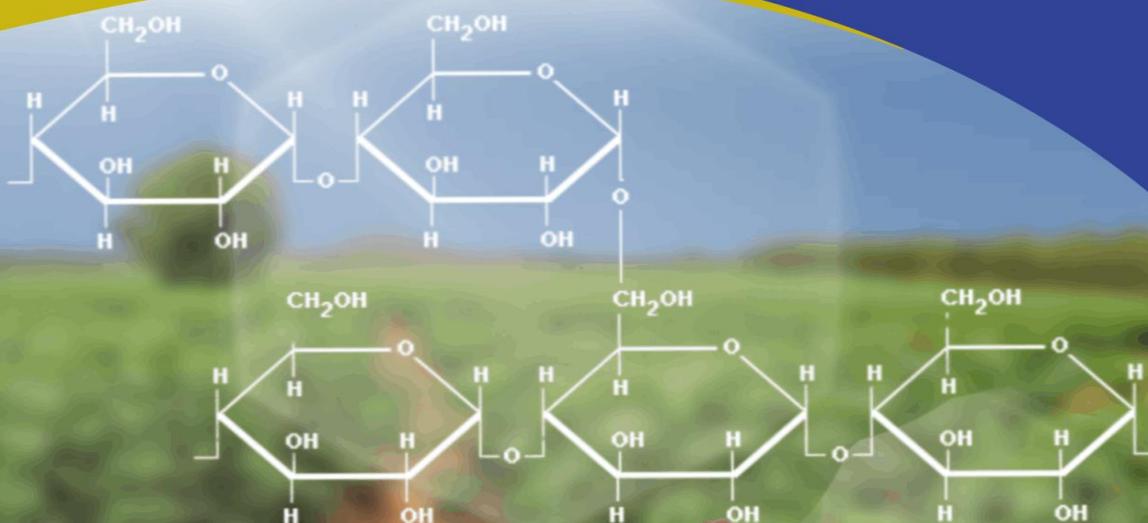


MATERIALES POLIMÉRICOS FUNCIONALES BASADOS EN PRODUCTOS DE LA AGROINDUSTRIA:

YUCA (*Manihot esculenta* Crantz) Y MARAÑÓN (*Anacardium occidentale* L.)

Álvaro Arrieta, Enrique Combatt, Manuel Palencia.



**Materiales Poliméricos Funcionales basados en
Productos de la Agroindustria: Yuca (*Manihot
esculenta* Crantz) y Marañón (*Anacardium
occidentale* L.)**



MT-Pallantia Publisher s.a.s. | ISBN 978-628-95372-3-9
Cali - Colombia 2024

Materiales Poliméricos Funcionales basados en Productos de la Agroindustria: Yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y Marañón (*Anacardium occidentale* L.)

Álvaro A. Arrieta Almario

*Grupo de Investigación en Desarrollo e Innovación en Materiales Avanzados (DEIMAV).
Departamento de Biología y Química.
Universidad de Sucre, Sincelejo-Colombia.*

Enrique M. Combatt Caballero

*Departamento de Ingeniería Agrícola.
Facultad de Ciencias Agrícolas.
Universidad de Córdoba, Montería - Colombia.*

Manuel S. Palencia Luna

*Grupo de Investigación con Aplicaciones Tecnológicas (GI-CAT).
Departamento de Química.
Universidad del Valle, Cali - Colombia.*



Materiales poliméricos funcionales basados en productos de la agroindustria: Yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y Marañón (*Anacardium occidentale* L.)

Publisher: MT-Pallantia Publisher s.a.s. | NIT: 901.469.254-6
ISBN 978-628-95372-3-9
DOI: 10.34294/b.001.2024.03
Language: Spanish
Cali - Colombia 2024



This book and the individual contributions contained in it are protected under copyright the publisher according to License CC BY-ND 4.0



Publisher:	MT- Pallantia Publisher s.a.s.
Editorial Project Manager:	A. García-Quintero
Production Project Manager:	A. García-Quintero
Cover Designer:	M.D. Palencia-Bolaños

Funds:

Fortalecimiento de capacidades científicas y tecnológicas encaminadas a la generación de biomateriales a partir de productos y subproductos de la agroindustria de Sucre y Córdoba para el encapsulado de fertilizantes y su aplicación en la generación de sistemas de liberación lenta en cultivos de tubérculos. Departamento Nacional de Planeación a través del Sistema General de Regalías BPIN 2020000100027.

Cite as:

A.A. Arrieta, E.M. Combatt, M. Palencia. 2024. Materiales poliméricos funcionales basados en productos de la agroindustria: Yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y Marañón (*Anacardium occidentale* L.). MT-Pallantia Publisher s.a.s., Cali – Colombia, pp. 269. DOI: 10.34294/b.001.2024.03.



Materiales poliméricos funcionales basados en productos de la agroindustria: Yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y Marañón (*Anacardium occidentale* L.)

A.A. Arrieta¹, E.M. Combatt², M. Palencia³

E-mail: alvaro.arrieta@unisucre.edu.co¹; ecombatt@fca.edu.co²; manuel.palencia@correounivalle.edu.co³

Contenido.

Prólogo: Fortalecimiento de capacidades científicas y tecnológicas encaminadas a la generación de biomateriales a partir de productos y subproductos de la agroindustria de Sucre y Córdoba para el encapsulado de fertilizantes y su aplicación en la generación de sistemas de liberación lenta en cultivos de tubérculos. | Pág. 6-7

Capítulo 1. Polímeros funcionales en la agricultura: Fundamentos, propiedades y clasificación. | Pág. 8-52

- 1.1. Introducción.
- 1.2. Fundamentos de polímeros funcionales.
 - 1.2.1. Concepto de polímeros funcionales.
 - 1.2.2. Tipos de polímeros funcionales.

- 1.2.2.1. Polímeros funcionales naturales.
- 1.2.2.2. Polímeros funcionales semi-sintéticos.
- 1.2.2.3. Polímeros funcionales sintéticos.
- 1.3. Polímeros funcionales empleados en la agricultura.
 - 1.3.1. Hidrogeles.
 - 1.3.2. Adsorbentes.
 - 1.3.3. Polímeros pesticidas.
 - 1.3.4. Polímeros biodegradables.
 - 1.3.5. Polímeros anfífilicos.
 - 1.3.6. Polímeros inteligentes o sensibles a estímulos.
 - 1.3.7. Polímeros funcionales como sensores y sondas.
- 1.4. Conclusiones.
Bibliografía.

Capítulo 2. Principales aplicaciones agrícolas de los polímeros funcionales:
Una visión general. [| Pág. 53-83](#)

- 2.1. Introducción.
- 2.2. Aplicaciones de los polímeros funcionales en la agricultura.
 - 2.2.1. Entrega controlada de agroquímicos.
 - 2.2.1.1. Entrega controlada de pesticidas.
 - 2.2.1.2. Entrega controlada de fertilizantes.
 - 2.2.2. Acondicionadores del suelo.
 - 2.2.3. Remoción de contaminantes.
 - 2.2.4. Mejora en el rendimiento de las plantas.
 - 2.2.5. Otras aplicaciones.
- 2.3. Otras aplicaciones.
Bibliografía.

Capítulo 3. Polímeros y polímeros compuestos ecoamigables:
biodegradabilidad y aplicaciones. [| Pág. 84-102](#)

- 3.1. Introducción.
 - 3.1.1. Polímeros ecoamigables.
 - 3.1.2. Polímeros compuestos ecoamigables.

- 3.1.3. Fuentes naturales de polímeros.
 - 3.1.3.1. Almidón.
 - 3.1.3.2. Celulosa.
 - 3.1.3.3. Lignina.
 - 3.1.3.4. Quitina.
 - 3.1.4. Residuos agrícolas como fuentes de polímeros ecoamigables.
 - 3.2. Biodegradabilidad de materiales poliméricos.
 - 3.2.1. Biodegradabilidad.
 - 3.3. Factores que influyen en la biodegradabilidad.
 - 3.4. Métodos de determinación de biodegradabilidad.
 - 3.4.1. Biodegradabilidad de polímeros basados en almidones, celulosa y proteínas.
 - 3.5. Aplicación de polímeros y polímeros compuestos eco-amigables.
 - 3.5.1. Polímeros eco-amigables comerciales.
 - 3.5.2. La agroindustria y los polímeros ecoamigables.
 - 3.5.3. Perspectivas sobre polímeros eco-amigables.
 - 3.6. Polímeros ecoamigables y nanotencología.
 - 3.6.1. Generalidades.
 - 3.6.2. Aplicaciones y ejemplos de desarrollos.
- Bibliografía.

Capítulo 4. Aspectos nutricionales del cultivo de Yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y Marañón (*Anacardium occidentale* L.). [| Pág. 103-162](#)

- 4.1. Introducción.
- 4.2. Cultivo de yuca (*Manihot esculenta* Crantz).
 - 4.2.1. Producción nacional.
 - 4.2.2. Elementos fundamentales de la fertilidad.
 - 4.2.3. Requerimientos nutricionales para el cultivo de yuca.
 - 4.2.3.1. Fertilización inorgánica y orgánica del cultivo de yuca.
 - 4.2.3.2. Síntomas de deficiencia y toxicidad de elementos nutricionales del cultivo de yuca.
 - 4.2.4. Composición nutricional de la yuca.
 - 4.2.4.1. Fases fenológicas del cultivo de yuca.
 - 4.2.4.2. Contenidos nutricionales de la raíz.
 - 4.2.4.3. Contenidos nutricionales en las hojas.

- 4.2.4.4. Concentraciones de cianuro en las hojas de yuca.
- 4.3. Nutrición del marañón.
 - 4.3.1. Aspectos básicos para la nutrición del marañón.
 - 4.3.2. Condiciones agroecológicas.
 - 4.3.2.1. Edad de la planta.
 - 4.3.2.2. Forma de aplicación de los elementos nutricionales.
 - 4.3.2.3. Prácticas de manejo.
 - 4.3.2.4. Material vegetal.
 - 4.3.3. Composición nutricional del marañón.
 - 4.3.3.1. Requerimientos nutricionales del marañón.
- 4.4. Conclusiones y recomendaciones.
 - Bibliografía.

Capítulo 5. Agroindustria de la yuca y marañón: Enfoque hacia la producción de biomateriales. | Pág. 163-205

- 5.1. Introducción.
- 5.2. Agroindustria de la yuca.
 - 5.2.1. Productos derivados de la yuca.
 - 5.2.1.1. Productos alimenticios.
 - 5.2.1.2. Productos no alimenticios.
 - 5.2.2. Modificación y funcionalidad del almidón.
 - 5.2.2.1. Propiedades de una película polimérica.
 - 5.2.3. Fertilizantes de lenta solubilidad a base de polímero natural.
 - 5.2.3.1. Recubrimiento de polímeros con fertilizantes de liberación controlada.
- 5.3. Marañón.
 - 5.3.1. Producción agroindustrial.
 - 5.3.2. Producción mundial y nacional.
 - 5.3.3. Subproductos del marañón.
 - 5.3.3.1. Goma de anacardo.
 - 5.3.4. Marañón como fuentes de biomateriales.
 - 5.3.4.1. Investigaciones relacionadas.
- 5.4. Conclusiones.
 - Bibliografía.

Capítulo 6. Biopolímeros compuestos de almidón con derivados del líquido de cáscara de nuez del anacardo. | Pág. 206-262

- 6.1. Introducción.
- 6.2. Almidón.
 - 6.2.1. Estructura y características.
 - 6.2.2. Métodos de extracción.
 - 6.2.3. Técnicas de caracterización aplicadas al almidón.
- 6.3. Líquido de cáscara de nuez del anacardo.
 - 6.3.1. Generalidades.
 - 6.3.2. Aceites derivados del líquido de cáscara de nuez del anacardo.
- 6.4. Biopolímeros compuestos de almidón con derivados del líquido de cáscara de nuez del anacardo.
 - 6.4.1. Síntesis de biopolímeros de almidón y sustancias derivadas de CNSL.
 - 6.4.2. Caracterización.
 - 6.4.3. Aplicación en procesos de encapsulamiento.
- 6.5. Conclusión.
Bibliografía.

Prólogo.

Fortalecimiento de capacidades científicas y tecnológicas encaminadas a la generación de biomateriales a partir de productos y subproductos de la agroindustria de Sucre y Córdoba para el encapsulado de fertilizantes y su aplicación en la generación de sistemas de liberación lenta en cultivos de tubérculos.

