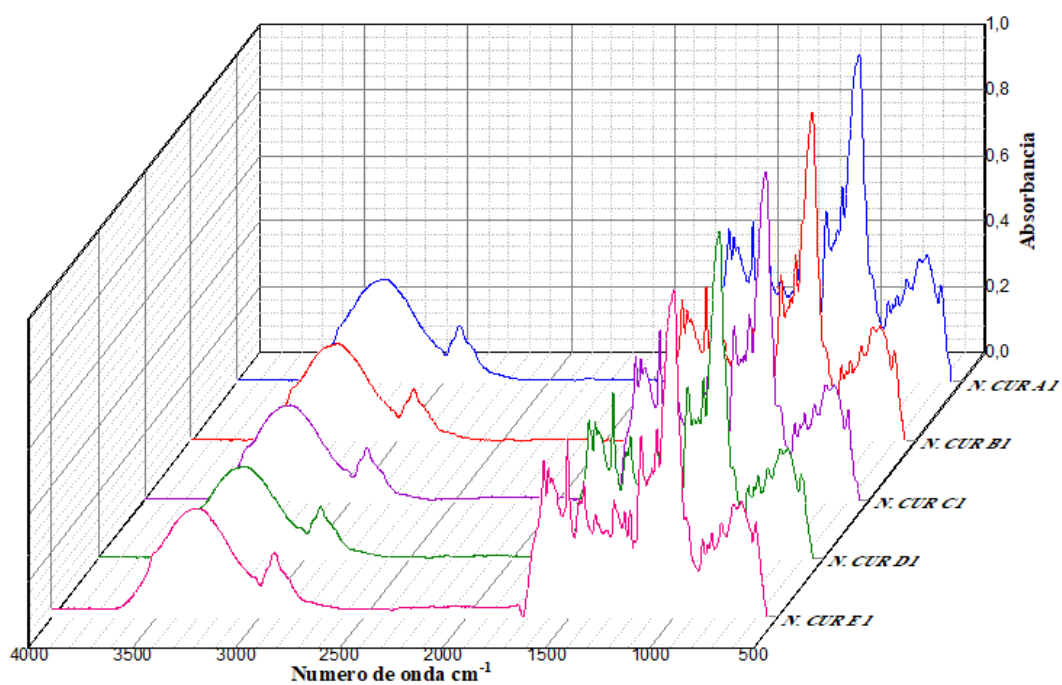
ANEXOS



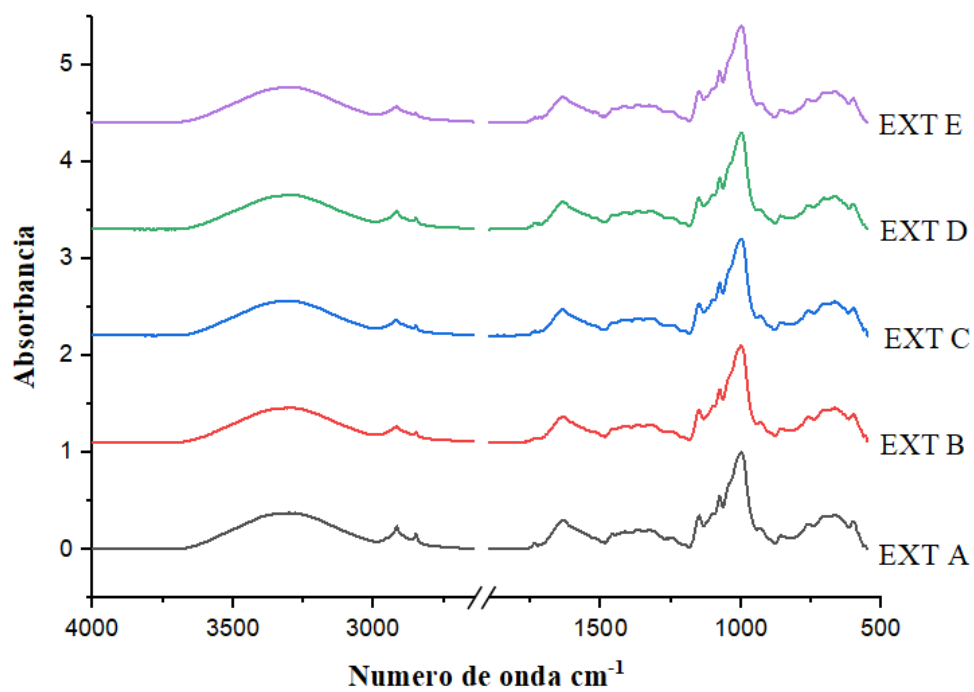
Anexo A espectro FT-IR de almidón en 3D



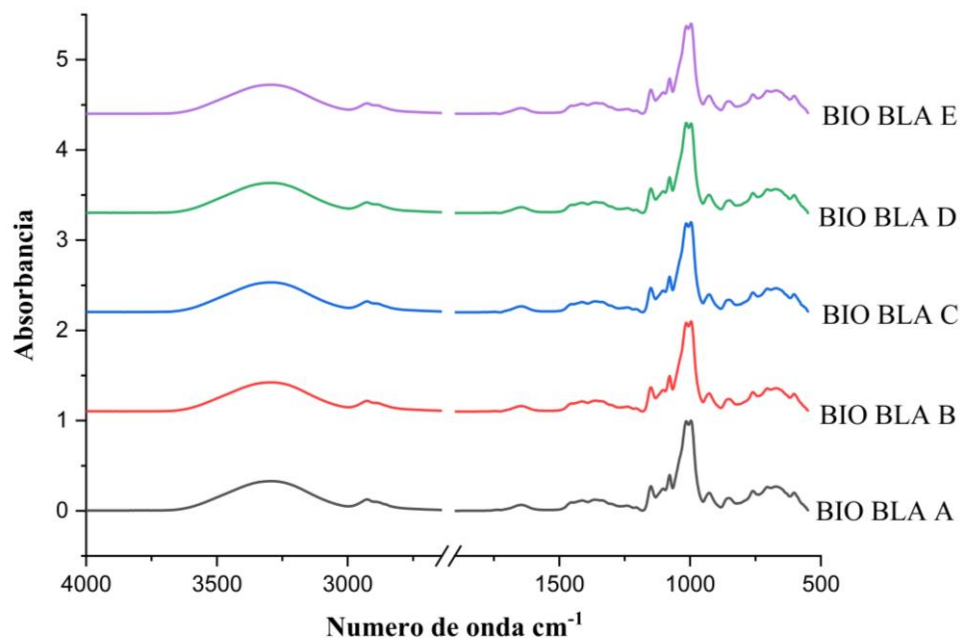
Anexo B, PCA del almidón de yuca



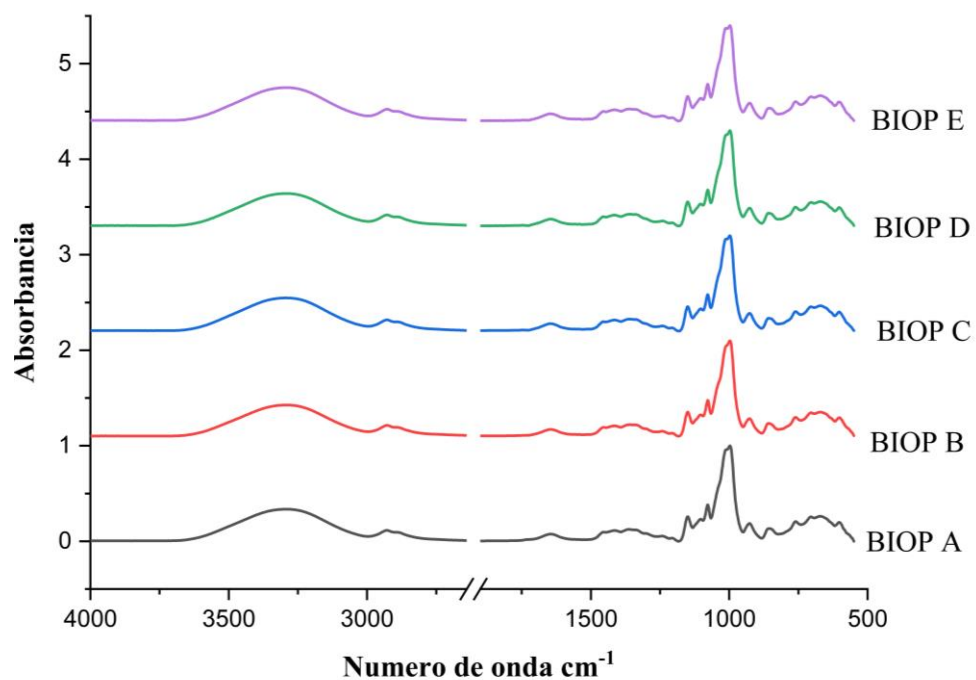
Anexo C, Espectro FT-IR de la cúrcuma en 3D