Uno de los principales retos en la agricultura consiste en desarrollar prácticas agrícolas que sean más efectivas y sostenibles, con el objetivo de satisfacer de manera adecuada las necesidades de suministro y seguridad alimentaria en el mundo, en conjunto con preservar la integridad del medio ambiente. En ese orden de ideas, Colombia ha desarrollado numerosas políticas y estrategias orientadas a la consolidación de la soberanía alimentaria a través de la priorización de aspectos como “la investigación y el desarrollo tecnológico sobre nuevas prácticas de agricultura sostenible”, lo cual incluye la priorización de cultivos regionales y la valorización de la biomasa en el contexto de la economía circular. En el ámbito de los departamentos de Córdoba y Sucre, las principales cadenas productivas de interés para alcanzar estos objetivos las constituyen las correspondientes al marañón y los tubérculos (como la yuca, el ñame y la batata). Los cuales presentan un notable potencial económico e investigativo, debido a su perfil nutricional, compuestos bioactivos, versatilidad, entre otros. Contexto que ha derivado en la necesidad de desarrollar sistemas agrícolas sostenibles para estos cultivos, los cuales permitan minimizar los impactos adversos so-

Cite as: A.A. Arrieta, E.M. Combatt, M. Palencia. 2024. Prólogo: Fortalecimiento de capacidades científicas y tecnológicas encaminadas a la generación de biomateriales a partir de productos y subproductos de la agroindustria de Sucre y Córdoba para el encapsulado de fertilizantes y su aplicación en la generación de sistemas de liberación lenta en cultivos de tubérculos. En: Á.Á. Arrieta, E.M. Combatt, M. Palencia. Materiales poliméricos funcionales basados en productos de la agroindustria: Yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y Marañón (*Anacardium occidentale* L.). MT-Pallantia Publisher s.a.s., Cali - Colombia. pp. 6-7. DOI: 10.34294/b.001.c0.2024.03.

bre el medio ambiente, y a su vez, posibiliten la creación de valor agregado de los productos, subproductos y residuos de estas cadenas de producción.

Bajo ese marco de referencia, la investigación y desarrollo de polímeros funcionales derivados de la biomasa de los cultivos de tubérculos y marañón, emerge como una estrategia atractiva en el área agrícola, debido a su potencial para efectuar aplicaciones de interés, como la liberación controlada de agroquímicos, el acondicionamiento del suelo, la promoción de crecimiento vegetal, así como procesos de remediación. Proceso que pueden ser llevados a cabo a través de la transformación de la biomasa en materiales poliméricos tan diversos como hidrogeles, adsorbentes, polímeros pesticidas, sistemas anfifílicos e inteligentes. Este panorama ha constituido una de las motivaciones principales en el proyecto “Fortalecimiento de capacidades científicas y tecnológicas encaminadas a la generación de biomateriales a partir de productos y subproductos de la agroindustria de Sucre y Córdoba para el encapsulado de fertilizantes y su aplicación en la generación de sistemas de liberación lenta en cultivos de tubérculos”, el que constituye una estrategia para el fortalecimiento de la agroindustria de los tubérculos y del cultivo de marañón, a través de la aplicación y valorización de sus subproductos y residuos, en el desarrollo de sistemas de liberación lenta de fertilizantes basados en sistemas poliméricos.

Como producto de este proyecto se ha logrado la culminación del presente libro, en el cual se abordan aspectos fundamentales de las aplicaciones de los polímeros, principalmente los polímeros funcionales, en el ámbito agrícola. Abordando aspectos esenciales para sistemas que se liberan al medioambiente, como lo es la biodegradabilidad, el potencial impacto ecológico y el uso de la biomasa en un contexto de economía circular. Posterior a la comprensión de los conceptos y fundamentos sobre los polímeros, se abordan las facetas integrales de los cultivos de Marañón y Yuca (nutrición, producción, agroindustria, entre otros), lo que permite poseer una perspectiva panorámica de estos en la producción de biomateriales de almidón con derivados del líquido de cáscara de nuez del anacardo, y su empleo en la liberación controlada de fertilizantes.

Capítulo 1.

Polímeros funcionales en la agricultura: Fundamentos, propiedades y clasificación.

1.1.- Introducción.

El constante incremento de la población a nivel global ha conllevado un crecimiento en la agricultura como actividad económica, debido a que permite satisfacer las necesidades de suministro y seguridad alimentaria. No obstante, el desarrollo de estas prácticas implica la explotación de recursos naturales, como el suelo, el agua y las plantas; además, los agricultores habitualmente hacen uso indiscriminado de agroquímicos, como fertilizantes y biocidas, por su capacidad de fomentar la cosecha y preservar los cultivos, desconociendo que la mayoría de estas sustancias se caracterizan por su naturaleza tóxica y contaminante, lo que ha resultado en una serie de problemáticas ambientales y salubres en todo el mundo (Dhiman et al., 2022; Milani et al., 2017; Sikder et al., 2021). En función de mitigar dicha problemática, se han evocado múltiples esfuerzos dirigidos a desarrollar prácticas agrícolas sostenibles, que incluyen el control de la dosificación de agroquímicos, la preservación de la integridad de los suelos, y la reducción de la liberación de especies químicas contaminantes y tóxicas al agua, la tierra y la vegetación (Mishra et al., 2017; Prasad et al., 2017).

Cite as: Á.Á. Arrieta, E.M. Combatt, M. Palencia. 2024. Polímeros funcionales en la agricultura: Fundamentos, propiedades y clasificación. En: Á.Á. Arrieta, E.M. Combatt, M. Palencia. Materiales poliméricos funcionales basados en productos de la agroindustria: Yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y Marañón (*Anacardium occidentale* L.). MT-Pallantia Publisher s.a.s., Cali - Colombia. pp. 8-52. DOI: 10.34294/b.001.c1.2024.03.

En este contexto, los polímeros funcionales emergen como candidatos promisorios para ser empleados en actividades agrícolas sostenibles ya que, además de abordar las problemáticas anteriormente expuestas, disponen del potencial de maximizar los rendimientos de los cultivos, mantener la integridad de las cosechas y reducir la dosis de administración de agroquímicos, generando un impacto positivo a nivel económico y ambiental (Krasnopeeva et al., 2022; Sikder et al., 2021). Estos materiales se caracterizan por su amplia versatilidad debido a que sus propiedades químicas pueden ser moduladas con el objetivo de ser empleados en aplicaciones específicas (Sikder et al., 2021; Stuart et al., 2010). En ese sentido, múltiples revisiones y capítulos de libro han compilado las investigaciones desarrolladas acerca del uso de materiales poliméricos en aplicaciones agrícolas. Entre estos, el Grupo de Investigación en Ciencias con Aplicaciones Tecnológicas (GI-CAT), bajo la dirección del Dr. Manuel Palencia, publicaron un libro en el que abordaron el tema de polímeros eco-amigables en una amplia variedad de actividades, incluida la agricultura (Palencia et al., 2021b). No obstante, en la búsqueda bibliográfica es común encontrar que: (i) la literatura usualmente se refiere a polímeros de manera genérica, independiente de su naturaleza funcional o estructural; y (ii) se emplee de manera indiscriminada el término de polímero funcional, asociándolo con cualquier macromolécula que desempeñe cualquier función, lo que es incorrecto y genera ambigüedad entre estos materiales y los polímeros estructurales. Por lo tanto, el objetivo del presente capítulo recae en definir con precisión el concepto de polímero funcional, con el objetivo de esclarecer, documentar y abordar de manera apropiada las investigaciones que han empleado polímeros funcionales en aplicaciones agrícolas.

1.2.- Fundamentos de polímeros funcionales.

1.2.1.- Concepto de polímeros funcionales.

Antes de discutir los polímeros funcionales que son empleados en aplicaciones agrícolas, resulta imperativo definir el concepto: un polímero

funcional es aquella macromolécula que dispone en su estructura grupos químicos que le confieren la capacidad de ser empleado en una aplicación específica; en ese sentido, la funcionalidad del polímero estará determinada por la acción química que desempeñará en dicha aplicación. Es común leer en la literatura disponible que múltiples investigadores, en el contexto de polímeros, asocian erróneamente el término funcional con el concepto de grupos funcionales ampliamente empleado en química orgánica. En función de proveerle mayor claridad al lector y suprimir esta ambigüedad, se propone evocar el ejemplo de la celulosa: este biopolímero presenta propiedades hidrofílicas debido a que dispone de grupos -OH en su estructura polimérica, por lo tanto, será un polímero funcional siempre que su aplicación se relacione directamente con su capacidad para almacenar agua; no obstante, si se pretende emplear esta macromolécula como agente bactericida, no podrá clasificarse como polímero funcional debido a que carece de grupos químicos en su estructura que le proporcionen dicha actividad antimicrobiana, por lo que su funcionalidad no podrá extenderse al ataque de microorganismos.

Otros documentos especializados establecen erróneamente que el polímero será funcional si contiene grupos funcionales (en el contexto orgánico) adicionales a los que se encuentran en la cadena polimérica. Se retomará nuevamente el ejemplo de la celulosa: si, hipotéticamente, este biopolímero fuese modificado para generar fragmentos -COOH con el objetivo de ser empleado como agente bactericida, continuará sin calificar como polímero funcional, debido a que, aunque los grupos ácidos carboxílicos son ajenos a la cadena polimérica de celulosa nativa, estos tampoco le proveen actividad antimicrobiana y, por lo tanto, la celulosa modificada continuaría sin cumplir su propósito químico específico. En ese sentido, en este punto se espera que el enfoque abordado en este capítulo clarifique que será la aplicación práctica y efectiva del polímero lo que determinará si este es *funcional*.

Resulta importante también resaltar que la aplicación debe ser estrictamente de carácter químico y, por ello, la definición de *polímero funcional* que se ha planteado en el presente capítulo no contempla apli-

caciones en las que se aprovechen las propiedades físicas o mecánicas (resistencia a la tracción, dureza, plasticidad, entre otros) del material, ya que, en tales casos, el polímero se clasifica como **estructural**. El poli(vinil alcohol) (PVA), por ejemplo, es un polímero hidrofílico sintético que se caracteriza por disponer de óptimas propiedades mecánicas, el cual podrá ser considerado como **polímero funcional** siempre que la aplicación implique el aprovechamiento de su grupo -OH; sin embargo, si sus propiedades físicas son las que determinan su aplicación, ya sea para adhesivos, materiales de construcción, embalaje, entre otros, no podrá ser considerado un polímero funcional y deberá calificarse como **polímero estructural**, ya que, los grupos químicos presentes en la cadena polimérica no han influido en la actividad a la que el polímero ha sido destinado. Es relevante mencionar que, aunque en algunas ocasiones se aprovechen las propiedades mecánicas del material, esto no lo excluye para ser calificado como **polímero funcional**. Retomando el ejemplo del PVA, este es empleado como material para generar lentes de contacto por sus óptimas propiedades mecánicas, sin embargo, también se aprovecha su capacidad de absorber agua para mantener un ambiente húmedo, lo que es crucial para mantener la integridad del ojo; por lo tanto, a pesar de que las propiedades físicas han promovido su empleo, es el aprovechamiento de sus grupos hidroxilos los que han determinado que el polímero sea **funcional** en esta aplicación concreta.

1.2.2.- Tipos de polímeros funcionales.

Teniendo en cuenta que el concepto de polímeros funcionales está asociado exclusivamente a la aplicación específica, resulta lógico que estos se categoricen del mismo modo que los polímeros en general: naturales, sintéticos y semisintéticos.

En la **Tabla 1.1** se clasifican algunos de los polímeros funcionales más empleados, especificando su funcionalidad y aplicación, mientras que en la **Figura 1.1** se ilustran sus estructuras poliméricas.

Tabla 1.1. Clasificación de polímeros funcionales y su aplicación específica.

Clasificación	Polímero	Funcionalidad	Referencias
Natural	Celulosa	Alta hidrofiliidad	Thongsomboon et al., 2023; Zainul Armir et al., 2021
	Almidón	Alta hidrofiliidad	Pacholczak et al., 2023; Supare y Mahanwar, 2022
	Quitina	Fuente de nitrógeno y actividad biocida	Giraldo et al., 2023; Shamshina et al., 2019
	Colágeno	Alta hidrofiliidad. Poliquelatógeno y polielectrolito.	Ambrosini et al., 2021; Noorzai y Verbeek, 2023
Semi-sintético	Quitosano	Fuente de nitrógeno. Actividad biocida. Poliquelatógeno.	Riseh et al., 2023; Román-Doval et al., 2023
	Carboximetil-celulosa (CMC)	Alta hidrofiliidad. Poliquelatógeno y polielectrolito.	Bauli et al., 2021; Saberi Riseh et al., 2023
	Quitosano cuaternizado	Polielectrolito. Fuente de nitrógeno y actividad biocida.	Khattak et al., 2019; Marin et al., 2023
Sintético	Poli(ácido acrílico) (PAA)	Alta hidrofiliidad. Poliquelatógeno y polielectrolito.	Jayanudin et al., 2022; Krasnopeevea et al., 2022
	Poli(vinil alcohol) (PVA)	Alta hidrofiliidad. Poliquelatógeno.	Nooeaid et al., 2021; Sarkar y Sen, 2018
	Poli(acrilamida) (PAAm)	Alta hidrofiliidad.	Rodrigues Sousa et al., 2021; Vasconcelos do Nascimento et al., 2021
	Poli(ácido metacrílico) (PMA)	Alta hidrofiliidad. Poliquelatógeno y polielectrolito.	Bajpai et al., 2007; Panic et al., 2013

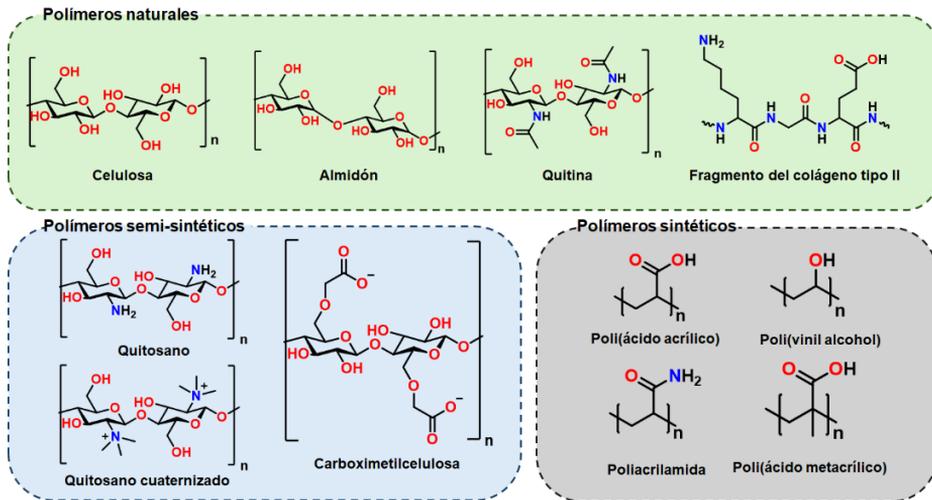


Figura 1.1. Estructuras químicas de los polímeros funcionales más estudiados en aplicaciones agrícolas.

1.2.2.1.- Polímeros funcionales naturales.

Los polímeros funcionales naturales son macromoléculas derivadas directamente de la naturaleza de fuentes vegetales, animales, microbianas, fúngicas, de algas, entre otros, y son los más empleados en aplicaciones agrícolas, debido a que representan materiales económicos, de amplia disponibilidad y, por lo general, con alta tasa de biodegradabilidad (Sikder et al., 2021). Entre los polímeros funcionales naturales más estudiados se encuentran la celulosa, el almidón, la quitina, el colágeno, entre otros, debido a la presencia de múltiples grupos hidrofílicos en sus estructuras poliméricas que les confiere la capacidad de almacenar agua, lo que es de gran interés en las actividades agrícolas ya que, propicia la adecuada gestión de dicho recurso. Adicionalmente, cuando la aplicación requiere que los materiales sean biodegradables en función de evitar su acumulación en el ambiente, la mayoría de los polímeros naturales son funcionales, debido a que su estructura química presenta fragmentos químicos accesibles para la degradación por microorganismos; los polisacáridos, por ejemplo, disponen

de enlaces glicosídicos que son susceptible a hidrólisis enzimática de hidrolasas, como la celulosa, amilasas, quitinasas, entre otros (Le Strat et al., 2022; Qiu et al., 2022), lo que promueve la descomposición de dichos biopolímeros. En la Sección 1.3.5 del presente capítulo se profundizará más acerca de los polímeros funcionales biodegradables.

La celulosa es uno de los polímeros naturales más estudiados, es cual es producido por las plantas debido a que es el biopolímero constituyente de las paredes celulares de las células vegetales (Akelah, 2013; Wypij et al., 2023). En las fuentes naturales lignocelulósicas, que incluyen la madera, algodón, trigo, maíz, arroz, etc., las fibras de celulosa se encuentran inmersas en una matriz de lignina, actuando como biomateriales de refuerzo (Akelah, 2013). Como se mencionó en la introducción de este capítulo, su estructura polihidroxilada le confiere una alta hidrofiliidad, siendo un biopolímero funcional en aplicaciones que incluyen el almacenamiento y gestión de agua, acondicionamiento del suelo, y la generación de sistemas hidrofílicos para mantener un ambiente húmedo en las raíces vegetales (Zainul Armir et al., 2021; Thongsomboon et al., 2023).

El almidón, por su parte, es la principal forma de carbohidrato almacenado en sistemas vegetales y, por lo tanto, se encuentra en alimentos como la papa, maíz, arroz, yuca, trigo, entre otros (Akelah, 2013; Behera y Mahanwar, 2020), por lo que estos sirven de materia prima para la obtención de dicho polisacárido. De manera análoga a la celulosa, el almidón también es un polímero funcional porque sus grupos hidrofílicos se aprovechan para almacenar agua; sin embargo, a diferencia de la celulosa, el almidón no está organizado en estructuras ordenadas cristalinas resistente, sino que, por el contrario, es un polímero altamente ramificado que genera gránulos amorfos que facilitan la penetración del agua y tornándolo menos resistente a esta (Bertoft, 2017; Donmez et al., 2021), lo cual ha limitado su aplicación. La quitina también es un polisacárido, el cual constituye las paredes celulares de especies fúngicas y del exoesqueleto de los artrópodos, siendo comúnmente extraída mediante tratamiento químico con solución alcalina de dichas fuentes (Akelah, 2013; Giraldo et al., 2023). Esta macromolécula es un polímero funcional atractivo porque, además de compartir las propiedades químicas de los polisacáridos expuestos anteriormente,

dispone de grupos nitrogenados que pueden ser empleados en el desarrollo de fertilizantes y bactericidas naturales (Riseh et al., 2023; Román-Doval et al., 2023). El colágeno, por otra parte, es una proteína que constituye los tejidos conectivos de la piel y cartílagos de muchos animales, que se ha estudiado como polímero funcional natural (Akelah, 2013; Ambrosini et al., 2021; Noorzai y Verbeek, 2023). Este biopolímero cuenta con una variedad de grupos amino, ácidos carboxílicos, hidroxilo, entre otros, que le ha permitido actuar como agente complejante de metales pesados para la descontaminación de suelos, sistema hidrofílico para la gestión del agua, o agentes de intercambio iónico para atraer y/o liberar agroquímicos (Ambrosini et al., 2021; Noorzai y Verbeek, 2023).

1.2.2.2.- Polímeros funcionales semi-sintéticos.

La desventaja de los polímeros naturales radica en que, a pesar de su aplicación en las áreas expuestas en la sección anterior, su funcionalidad es generalmente restringida, limitando su uso en determinadas actividades agrícolas. En ese sentido, estos son modificados químicamente para generar polímeros semi-sintéticos funcionales con el objetivo de proveerle propiedades químicas adicionales a las presentes en su forma nativa, ampliando su versatilidad de aplicación en otros campos (Akelah, 2013). El polímero semi-sintético más conocido es el quitosano, el cual se obtiene a partir de la desacetilación de la quitina con la finalidad de generar un biopolímero con grupos amino libres que faciliten su solubilidad, mejoren sus propiedades biocidas y presenten la capacidad de formar complejos con iones metálicos (Riseh et al., 2023; Román-Doval et al., 2023). Otro ejemplo igual de reconocido es el de la carboximetilcelulosa (CMC). Este polímero semi-sintético se obtiene a partir de la celulosa, a la cual se le incorporan grupos iónicos complejantes de $-\text{COOH}$ en su estructura polimérica, disponiendo de la funcionalidad capturar especies químicas catiónicas (Bauli et al., 2021; Saberi Riseh et al., 2023).

La producción de polímeros semi-sintéticos es atractiva debido a que, a diferencia de los polímeros sintéticos, estos no demandan procesos de síntesis complejos. De hecho, muchas reacciones de modificación se pueden realizar en un solo paso; el CMC, por ejemplo, se obtiene al reaccionar la

celulosa con ácido cloroacético en medio alcalino, siendo este un proceso químico relativamente sencillo (Kunjalukkal Padmanabhan et al., 2023; Shui et al., 2017). Sin embargo, los polímeros funcionales semi-sintéticos presentan la limitación de que, usualmente, su obtención conlleva reacciones secundarias indeseables, generando numerosos subproductos potencialmente peligrosos (Akelah, 2013; Sikder et al., 2021), por lo que todavía es necesario la investigación de métodos de modificación de polímeros naturales que, además de continuar siendo sencillos, sean efectivos e ino cuos.

1.2.2.3.- Polímeros funcionales sintéticos.

Los polímeros sintéticos son materiales derivados completamente de recursos fósiles que, generalmente, son clasificados como polímeros estructurales debido a que sus propiedades físicas se ajustan y controlan a través de su proceso de síntesis para obtener materiales empleados en la fabricación de redes, cubiertas, tubos, recipientes, macetas, plásticas, adhesivos, entre otros (Akelah, 2013; Sikder et al., 2021). A pesar de ello, se han reportado numerosos polímeros funcionales sintéticos; por ejemplo, el PVA o el poli(ácido acrílico) (PAA), son polímeros funcionales sintéticos debido a que son empleados como sistemas hidrofílicos para almacenar agua, siendo incluso más atractivos que sus contrapartes naturales debido a sus propiedades mecánicas mejoradas (Shaghaleh et al., 2018; Sikder et al., 2021).

Los polímeros funcionales sintéticos se obtienen mediante los métodos convencionales de polimerización radical, condensación, transferencia de átomo o cadena, entre otros; sin embargo, dichos procesos usualmente liberan subproductos tóxicos, generan radicales libres al medio, e incluso requieren radiación UV para inducir fotoiniciadores, plateando una serie de riesgos potenciales en los tejidos biológicos (Behera y Mahanwar, 2020; Sikder et al., 2021). Por lo tanto, la aplicación de estos polímeros en contextos ecológicos, como es la agricultura, ha sido controversial.

Los polímeros sintéticos también son sometidos a procesos de modificación cuando el polímero funcional deseado no puede ser sintetizado

mediante un proceso de polimerización directa (Akelah, 2013; Sikder et al., 2021). Para ello, los enfoques de modificación pueden estar asociados a generar reacciones en la cadena principal polimérica o, como es común en la obtención de polímeros funcionales semi-sintéticos, en sus grupos laterales. Este último método es usualmente preferido debido a que se permite obtener polímeros funcionales sintéticos con la funcionalidad de interés, manteniendo las propiedades físicas del material nativo (Akelah, 2013; Krasnopeevea et al., 2022). El poliestireno, por ejemplo, es clorometilado y litiado en función de generar polímeros reactivos con especies electrófilas y nucleófilas (Akelah, 2013). En la literatura se pueden encontrar múltiples documentos que recompilan información acerca de la modificación de polímeros sintéticos, donde se destaca el capítulo de Akelah (2013); sin embargo, la nula biodegradabilidad de estos materiales, en conjunto con la problemática asociada a los procesos de polimerización convencionales expuestos anteriormente, ocasiona que la aplicación de polímeros funcionales sintéticos sea regulada y restringida en el ámbito agrícola.

1.3.- Polímeros funcionales empleados en la agricultura.

Como se mencionó anteriormente, los polímeros funcionales han sido investigados para ser empleados en una amplia variedad de aplicaciones. En esta sección se discutirán los materiales más estudiados basados en polímeros funcionales.

1.3.1.- Hidrogeles.

Los hidrogeles pueden definirse como redes poliméricas tridimensionales entrecruzadas que disponen de la capacidad de absorber grandes cantidades de agua sin disolverse (Milani et al., 2017; Sikder et al., 2021; Palencia, 2021 a). En el contexto agrícola, estos materiales son más conocidos como polímeros superabsorbentes (SAP), y son de especial interés debido a su amplia gama de aplicaciones, que incluyen la generación de sistemas de gestión adecuada del agua, acondicionadores del suelo, e incluso materiales de retención y liberación controlada de agroquímicos o nutrientes (Sikder et al., 2021). El esquema de funcionamiento de estos sistemas se ilustra en la **Figura 1.2**. El estudio de estos polímeros se remonta

a inicios de la década de los 80, cuando se reportó que los hidrogeles de polímeros basados en acrilatos y metacrilatos de alquilo podían actuar como agentes acondicionadores del suelo (Milani et al., 2017; Sikder et al., 2021).