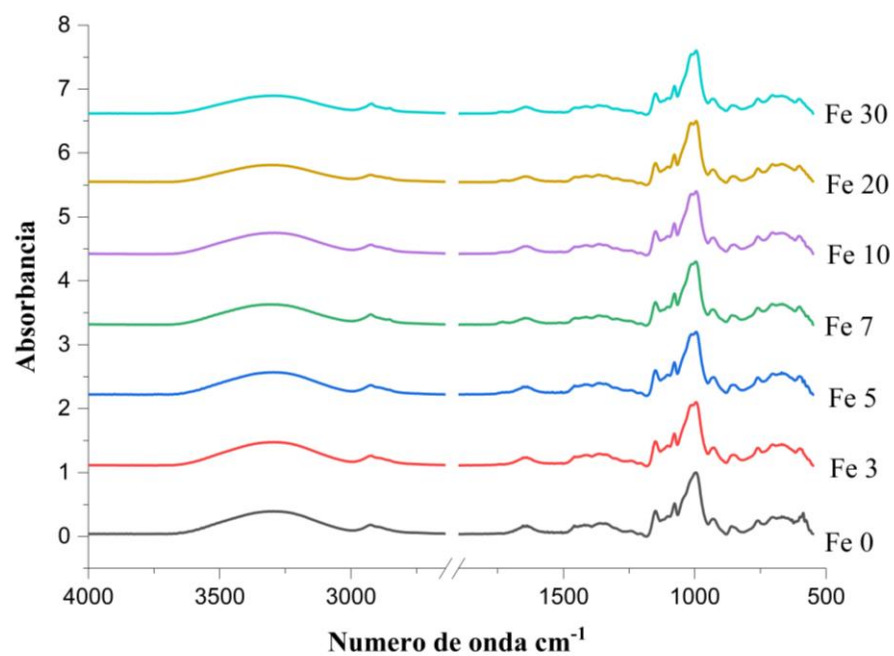
Anexo D, Espectro FT- IR de la extracción etanólica de cúrcuma



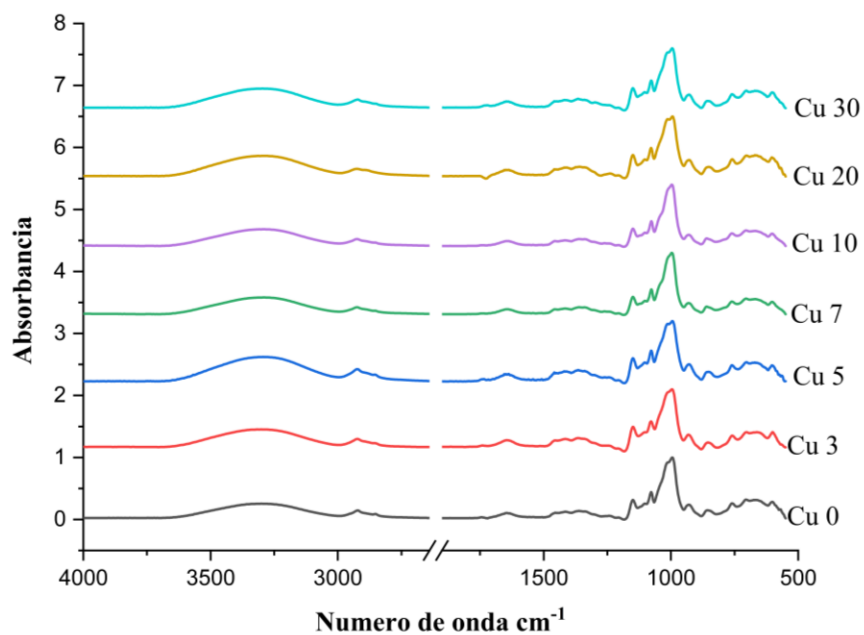
Anexo E, Espectro FT-IR de las biopelículas de almidón