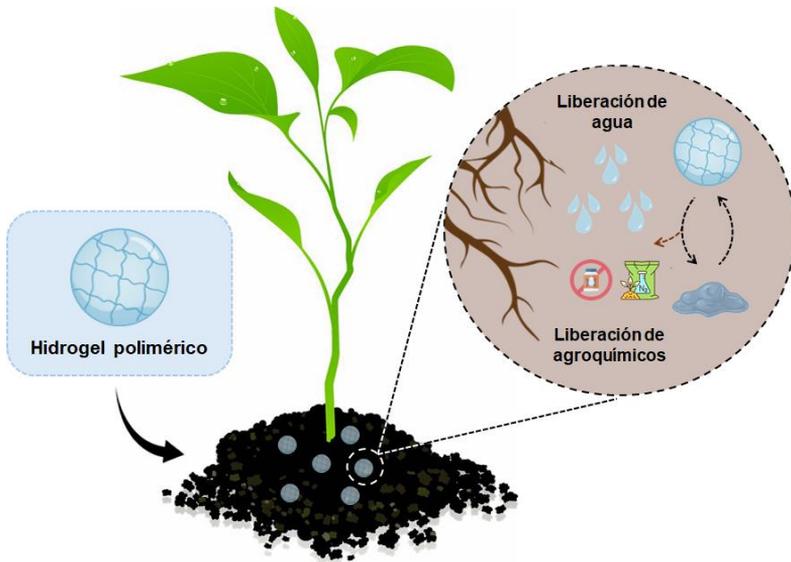


Figura 1.2. Esquema ilustrativo de la aplicación de hidrogeles poliméricos en aplicaciones agrícolas.

El mecanismo de absorción de agua ha sido documentado por Milani et al. (2017), quienes describieron que este proceso obedece una serie de etapas secuenciales que inician con la hidratación de los grupos hidrofílicos presentes en el hidrogel mediante enlaces de hidrógeno con el agua, seguido por la formación de interacciones secundarias débiles, comúnmente dipolo-dipolo inducido, entre las moléculas de agua y los grupos hidrofóbicos de la cadena polimérica. Es importante resaltar que estos procesos son posibles gracias a las cadenas entrecruzadas, debido a estas contrarrestan el efecto de las fuerzas osmóticas que conllevarían la disolución del polímero (Behera y Mahanwar, 2020; Milani et al., 2017). Finalmente, el hidrogel alcanza su equilibrio de hinchamiento, y las moléculas de agua son liberadas gradualmente al medio (Behera y Mahanwar, 2020). Los polímeros

funcionales más empleados para la obtención de hidrogeles, en conjunto con sus capacidades de absorción de agua en términos de su hinchamiento, se exponen en la **Tabla 1.2**.

Tabla 1.2. Clasificación de polímeros funcionales y su aplicación específica.

Polímero	RH (%) *	Funcionalidad adicional	Referencias
Almidón/quitosano	210.36	Retención y liberación de herbicidas	Supare y Mahanwar, 2022
Almidón/ácido itacónico	650	Retención y liberación de urea	Bora y Karak, 2022
Almidón/PAAm/poli(ácido 2-acrilamido-2-metilpropan sulfónico)	158.3	Retención y liberación de urea	Kolya y Kang, 2023
CMC/poli(4-vinilpiridina)	1420	Retención y liberación de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ y urea	Mohamed et al., 2022
CMC/HEC	1070	Alta biodegradabilidad	Das et al., 2023
CMC/HEC	600	Alta biodegradabilidad	Das et al., 2020
CMC/HEC	2055	Retención y liberación de urea	Ahmad et al., 2023
CMC/HEC/suero ácido	1400	Retención y liberación de KNO_3 y urea	Durpekova et al., 2021
PAA	1200	Remoción de metales pesados	Gokmen et al., 2021
PAA-Alginato de sodio	42954	-	Craciun et al., 2023
PVA/Polietilenglicol	> 250	Retención y liberación de Fe^{3+} y urea	Sarkar y Sen, 2018
PVA/CMC/HEC	1840	Alta biodegradabilidad	Fabian et al., 2024

PAAm/acrilato de potasio	462	-	Vasconcelos et al., 2021
PAAm /goma de anacardo	15000	Liberación controlada de fósforo	Rodrigues Sousa et al., 2021
PMAA	420	Remoción de contaminantes catiónicos	Panic et al., 2013
PMAA/PAA parcialmente neutralizado	> 160	-	Bajpai et al., 2007
Quitosano coordinado con Al ³⁺	> 500	Respuesta al pH	Zhang et al., 2022

* Razón de hinchamiento (RH): es el cociente entre la diferencia de pesos del hidrogel seco y el hidrogel húmedo con respecto al hidrogel seco. El peso del hidrogel húmedo se mide hasta que alcanza el equilibrio, es decir, hasta que su peso se torna constante.

Los polímeros funcionales naturales han exhibido óptimos resultados para la obtención de hidrogeles. La revisión de [Supare y Mahanwar \(2022\)](#) reúne los métodos de obtención de hidrogeles basados en polisacáridos; sin embargo, dichos enfoques son aplicables a la gran mayoría de polímeros funcionales naturales. [Cannazza et al. \(2014\)](#) reportaron la obtención de hidrogeles de celulosa a partir de sus derivados de CMC e hidroxietilcelulosa (HEC), obteniendo un material con alta capacidad de absorción y liberación de agua en suelo blanco y rojo. [Das et al. \(2020\)](#), por otro lado, sintetizaron un hidrogel a partir de CMC y HEC, pero empleando ácido cítrico como agente entrecruzante, reemplazando los reticulantes orgánicos contaminantes derivados del petróleo, obteniendo un absorbente con una capacidad del 600 % de hinchamiento. También se han sintetizado hidrogeles a partir de almidón, pero, como se mencionó anteriormente, este biopolímero enfrenta limitaciones asociadas con su capacidad de almacenamiento agua, por lo tanto, resulta habitual que este polisacárido se modifique químicamente con el objetivo de suplir dicho inconveniente. [Kolya y Kang \(2023\)](#) por ejemplo, sintetizaron un hidrogel basado en almidón, acrilamida y ácido 2- acrilamido-2-metilpropansulfónico, aprovechando las propiedades hidrofílicas de dicho polímero natural y mejorando sus propiedades mecánicas con los polímeros sintéticos mencionados con la finalidad de incrementar su capacidad de absorción de agua; a pesar de ello,

los porcentajes de hinchamiento alcanzados continuaban siendo inferiores en comparación con los hidrogeles basados en otros polímeros funcionales (Ver **Tabla 1.2**). Del mismo modo, [Bora y Karak \(2022\)](#) modificaron este biopolímero con ácido itacónico en función de mejorar dicha propiedad de hinchamiento, pero, desafortunadamente, los resultados fueron análogos a los anteriormente expuestos. La quitina, por otra parte, es un polímero natural que exhibe menor afinidad al agua debido a sus grupos acetilamina poco hidrofílicos, por lo tanto, una alternativa prometedora es emplear quitosano; sin embargo, la alta solubilidad de este polímero en agua ha limitado su aplicación ([Krasnopeevea et al., 2022](#); [Pathak et al., 2019](#)). [Zhang et al. \(2022\)](#) modificaron este polisacárido complejándolo con aluminio, mejorando sus propiedades mecánicas y, consecuentemente, sus propiedades de almacenamiento de agua. Sin embargo, al igual que las investigaciones acerca del almidón modificado, dicha capacidad de hinchamiento continúa siendo menor en comparación a otros sistemas.

Es posible evidenciar que los polímeros naturales son materiales funcionales atractivos debido a sus altas tasas de biodegradabilidad y, consecuentemente, su impacto positivo con el medio ambiente; sin embargo, como se mencionó anteriormente, la mayoría de estas macromoléculas disponen de deficientes propiedades mecánicas, limitando su aplicación en la producción de hidrogeles ([Krasnopeevea et al., 2022](#); [Sikder et al., 2021](#); [Supare y Mahanwar, 2022](#)). En ese orden de ideas, los polímeros sintéticos funcionales emergen como una solución viable, debido a la posibilidad de modular sus propiedades físicas durante su síntesis, obteniendo hidrogeles con capacidades de hinchamiento mejoradas. Los polímeros funcionales sintéticos basados en PAA, PVA, poliacrilamida (PAAm), poli(ácido metacrílico) (PMAA), entre otros, son los polímeros sintéticos funcionales más empleados para dicho propósito ([Milani et al., 2017](#); [Sikder et al., 2021](#)). Un ejemplo destacado fue la investigación pionera ejecutada por [Callaghan et al. \(1988\)](#) acerca de la síntesis de un hidrogel basado en PVA y PAAm, que pretendía mejorar la supervivencia y crecimiento de las plantas en suelos de regiones áridas como el Sudán. Los resultados exhibieron que, a pesar de las condiciones de estrés hídrico severo, la capacidad de hidrogel permitió mantener la en el suelo, promoviendo la germinación de las semillas, y prologando la supervivencia de las plantas. [Gokmen et al. \(2021\)](#)

sintetizaron hidrogeles basados en PAA a partir de polimerización radicalaria, obteniendo un SAP sintético con altos valores de retención de agua. [Craciun et al. \(2023\)](#) reportaron que era posible sintetizar hidrogeles basados en PAA y alginato de sodio con capacidades sumamente altas de absorción de agua (> 40000 %), mediante la técnica de polimerización de irradiación de electrones; no obstante, todavía se requieren investigaciones adicionales que garanticen la inocuidad de aplicar esta técnica en tejidos situados en ambientes ecológicamente sensibles.

A pesar de las ventajas expuestas previamente, la incapacidad de los polímeros sintéticos funcionales de degradarse rápidamente sin generar subproductos tóxicos ha conllevado que su empleo en aplicaciones agrícolas sea un tema controvertido ([Milani et al., 2017](#); [Krasnopeevea et al., 2022](#); [Sikder et al., 2021](#); [Milani et al., 2017](#)). En la investigación de [Stahl et al. \(2000\)](#) ratificaron esta premisa, ya que, reportaron que microorganismos fúngicos de *Phanerochaete chrysosporium* eran incapaces de degradar hidrogeles sintéticos basados en PAA y PAAm. Una estrategia para solucionar dicha problemática ha consistido en la obtención de hidrogeles híbridos, en el que se combinan polímeros sintéticos y naturales en función de obtener un material que, además de disponer de las óptimas propiedades físicas de las macromoléculas sintéticas, también presentan la biodegradabilidad inherente de los biopolímeros. La investigación pionera de [Woodhouse y Johnson \(1991\)](#) es un ejemplo de ello, al sintetizar un hidrogel basado en un copolímero de almidón y PAAm, el cual denotó una respuesta positiva de almacenamiento de agua en presencia de ambos polímeros. También se destaca la investigación de [Mukerabigwi et al. \(2015\)](#), quienes injertaron PAAm en cadenas de xiloglucanos, obteniendo un hidrogel con una alta capacidad de hinchamiento gracias a las óptimas propiedades mecánicas de su composición sintética y alta hidrofiliidad de su parte polisacárida biodegradable. [Guo et al. \(2022\)](#), por su parte, sintetizaron un hidrogel semisintético a partir de CMC, ácido acrílico y ácido 2-acrilamido-2-metilpropanosulfónico, obteniendo una alta capacidad de absorción de agua, en conjunto con una alta tolerancia a la sal, presentando el potencial de actuar como acondicionar en suelos salinos. [Pathak et al. \(2019\)](#) modificaron el almidón de papa con succinato mediante reacciones de esterificación, para

obtener un hidrogel biodegradable que actuase como recubrimiento sobre el crecimiento de semillas de maíz.

Aunque generalmente los hidrogeles son polímeros funcionales aplicados para la absorción de agua, también se han empleado como materiales para retener y liberar especies químicas en solución. Zhan et al. (2004) sintetizaron un hidrogel basado en PVA y, a su vez, injertaron moléculas de ácido fosfórico mediante reacciones de esterificación para la liberación controlada de especies de fosfato. Este ejemplo resulta particularmente ilustrativo porque permite evaluar el concepto de polímero funcional asociado con la aplicación: en este caso particular, el PVA es un polímero funcional, pero, a diferencia de las investigaciones mencionadas anteriormente, no lo es por su capacidad para absorber de agua, sino por sus grupos -OH que propician la generación de grupos ésteres PVA-fosfato, los cuales pueden ser fácilmente hidrolizados para promover la liberación de dicho nutriente. Xu et al. (2018) de manera análoga, sintetizaron un hidrogel basado en colágeno, ácido acrílico y ácido 2-acrilamido-2-metil-1-propanosulfónico, cuya funcionalidad recaía en los grupos ácidos carboxílicos y amido que disponían de la capacidad de formar enlaces de coordinación con especies de hierro para su captura y liberación. En un estudio paralelo, Cheng et al. (2018) desarrollaron un hidrogel basado en ácido acrílico y urea para obtener un material absorbente con la capacidad de liberar nitrógeno al medio. Con un enfoque similar, Xu et al. (2019) también sintetizaron un hidrogel a partir de ácido acrílico copolimerizado con cloruro de dialildimetil amonio, una especie catiónica amonio cuaternaria, presentando la funcionalidad de interactuar con el herbicida ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D).

1.3.2.- Adsorbentes.

Después de los hidrogeles, los polímeros funcionales adsorbentes son los más investigados y sintetizados debido a su amplia versatilidad y simplicidad de operación. Como su nombre lo indica, estos materiales poseen la capacidad de adsorber moléculas específicas en su superficie con las cuales disponga afinidad química. Dicha sorción puede ser física, cuando las interacciones superficie-sustrato son débiles debido a fuerzas de van der

Waals como enlaces de hidrógeno, fuerzas dipolares, interacciones hidrofóbicas, o de dispersión de London; mientras que la adsorción también puede ser de carácter químico, que ocurre cuando la interacción polímero-sustrato es fuerte debido a la formación de un enlace químico entre las especies involucradas. En la **Tabla 1.3** se reportan algunos polímeros funcionales empleados como sistemas adsorbentes, en conjunto con los adsorbatos y naturaleza de sorción.

Los polímeros funcionales naturales se encuentran limitados debido a que su estructura química polimérica carece, usualmente, de fragmentos químicos afines con el sustrato de interés. La celulosa, por ejemplo, solamente dispone de grupos -OH, por lo que su empleo como adsorbente ha sido restringido a procesos de fisisorción mediante enlaces de hidrógeno para retener contaminantes orgánicos con grupos hidrofílicos, como colorantes, y agroquímicos (Ver **Tabla 1.3**).

Tabla 1.3. Polímeros funcionales como sistemas de adsorción, en conjunto con sus adsorbatos y naturaleza de adsorción.

Polímero	Grupo Funcional	Adsorbato	NAd	CAd *	Ref.
Celulosa (Cel)	OH alifáticos	Boscalid	Fca	3.09 %	Ho et al., 2023
Cel amino- modificada	NH ₂	Rojo Congo	Fca	229.8 mg/g	Yue et al., 2019
Cel amino- modificada	NH ₂	Azul de metileno	Fca	88.5 mg/g	Yue et al., 2019
Cel oxidada	COO ⁻	Mn ²⁺	Qca	52.9 mg/g	He et al., 2022
Cel oxidada	COO ⁻	Pb ²⁺	Qca	272.5 mg/g	He et al., 2022
Colágeno/Cel	OH/NH ₂ / COOH	Cu ²⁺	Qca	1.12 mmol/g	Min et al., 2014

PAA	COO ⁻	Cu ²⁺	Qca	51.74 %	Szewczuk-Karpisz et al., 2021
PAAm aniónica	COO ⁻	Cristal violeta	Fca	378 mg/g	Lebkiri et al., 2023
PAAm/cáscara de arroz	CONH ₂	Cd ²⁺	Qca	558 mg/L	Laila et al., (2023)
PMAA/PAA	COOH	Diuron	Fca	14.58 mg/g	Wong et al., (2016)
PVA/CDxT ***	OH	Paraquat	Fca	94.5 %	Martwong et al., (2021)
Quitosano	NH ₂ /OH	Zn ²⁺	Qca	20 mg/g	Deshpande et al., 2017
Quitosano	NH ₂ /OH	Atrazina	Fca	17.92 mg/g	Liu et al., 2015
Quitosano/PAA	COO ⁻	NH ₄ ⁺	Fca	149.25 mg/g	Zhang et al., 2020
Quitosano/PVA	NH ₂ /OH	Cu ²⁺	Qca	303.29 mg/g	Sopanrao y Sreedhar, 2024
Quitosano/PVA	NH ₂ /OH	Ni ²⁺	Qca	209.08 mg/g	Sopanrao y Sreedhar, 2024
Quitosano/PVA	NH ₂ /OH	Zn ²⁺	Qca	173.39 mg/g	Sopanrao y Sreedhar, 2024

* Capacidad de Adsorción (ACd): Aunque generalmente este valor se reporta en unidades de mg/g, en esta tabla se presenta las diferentes formas en que los autores decidieron informar este resultado. ** Naturaleza de la adsorción (NAd): Física (Fca) o Química (Qca). *** CDxT: Ciclodextrina.

En ese sentido, es imperativa la modificación de estos biomateriales para obtener polímeros semisintéticos con las funcionalidades deseadas. En este caso, los polisacáridos, como la celulosa, resultan especialmente atractivos por la alta densidad de grupos -OH que pueden ser sometidos a diferentes

reacciones, como esterificación, oxidación, eterificación, entre otros, en función de obtener los grupos químicos adsorbentes de interés (Bekchanov et al., 2024; Hokkanen et al., 2016). He et al. (2022), por ejemplo, oxidaron la celulosa con 2,2,6,6-tetrametil-1-piperidiniloxi (TEMPO), para generar grupos -COO- que quimisorben Pb y Mn mediante interacciones electrostáticas y enlaces de coordinación. Yue et al. (2019) modificaron la celulosa adicionándole grupos -NH₂ para capturar electrostáticamente contaminantes orgánicos como el Rojo Congo y el azul de metileno. El quitosano también es un polímero semisintético que presenta la capacidad de quimisorber metales pesados mediante la formación de enlaces de coordinación con metales debido a sus grupos donadores de electrones -NH₂ y -OH. Deshpande et al. (2017) aprovecharon este fenómeno y sintetizó nanopartículas de quitosano empleando tripolifosfato como agente reticulante, las cuales formaron complejos de Zn, demostrando el potencial de ser empleados como nanoportadores de dicho nutriente en los cultivos. Dichos grupos químicos también se aprovechan para adsorber físicamente otros agroquímicos mediante enlaces de hidrógeno. Liu et al. (2015), por ejemplo, aprovecharon estas propiedades del quitosano para generar un material compuesto con la Sepiolita, un mineral arcilloso, para adsorber eficazmente el herbicida Atrazina.

Los polímeros funcionales sintéticos son, de hecho, más atractivos debido a que, durante su síntesis, es posible proveerle fragmentos químicos a la cadena polimérica que presentan la capacidad de interactuar con el sustrato de interés. El PAA, por ejemplo, al disponer grupos -COOH en su estructura, se ha empleado como polímero funcional para adsorber metales pesados, mediante interacciones electrostáticas o enlaces de coordinación, y especies orgánicas catiónicas. Szewczuk-Karpisz et al. (2021) emplearon el PAA para quimisorber metales pesados, como el Cu²⁺. Zhang et al. (2020), en un intento de mejorar la eficiencia del uso de nitrógeno en el suelo, emplearon un material basado en PAA, quitosano y biocarbón para adsorber amonio, aunque es evidente que la atracción electrostática entre los grupos carboxilato del PAA y el sustrato catiónico son los responsables de la adsorción. Lebkiri et al. (2023) también emplearon PAAm aniónico, es decir, con grupos COO⁻ para fisorber un contaminante orgánico catiónico, como el cristal violeta. Sopanrao y Sreedhar (2024) generaron un polímero híbrido

de PVA/Quitosano, obteniendo un poliquelatógeno con una amplia variedad de grupos -OH y NH₂ con la capacidad de complejar metales (Ver **Tabla 1.3**).

1.3.3.- Polímeros pesticidas.

Una de las principales preocupaciones de los agricultores es la preservación de sus cosechas contra plagas, como bacterias, hongos, insectos, plantas invasoras, entre otros. Tradicionalmente, esta problemática es solventada temporalmente con la aplicación de pesticidas; sin embargo, la mayoría de estos químicos, que incluyen estreptomycina, voriconazol, ácido oxolínico, y más, son tóxicos y tienden a acumularse en el ecosistema, suscitando una creciente preocupación por el potencial riesgo de que dichas sustancias ingresen a la red alimentaria, lo cual, consecuentemente, desencadenaría un impacto perjudicial en la salud de humanos y animales (Cherwoo et al., 2023; Puoci et al., 2008; Sikder et al., 2021). En ese sentido, se han investigado diferentes polímeros funcionales que permiten mitigar los efectos adversos generados por los biocidas convencionales.

El quitosano, por ejemplo, dispone de propiedades antimicrobianas inherentes debido a sus grupos amino primarios (Atay, 2019; Román-Doval et al., 2023). Se han propuesto dos mecanismos de dicha actividad biocida: (i) en primer lugar, el quitosano dispone de propiedades policatiónicas cuando el pH ambiental está por debajo del pKa aparente de los grupos amino primarios de este polisacárido (pKa ~ 6.5), adhiriéndose a la pared celular microbiana cargada negativamente, alterando su permeabilidad y, consecuentemente, liberando el contenido celular y conduciendo a la muerte del microorganismo (Ver **Figura 1.3**) (Atay, 2019; Puoci et al., 2008) y, (ii) como se mencionó en la sección anterior, el quitosano compleja oligoelementos metálicos, propiciando la producción de toxinas y, por ende, afectando la integridad del microorganismo (Atay, 2019; Román-Doval et al., 2023). Al-Zahrani et al. (2021) prepararon nanopartículas de quitosano, y reportaron una alta actividad fungicida contra cepas de *Rhizopus oryzae*, *Aspergillus niger* y *Alternaria alternata*. Liu et al. (2014) prepararon un material basado en quitosano/ácido kójico, que demostró actividad biocida contra *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Aspergillus niger* y *Saccharomyces cerevisiae*.

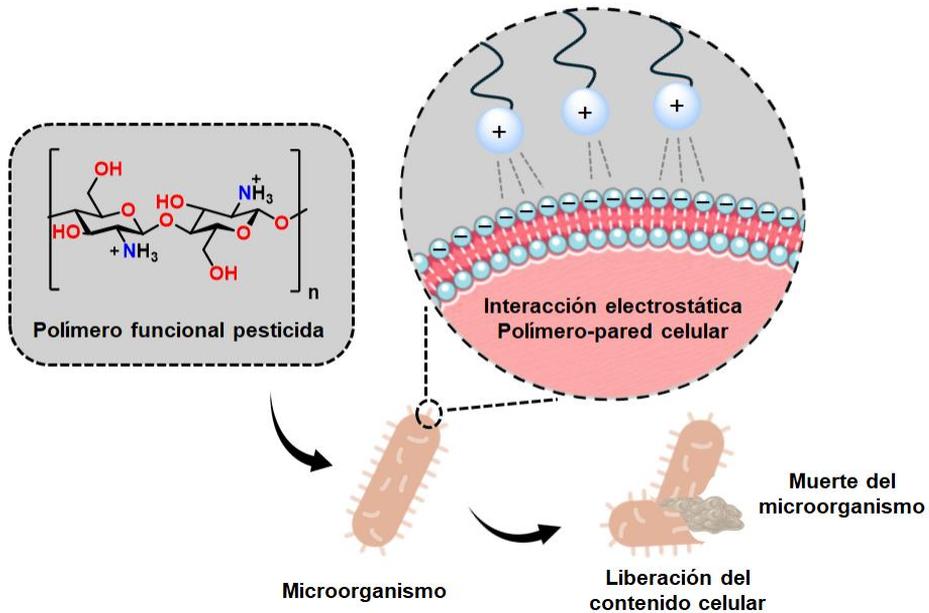


Figura 1.3. Mecanismo biocida de los polímeros funcionales con grupos catiónicos como el quitosano.

Los polímeros sintéticos o semi-sintéticos que disponen de grupos amonio cuaternario con al menos una cadena alquílica de más de ocho átomos de carbono, se caracterizan por disponer propiedades biocidas. El mecanismo de acción inicia por la adsorción del polímero en la pared celular promovida por los grupos amonio catiónicos, para, posteriormente, liberar la cadena alquílica a través de la pared celular por difusión, lo cual debilita la membrana citoplasmática y libera el contenido celular, conllevando la muerte celular (Cherwoo et al., 2023; Puoci et al., 2008). El quitosano, nuevamente, ha sido modificado con estos grupos con el objetivo de mejorar sus propiedades antimicrobianas, lo que puede ser evidenciado con la investigación de Badawy et al. (2014), quienes generaron derivados amonios cuaternarios de *N*-(bencil)quitosano, obteniendo polímeros funcionales con actividad antibacteriana y antifúngica. El estudio de Chen et al. (2000)

representa una de las investigaciones pioneras de polímeros sintéticos biocidas, en las que se sintetizaron dendrímeros basados en poli(propilenimina) que se funcionalizó con sales amonio cuaternarias, obteniendo un polímero funcional bactericida. [Palencia et al. \(2020\)](#) funcionalizaron poliuretanos con una sal de cloruro de *N*-carboximetil-*N,N,N*-triethylamonio, obteniendo actividad bactericida contra *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus*.