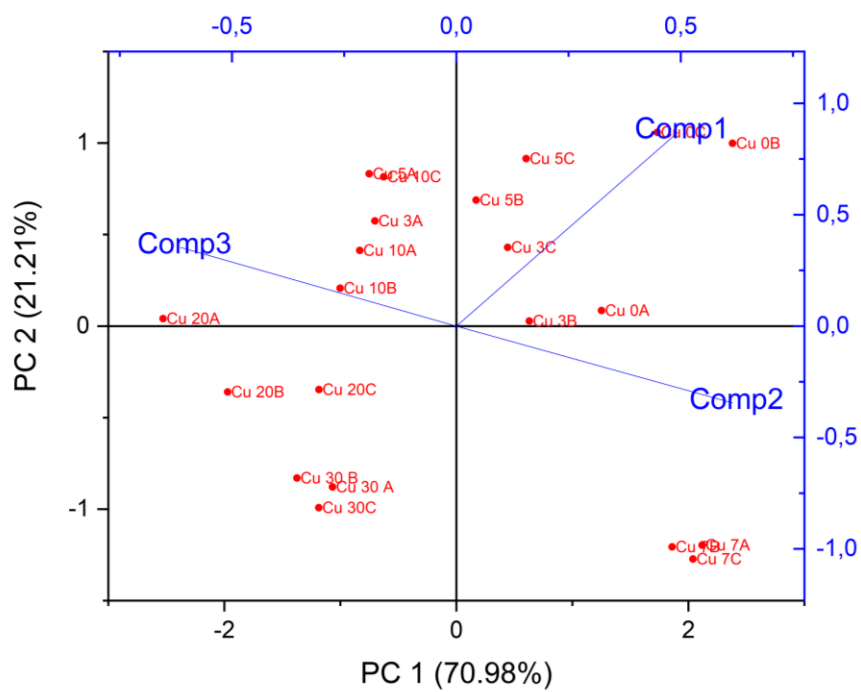
Anexo F, Espectro FT-IR de las biopelículas de almidón – hidrolato de cúrcuma



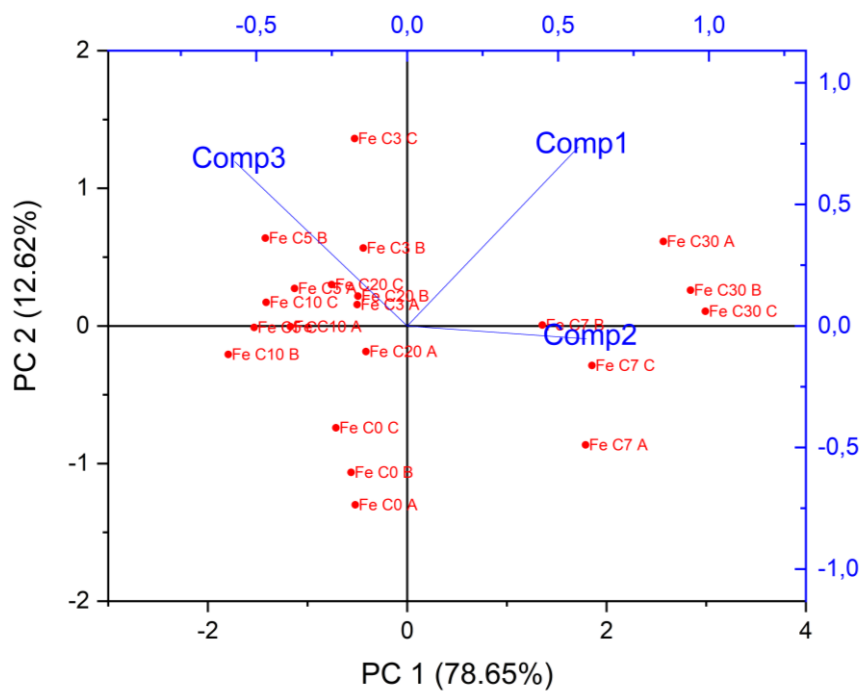
Anexo G, Espectro FT-IR de la detección de hierro



Anexo H, Espectro FT-IR de la detección de cobre



Anexo I, PCA de la detección de hierro



Anexo J, PCA de la detección de cobre