Los polímeros pesticidas basados en *N*-halaminas, los cuales son polímeros que presentan enlaces nitrógeno-halógeno, son materiales biocidas que, a pesar de ser escasamente investigados, son promisorios. Su mecanismo de acción se basa en el contacto directo entre la pared celular y el fragmento *N*-halamina del polímero, liberando halógenos oxidativos a los receptores apropiados y, consecuentemente, conllevando a la inhibición de los procesos celulares que favorecen la muerte del microorganismo ([Demir et al., 2017](#); [Puoci et al., 2008](#)). La ventaja de estos polímeros funcionales es que, según se ha reportado, estos no exhiben resistencia bacteriana ([Demir et al., 2017](#)). [Sun y Sun \(2003\)](#), por ejemplo, injertaron 3-alil-5,5-dimetilhidantoína en un polímero funcional basado en PEG con especies diacrilato que propiciaron la inserción de la *N*-halamina, presentando actividad bactericida con respecto a especies gramnegativas y grampositivas. No obstante, resulta imperativo mencionar que, su empleo se ha limitado debido a los monómeros costosos o complejos de sintetizar, en conjunto con una estricta política de aprobación regulatoria debido a la alta toxicidad asociada con estos sistemas ([Demir et al., 2017](#); [Puoci et al., 2008](#)).

1.3.4.- Polímeros biodegradables.

Una funcionalidad imperativa en el empleo de polímeros funcionales en la agricultura es que estos sean biodegradables en función de evitar su acumulación en el ambiente ecológico. La biodegradabilidad de los polímeros se puede definir como la capacidad que estos materiales presentan de descomponerse mediante procesos enzimáticos y microbiológicos. Los fragmentos de descomposición generados se redistribuyen en el medio ambiente a través de ciclos de carbono, nitrógeno y azufre ([Milani et al., 2017](#); [Samir et al., 2022](#)). [Xiang et al. \(2021\)](#), por

ejemplo, sintetizaron un hidrogel SAP basado en HEC, acrilato de sodio y acrilamida con dos objetivos: (i) capturar metales pesados y, (ii) que los materiales fuesen biodegradables. Los resultados de biodegradabilidad se realizaron enterrando el material en un suelo natural bajo condiciones controladas. Los resultados demostraron una alta pérdida de masa del material con respecto al tiempo, debido a la presencia de celulosa cuyos enlaces β -1,4-glucosídicos que presentan la capacidad de ser hidrolizados y fragmentados fácilmente por acción enzimática. La mayoría de los polímeros naturales funcionales que se han estudiado en el presente capítulo son inherentemente biodegradables y, por lo tanto, serán funcionales siempre que este sea el uno de los propósitos del material.

Los poliésteres, por otra parte, son ejemplos de polímeros sintéticos que son funcionales en aplicaciones que alta tasa de descomposición, debido a que disponen de grupos éster fácilmente hidrolizables. [Guliyev et al. \(2023\)](#), por ejemplo, evidenciaron que el poli(succinato-*co*-adipato de butileno), que es un poliéster alifático que evidenció una alta descomposición en el suelo mediante el monitoreo de CO₂ liberado que se derivaba del polímero. [Liu et al. \(2022\)](#) investigaron las tasas de degradación del poliéster poli(adipato-*co*-tereftalato de butileno), el cual dispone de propiedades mecánicas análogas al polietileno, evidenciando altos grados de degradación en una cosecha de algodón. No obstante, es importante resaltar que los polímeros sintéticos biodegradables son limitados, por lo que estos materiales son modificados con polímeros naturales para proveerles mayor biodegradabilidad. La investigación de [Xiang et al. \(2021\)](#), nuevamente, es un ejemplo de ello, ya que la fracción polimérica sintética basada en acrilato de sodio y acrilamida no es biodegradable, pero la adición del componente celulósico aceleró la tasa de degradación de dicho material en el suelo. [Barragán et al. \(2016\)](#) estudiaron la tasa de degradación de un poliéster copolimerizado con almidón, obteniendo una alta tasa de descomposición en suelos agrícolas que, adicionalmente, promovió la actividad microbiana del suelo, actuando como polímero funcional biodegradable y acondicionador del suelo. Se sugiere al lector revisar el artículo de [Hanh y Hennecke \(2023\)](#), el cual realiza una revisión sistemática de los polímeros sintéticos, e invita a reflexionar a los investigadores acerca de estudiar más acerca del mecanismo de descomposición de los polímeros naturales, en función de

comprender las características estructurales que infieren en este proceso, en función de aplicar dicho conocimiento en el desarrollo de sistemas sintéticos más biodegradables.

1.3.5.- Polímeros anfífilicos.

Los polímeros anfífilicos son macromoléculas que disponen de regiones tanto hidrofílicas e hidrofóbicas. Estos son empleados como polímeros funcionales en aplicaciones agrícolas para generar sistemas de encapsulación, donde la región polimérica afín a la molécula de interés facilita la interacción y encapsulación de esta última, mientras que la fracción polimérica restante se encarga de aislarla del exterior. Generalmente, las moléculas encapsuladas suelen ser agroquímicos, mejorando la bioselectividad mediante un mecanismo de liberación dirigida. [Tong et al. \(2017\)](#) emplearon un polímero en bloque anfífilico basado en una región hidrofóbica de polietilenglicol (PEG), que interactuaba y encapsulaba al herbicida de carácter hidrofóbico metolaclor, y otra hidrofílica de poli(ácido láctico-*co*-glicólico) (PLAG), encargada de generar una cubierta polar que promueve el transporte del sistema gracias a su afinidad con el agua (Ver **Figura 1.4**).

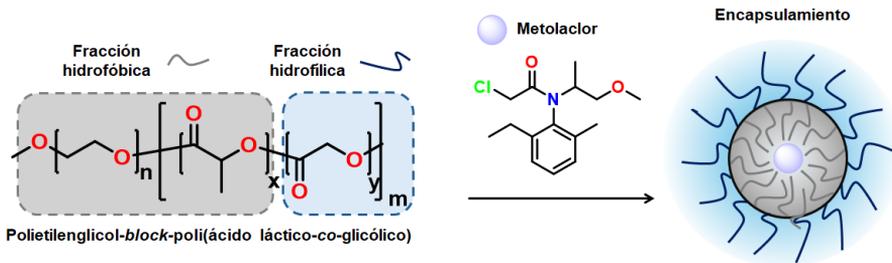


Figura 1.4. Encapsulamiento del herbicida metolaclor a través de un polímero funcional anfífilicos basados en PEG-PLAG.

De manera análoga, [Adak et al. \(2012\)](#) y [Memarizadeh et al. \(2014\)](#), reportaron el empleo de un polímero anfífilico funcional basado en PEG y diferentes polímeros hidrofílicos basados en ácido glutárico, adípico, y cítrico. En este caso, nuevamente la funcionalidad del material recaía en que

la fracción hidrofóbica del PEG interactuaba con el insecticida imidacloprid, propiciando su encapsulamiento. El PEG es empleado ampliamente para generar este tipo de polímeros funcionales debido a su biocompatibilidad, minimizando los efectos adversos potenciales asociados con la toxicidad del material.

Es importante resaltar que los polímeros anfífilicos no siempre consisten en polímeros en bloque basados en un monómero hidrofílico o hidrofóbico, sino que, en muchos otros casos, un polímero funcional es modificado en función de proveerle dichas propiedades anfífilicas; [Lao et al. \(2010\)](#) reportaron la modificación del quitosano para obtener polímeros anfífilicos de *N*-(octadecanol-1-glicidil éter)-*O*-sulfato de quitosano, otorgándole un grupo hidrofóbico a dicho polisacárido, que le permitió encapsular el insecticida botánico de rotenona. Una investigación análoga es la de [Feng y Peng \(2012\)](#), quienes modificaron el carboximetilquitosano con ácido ricinoleico en función de generar un sistema anfífilico que encapsulaba el insecticida azadiractina.

1.3.6.- Polímeros inteligentes o sensibles a estímulos.

[Milani et al. \(2017\)](#) definió un material inteligente o sensible a estímulos a un polímero que adapta su comportamiento en respuesta a condiciones ambientales específicas, por lo que su funcionalidad es modulada para que actúen bajo un estímulo químico o físico, como el pH, temperatura, fuerza iónica, campos magnéticos, entre otros. Estos polímeros han sido atractivos debido a su capacidad de administrar agroquímicos bajo condiciones específicas, atribuyéndole una mayor especificidad en la liberación de estas moléculas. Estos polímeros pueden ser hidrogeles, adsorbentes, biocidas, y todos los abarcados en el presente capítulo, pero, en este caso, la funcionalidad de la macromolécula también deberá radicar en disponer de grupos químicos que respondan al estímulo concreto. En la **Figura 1.5** se ilustra, a manera de ejemplo, el funcionamiento de un hidrogel que es sensible a estímulos químicos o físicos.

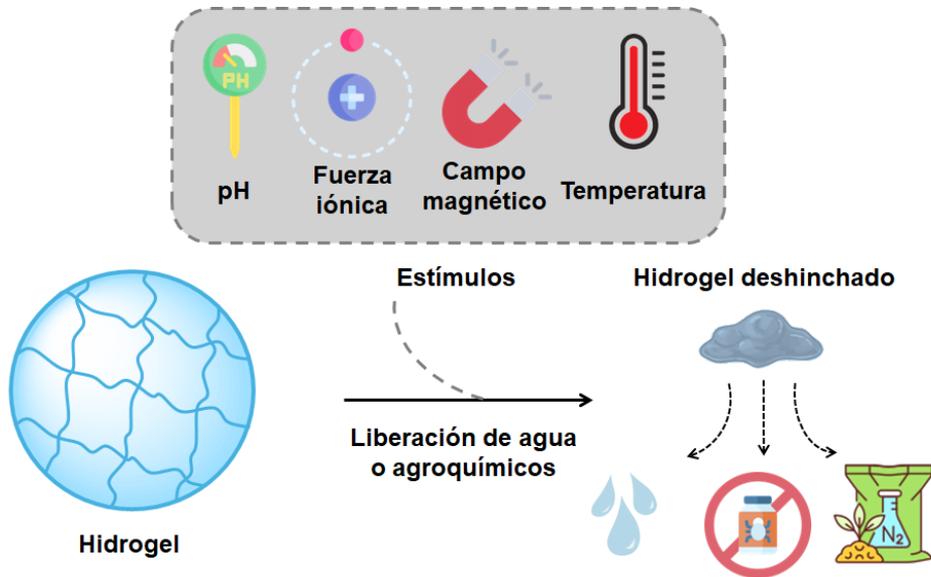


Figura 1.5. Esquema ilustrativo del funcionamiento de un hidrogel sensible a estímulos, como el pH, fuerza iónica, campos magnéticos o temperatura.

El carboximetilquitosano representa un ejemplo de un polímero funcional inteligente, ya que, dispone de grupos ácidos carboxílicos cuyo grado de protonación varía según el pH, y, por lo tanto, su capacidad de interactuar con otras moléculas dependerá de dicho parámetro químico. [Sun et al. \(2014\)](#), por ejemplo, emplearon este polímero en función de encapsular el insecticida metomilo, encontrando que a pH 4.0 se presentaba una eficiencia hasta del 90 % de encapsulación, debido a la fuerte interacción entre el polímero y el insecticida mediante enlaces de hidrógeno, pero conforme se incrementó este parámetro, los grupos $-COOH$ se ionizaron, debilitando la interacción y, consecuentemente, liberando el biocida de manera controlada. De manera análoga, [Gao et al. \(2019\)](#) generaron un nanomaterial basado en un polímero funcional de poli(metacrilato de glicidilo-*co*-ácido acrílico) que, al igual que la investigación anteriormente mencionada, interactuaba fuertemente mediante enlaces de hidrógeno con el insecticida abamectina a pH ácido y era liberado conforme se aumentaba dicho parámetro. Esta investigación resulta prometedora porque las larvas

de los insectos se caracterizan por disponer un intestino de ambiente químico básico (Sikder et al., 2021).

Otros investigadores han diseñado sistemas sensibles a la radiación UV: Ye et al. (2015) modificaron carboximetilquitosano con grupos fotolábiles de *o*-nitrobencilo, el cual tenía la capacidad de autoensamblarse en micelas poliméricas, encapsulando el herbicida diurón cuando el polímero era sometido a la luz UV. Paralelamente, Ding et al. (2016) conjugaron el PEG también con *o*-nitrobencilo, generando un sistema que podía autoensamblarse, encapsulando el 2,4-D cuando se expone el material a radiación UV.

También se han investigado polímeros funcionales que son sensibles la temperatura. Xu et al. (2017) estudiaron el poli(*N*-isopropilacrilamida) para encapsular el insecticida imidacloprid. La poli(*N*-isopropilacrilamida) es un polímero en el que a temperaturas bajas (< 15 °C) predominan los enlaces de hidrógeno entre las cadenas poliméricas y el insecticida, sin embargo, conforme se aumenta la temperatura, se debilitan los enlaces de hidrógeno, y predominan las interacciones hidrofóbicas entre las cadenas poliméricas, liberando dicho biocida.

1.3.7.- Polímeros funcionales como sensores y sondas.

La integridad de los cultivos y cosechas se ve influenciada por las prácticas agrícolas humanas, que incluyen la adición extensiva de agroquímicos tóxicos al medio; por lo tanto, se ha vuelto imperiosa la necesidad de generar mecanismos de monitoreo en función de regular y controlar los efectos adversos que pueden desencadenar dichas sustancias (Palaparthi et al., 2013; Sikder et al., 2021). En ese sentido, gran variedad de polímeros funcionales ha sido empleados para generar sondas o sensores que propicien el seguimiento y estudio de las diferentes variables que pueden generar un impacto en las actividades agrícolas.

En el caso del monitoreo de agroquímicos, las sondas basadas en sistemas fluorescentes han generado gran interés; Liu et al. (2015), por ejemplo, enlazaron una molécula fluorescente de perileno diimida a poliésteres

hidrófobos dendríticos para monitorear el comportamiento del insecticida hidrofóbico tiametoxam. Nótese que el dendrímero polimérico presenta doble funcionalidad: la capacidad de interactuar con el insecticida, y su fluorescencia adicionada con la modificación. La desventaja asociada a estos sistemas consiste en la potencial toxicidad que pueden ejercer los fragmentos fluorescentes en los polímeros. En un intento por evitar esta problemática, [Li et al. \(2016\)](#) sintetizaron cristales fotónicos coloidales, los cuales son estructuras que disponen de periodicidad en su índice de refracción, lo que le permite experimentar cambios visuales en presencia de un estímulo externo. Para ello, sintetizaron un polímero funcional de poli(ácido metacrílico-*co*-etilenglicol dimetilacrilato) en sílice coloidal como plantilla, en función de cargar ureasa, la cual cataliza la hidrólisis de la urea, generando una respuesta visual que permite monitorear la urea. En este caso, el polímero en sí mismo no puede actuar como sonda, pero dispone de la funcionalidad de interactuar con las partículas de sílice y ureasa mediante enlaces de hidrógeno e interacciones hidrofóbicas, generando un agregado molecular que sí puede ser empleado como sonda.

El diseño de sensores basados en polímeros funcionales para el monitoreo de determinados factores agrícolas también ha sido documentado. Un ejemplo de ello es la investigación realizada por [Suri et al. \(2002\)](#), quienes diseñaron un sensor basado en polipirrol para monitorear especies nitrogenadas gaseosas (NH_3 y NO_2) que son los principales gases contaminantes de aire generados por actividades agrícolas ([Pan et al., 2022](#)). El polipirrol es en este caso un polímero funcional por sus propiedades redox particulares asociadas a su estructura heterocíclica aromática, generando una respuesta eléctrica al reducirse en presencia de NH_3 ([Yeole et al., 2017](#)), o al oxidarse por efecto del NO_2 ([Wang et al., 2020](#)). Otra investigación novedosa recae en la de [Kugimiya y Babe \(2011\)](#), ya que, sintetizaron un polímero funcional de impresión molecular empleando 1-alil-2-tiourea como monómero funcional, el cual interactúa selectivamente con especies de fosfato, generando un cambio en las concentraciones de iones en el medio, que podía ser monitoreada con un transistor de efecto de campo sensible a iones, presentando el potencial de trabajar como material de monitoreo de dicho nutriente.

1.4.- Conclusiones.

El presente capítulo permite evidenciar que los polímeros funcionales, independientemente de su origen natural, semi-sintético o sintético, pueden ser empleados en el desarrollo de materiales de importancia agrícola. Desafortunadamente, la literatura ha generado confusión acerca del término *polímeros funcionales* con los polímeros estructurales; sin embargo, dicha confusión fue clarificada, enfatizando que la *funcionalidad* de un polímero está asociada exclusivamente con la aplicación química a la que estos han sido destinados.

Suprimir dicha ambigüedad permitió abordar de manera adecuada los diferentes materiales que han sido desarrollados a partir de estos polímeros, como hidrogeles, adsorbentes, sistemas inteligentes, anfífilicos, biocidas, entre otros, los cuales han sido empleados para contribuir con la gestión adecuada del agua, acondicionar el suelo, y controlar la dosificación de agroquímicos, como pesticidas o fertilizantes. Por lo tanto, la información suministrada en este capítulo, además de dar claridad a los conceptos clave, recalcan la importancia de los polímeros funcionales para el desarrollo de prácticas agrícolas eficientes y sostenibles.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Sucre, la Universidad de Córdoba, y la Universidad del Valle, así como al Departamento Nacional de Planeación de Colombia, específicamente, al Sistema General de Regalías (SGR) por la financiación recibida a través del proyecto BPIN 2020000100027.

Bibliografía

- Ahmad, D.F.B.A.; Wasli, M.E.; Tan, C.S.Y.; Musa, Z.; Chin, S.F. **2023**. Eco-friendly cellulose-based hydrogels derived from wastepapers as a controlled-release fertilizer. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10, 36. DOI: 10.1186/s40538-023-00407-6
- Adak, T.; Kumar, J.; Shakil, N.A.; Walia, S. **2012**. Development of Controlled Release Formulations of Imidacloprid Employing Novel Nano-Ranged Amphiphilic Polymers, *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 47, 217-225. DOI: 10.1080/03601234.2012.634365
- Akelah, A. **2013**. Polymeric Materials: Preparation and Properties. En: *Functionalized Polymeric Materials in Agriculture and the Food Industry*. Springer, 1-61. DOI: 10.1007/978-1-4614-7061-8_1
- Al-Zahrani, S.S.; Bora, R.S.; Al-Garni, S.M. **2021**. Antimicrobial activity of chitosan nanoparticles, *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 35(1), 1874-1880. DOI: 10.1080/13102818.2022.2027816
- Ambrosini, S.; Sega, D.; Santi, C.; Zamboni, A.; Varanini, Z.; Pandolfini, T. **2021**. Evaluation of the Potential Use of a Collagen-Based Protein Hydrolysate as a Plant Multi-Stress Protectant, *Frontiers in Plant Science*, 12. DOI: 10.3389/fpls.2021.600623
- Atay, H.Y. **2019**. Antibacterial Activity of Chitosan-Based Systems. En: Jana, S.; Jana, S. *Functional Chitosan*. Springer, 459-489. DOI: 10.1007/978-981-15-0263-7_15
- Badawy, M.E.I.; Rabea, E.I.; Taktak, N.E.M. **2014**. Antimicrobial and inhibitory enzyme activity of *N*-(benzyl) and quaternary *N*-(benzyl) chitosan derivatives on plant pathogens, *Carbohydrate Polymers*, 111, 670-682. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.04.098

- Bajpai, S.K.; Bajpai, M.; Sharma, L. **2007**. Inverse suspension polymerization of poly(methacrylic acid-*co*-partially neutralized acrylic acid) superabsorbent hydrogels: synthesis and water uptake behavior, *Designed Monomers and Polymers*, 10(2), 181-192. DOI: 10.1163/156855507780378285
- Bauli, C.R.; Lima, G.F.; de Souza, A.G.; Ferreira, R.R.; Rosa, D.S. **2021**. Eco-friendly carboxymethyl cellulose hydrogels filled with nanocellulose or nanoclays for agriculture applications as soil conditioning and nutrient carrier and their impact on cucumber growing, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 623, 126771. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.126771
- Barragán, D.H.; Pelacho, A.M.; Martin-Closas, L. **2016**. Degradation of agricultural biodegradable plastics in the soil under laboratory conditions, *Soil Research*, 54(2), 216-224. DOI: 10.1071/SR15034
- Behera, S.; Mahanwar, P.A. **2020**. Superabsorbent polymers in agriculture and other applications: a review, *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 59(4), 341-356. DOI: 10.1080/25740881.2019.1647239
- Bekchanov, D.; Mukhamediev, M.; Yarmanov, S.; Lieberzeit, P.; Mujahid, A. **2024**. Functionalizing natural polymers to develop green adsorbents for wastewater treatment applications, *Carbohydrate Polymers*, 323, 121397. DOI: 10.1016/j.carbpol.2023.121397
- Bertoft, E. **2017**. Understanding Starch Structure: Recent Progress, *Agronomy*, 7(3), 56. DOI: 10.3390/agronomy7030056
- Bora, A.; Karak, N. **2022**. Starch and itaconic acid-based superabsorbent hydrogels for agricultural application, *European Polymer Journal*, 176, 111430. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2022.111430
- Callaghan, T.V.; Abdelnour, H.; Lindley, D.K. **1988**. The environmental crisis in the Sudan: the effect of water-absorbing synthetic polymers on tree ger-

- mination and early survival, *Journal of Arid Environments*, 14(3), 301-317. DOI: 10.1016/S0140-1963(18)31077-2
- Cannazza, G.; Cataldo, A.; De Benedetto, E.; Demitri, C.; Madaghiele, M. et al. **2014**. Experimental Assessment of the Use of a Novel Superabsorbent polymer (SAP) for the Optimization of Water Consumption in Agricultural Irrigation Process, *Water*, 6(7), 2056-2069. DOI: 10.3390/w6072056
- Chen, C.Z.; Beck-Tan, N.C.; Dhurjati, P.; van Dyk, T.K.; LaRossa, R.A. et al. **2000**. Quaternary Ammonium Functionalized Poly(propylene imine) Dendrimers as Effective Antimicrobials: Structure–Activity Studies, *Biomacromolecules*, 1(3), 473-480. DOI: 10.1021/bm0055495
- Cheng, D.; Liu, Y.; Yang, G.; Zhang, A. **2018**. Water- and Fertilizer-Integrated Hydrogel Derived from the Polymerization of Acrylic Acid and Urea as a Slow-Release N Fertilizer and Water Retention in Agriculture, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(23), 5762-5769. DOI: 10.1021/acs.jafc.8b00872
- Cherwoo, L.; Gupta, I.; Bhatia, R.; Setia, H. **2023**. Improving agricultural practices: application of polymers in agriculture, *Energy, Ecology and Environment*, 9, 25-41. DOI: 10.1007/s40974-023-00295-4
- Craciun, G.; Calina, I.C.; Demeter, M.; Scarisoreanu, A.; Dumitru, M. et al. **2023**. Poly(Acrylic Acid)-Sodium Alginate Superabsorbent Hydrogels Synthesized by Electron Beam Irradiation Part I: Impact of Initiator Concentration and Irradiation Dose on Structure, Network Parameters and Swelling Properties, *Materials*, 16, 4552. DOI: 10.3390/ma16134552
- Das, D.; Bhattacharjee, S.; Bhaladhare, S. **2023**. Preparation of Cellulose Hydrogels and Hydrogel Nanocomposites Reinforced by Crystalline Cellulose Nanofibers (CNFs) as a Water Reservoir for Agriculture Use, *ACS Applied Polymer Materials*, 5(4), 2895-2904. DOI: 10.1021/acsapm.3c00109

- Das, D.; Prakash, P.; Rout, P.K.; Bhaladhare, S. **2020**. Synthesis and Characterization of Superabsorbent Cellulose-Based Hydrogel for Agriculture Application, *Starch - Stärke*, 73(1-2), 1900284. DOI: 10.1002/star.201900284
- Demir, B.; Broughton, R.M.; Qiao, M.; Huang, T.S.; Worley, S.D. **2017**. *N*-Halamine Biocidal Materials with Superior Antimicrobial Efficacies for Wound Dressings, *Molecules*, 22(10), 1582. DOI: 10.3390/molecules22101582
- Deshpande, P.; Dapkekar, A.; Oak, M.D.; Paknikar, K.M.; Rajwade, J.M. **2017**. Zinc complexed chitosan/TPP nanoparticles: A promising micronutrient nanocarrier suited for foliar application, *Carbohydrate Polymers*, 165, 394-401. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.02.061
- Dhiman, A.; Sharma, A. K.; Agrawal, G. **2022**. Polymer Based Engineered Materials for Sustainable Agriculture, *ACS Agricultural Science & Technology*, 2(4), 693-711. DOI: 10.1021/acsagscitech.1c00278
- Ding, K.; Shi, L.; Zhang, L.; Zeng, T.; Yin, Y.; Yi, Y. **2016**. Synthesis of photoresponsive polymeric propesticide micelles based on PEG for the controlled release of a herbicide, *Polymer Chemistry*, 7, 899-904. DOI: 10.1039/C5PY01690H
- Donmez, D.; Pinho, L.; Patel, B.; Desam, P.; Campanella, O.H. **2021**. Characterization of starch–water interactions and their effects on two key functional properties: starch gelatinization and retrogradation, *Current Opinion in Food Science*, 39, 103-109. DOI: 10.1016/j.cofs.2020.12.018
- Durpekova, S.; Di Martino, A.; Dusankova, M.; Drohsler, P.; Sedlarik, V. **2021**. Biopolymer Hydrogel Based on Acid Whey and Cellulose Derivatives for Enhancement Water Retention Capacity of Soil and Slow Release of Fertilizers, *Polymers*, 13, 3274. DOI: 10.3390/polym13193274

- Fabian, D.R.C.; Durpekova, S.; Dusankova, M.; Hanusova, D.; Bergerova, E.D. et al. **2024**. Renewable whey-based hydrogel with polysaccharides and polyvinyl alcohol as a soil amendment for sustainable agricultural application, *International Journal of Biological Macromolecules*, 259, 129056. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.129056
- Feng, B.H.; Peng, L.F. **2012**. Synthesis and characterization of carboxymethyl chitosan carrying ricinoleic functions as an emulsifier for azadirachtin. *Carbohydrate Polymers*, 88, 576-582. DOI: 10.3389/fchem.2022.1106230
- Gao, Y.; Zhang, Y.; He, S.; Xiao, Y.; Qin, X. et al. **2019**. Fabrication of a hollow mesoporous silica hybrid to improve the targeting of a pesticide, *Chemical Engineering Journal*, 364, 361-369. DOI: 10.1016/j.cej.2019.01.105
- Giraldo, J.D.; Garrido-Miranda, K.A.; Schoebitz, M. **2023**. Chitin and its derivatives: Functional biopolymers for developing bioproducts for sustainable agriculture—A reality?, *Carbohydrate Polymers*, 299, 120196. DOI: 10.1016/j.carbpol.2022.120196
- Gokmen, F.O.; Yaman, E.; Temel, S. **2021**. Eco-friendly polyacrylic acid based porous hydrogel for heavy metal ions adsorption: characterization, adsorption behavior, thermodynamic and reusability studies, *Microchemical Journal*, 168, 106357. DOI: 10.1016/j.microc.2021.106357
- Guliyev, V.; Tanunchai, B.; Udoenko, M.; Menyailo, O.; Glaser, B. et al. **2023**. Degradation of Bio-Based and Biodegradable Plastic and Its Contribution to Soil Organic Carbon Stock, *Polymers*, 15(3), 660. DOI: 10.3390/polym15030660
- Guo, Y.; Guo, R.; Shi, X.; Lian, S.; Zhou, Q. et al. **2022**. Synthesis of cellulose-based superabsorbent hydrogel with high salt tolerance for soil conditioning, *International Journal of Biological Macromolecules*, 209, 1169-1178. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2022.04.039

- Hanh, S.; Hennecke, D. **2023**. What can we learn from biodegradation of natural polymers for regulation?, *Environmental Sciences Europe*, 35(50). DOI: 10.1186/s12302-023-00755-y
- He, Y.; Dietrich, A.M.; Jin, Q.; Lin, T.; Yu, D.; Huang, H. **2022**. Cellulose adsorbent produced from the processing waste of brewer's spent grain for efficient removal of Mn and Pb from contaminated water, *Food and Bioproducts Processing*, 135, 227-237. DOI: 10.1016/j.fbp.2022.08.005
- Ho, C.G.; Setyawati, M.I.; DeLoid, G.M.; Li, K.; Adav, S.S. et al. **2023**. Cellulose Nanofiber Platform for Pesticide Sequestration in the Gastrointestinal Tract, *ACS Omega*, 8(18), 16106-16118. DOI: 10.1021/acsomega.3c00183
- Hokkanen, S.; Bhatnagar, A.; Sillanpää, M. **2016**. A review on modification methods to cellulose-based adsorbents to improve adsorption capacity, *Water Research*, 91, 156-173. DOI: 10.1016/j.watres.2016.01.00
- Jayanudin; Lestari, R.S.D.; Barleany, D.R.; Pitaloka, A.B.; Yulvianti, M. et al. **2022**. Chitosan-Graft-Poly(acrylic acid) Superabsorbent's Water Holding in Sandy Soils and Its Application in Agriculture. *Polymers*, 14, 5175. DOI: 10.3390/polym14235175
- Khattak, S.; Wahid, F.; Liu, L.P.; Jia, S.R.; Chu, L.Q. et al. **2019**. Applications of cellulose and chitin/chitosan derivatives and composites as antibacterial materials: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103, 1989-2006. DOI: 10.1007/s00253-018-09602-0
- Kolya, H.; Kang, C.W. **2023**. Synthesis of starch-based smart hydrogel derived from rice-cooked wastewater for agricultural use, *International Journal of Biological Macromolecules*, 226, 1477-1489. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2022.11.260

- Krasnopeevea, E.L.; Panova, G.G.; Yakimansky, A.V. **2022**. Agricultural Applications of Superabsorbent Polymer Hydrogels, *International Journal of Molecular Sciences*, 23, 15134. DOI: 10.3390/ijms232315134
- Kugimiya, A.; Babe, F. **2011**. Phosphate ion sensing using molecularly imprinted artificial polymer receptor, *Polymer Bulletin*, 67, 2017-2024. DOI: 10.1007/s00289-011-0617-6
- Kunjallukkal Padmanabhan, S.; Lamanna, L.; Friuli, M.; Sannino, A.; Demitri, C.; Licciulli, A. **2023**. Carboxymethylcellulose-Based Hydrogel Obtained from Bacterial Cellulose, *Molecules*, 28, 829. DOI: 10.3390/molecules28020829
- Laila, F.; Yulianti, W.; Resmeiliana, I.; Sholeha, N.A.; Fadhlurrahman, M. **2023**. Adsorption of Cd(II) using Polyacrylamide/Rice Husk Hydrogel, *E3S Web of Conferences*, 454, 02022. DOI: 10.1051/e3sconf/202345402022
- Lao, S.B.; Zhang, Z.X.; Xu, H.H.; Jiang, G.B. **2010**. Novel amphiphilic chitosan derivatives: Synthesis, characterization and micellar solubilization of rotenone, *Carbohydrate Polymers*, 82(4), 1136-1142. DOI: 10.1016/j.carbpol.2010.06.044
- Le Strat, Y.; Ruiz, N.; Fleurence, J.; Pouchus, Y.F.; Délérís, P. et al. **2022**. Marine fungal abilities to enzymatically degrade algal polysaccharides, proteins and lipids: a review, *Journal of Applied Phycology*, 34, 1131-1162. DOI: 10.1007/s10811-022-02713-2
- Lebkiri, I.; Abbou, B.; Hsissou, R.; Safi, Z.; Sadiku, M. et al. **2023**. Investigation of the anionic polyacrylamide as a potential adsorbent of crystal violet dye from aqueous solution: Equilibrium, kinetic, thermodynamic, DFT, MC and MD approaches, *Journal of Molecular Liquids*, 372, 121220. DOI: 10.1016/j.molliq.2023.121220
- Li, L.; Long, Y.; Gao, J.M.; Song, K.; Yang, G. **2016**. Label-free and pH-sensitive colorimetric materials for the sensing of urea, *Nanoscale*, 8(8), 4458-4462. DOI: 10.1039/C5NR07690K

- Liu, H.C.; Chen, W.; Cui, B. **2015**. Enhanced atrazine adsorption from aqueous solution using chitosan-modified sepiolite, *Journal of Central South University*, 22, 4168-4176. DOI: 10.1007/s11771-015-2964-1
- Liu, Q.; Wang, Y.; Liu, J.; Liu, X.; Dong, Y. et al. **2022**. Degradability and Properties of PBAT-Based Biodegradable Mulch Films in Field and Their Effects on Cotton Planting, *Polymers*, 14(15), 3157. DOI: 10.3390/polym14153157
- Liu, X.; He, B.; Xu, Z.; Yin, M.; Yang, W. et al. **2015**. A functionalized fluorescent dendrimer as a pesticide nanocarrier: application in pest control, *Nanoscale*, 7, 445-449. DOI: 10.1039/C4NR05733C
- Liu, X.; Xia, W.; Jiang, Q.; Xu, Y.; Yu, P. **2014**. Synthesis, Characterization, and Antimicrobial Activity of Kojic Acid Grafted Chitosan Oligosaccharide, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(1), 297-303. DOI: 10.1021/jf404026f
- Marin, L.; Andreica, B.I.; Anisie, A.; Cibotaru, S.; Bardosova, M. et al. **2023**. Quaternized chitosan (nano)fibers: A journey from preparation to high performance applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 242, 125136. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.125136
- Martwong, E.; Chuetor, S.; Junthip, J. **2021**. Adsorption of Paraquat by Poly(Vinyl Alcohol)-Cyclodextrin Nanosponges, *Polymers*, 13(23), 4110. DOI: 10.3390/polym13234110
- Memarizadeh, N.; Ghadamyari, M.; Adeli, M.; Talebi, K. **2014**. Preparation, Characterization and Efficiency of Nanoencapsulated Imidacloprid Under Laboratory Conditions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 107, 77-83. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2014.05.009
- Min, Z.; Cuicui, D.; Lihui, C.; Liulian, H.; Haiyang, Y. **2014**. Tannin-Immobilized Collagen/Cellulose Bead as an Effective Adsorbent for Cu(II) in Aqueous Solutions, *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 8(6), 610-617. DOI: 10.1166/jbmb.2014.1480

- Milani, P.; França, D.; Balieiro, A.G.; Faez, R. **2017**. Polymers and its Applications in Agriculture, *Polímeros*, 27(3). DOI: 10.1590/0104-1428.09316
- Mishra, S.; Keswani, C.; Abhilash, P.C.; Fraceto, L.F.; Singh, H.B. **2017**. Integrated Approach of Agri-Nanotechnology: Challenges and Future Trends, *Frontiers in Plant Science*, 8, 1-12. DOI: 10.3389/fpls.2017.00471
- Mohamed, R.R.; Fahim, M.E.; Soliman, S.M.A. **2022**. Development of hydrogel based on Carboxymethyl cellulose/poly(4-vinylpyridine) for controlled releasing of fertilizers, *BMC Chemistry*, 16, 52. DOI: 10.1186/s13065-022-00846-6
- Mukerabigwi, J.F.; Lei, S.; Wang, H.; Luo, S.; Ma, X. et al. **2015**. Synthesis and properties of a novel ecofriendly superabsorbent hydrogel nanocomposite based on xyloglucan-graft-poly(acrylic acid)/diatomite. *RSC Advances*, 5, 83732-83742. DOI: 10.1039/C5RA12355K
- Nooeaid, P.; Chuysinuan, P.; Pitakdantham, W.; Dumrongsak, A.; Supanna, T. **2021**. Eco-Friendly Polyvinyl Alcohol/Poly(lactic Acid) Core/Shell Structured Fibers as Controlled-Release Fertilizers for Sustainable Agriculture, *Journal of Polymer and the Environment*, 29, 552-564. DOI: 10.1007/s10924-020-01902-9
- Noorzai, S.; Verbeek, C.J.R. **2023**. Biomaterials Derived from Agricultural Waste: A Focus on Collagen. En: *Agricultural Waste: Environmental Impact, Useful Metabolites and Energy Production*. Springer. DOI: 10.1007/978-981-19-8774-8_4
- Pacholczak, A.; Nowakowska, K.; Monder, M.J. **2023**. Starch-Based Superabsorbent Enhances the Growth and Physiological Traits of ornamental Shrubs. *Agriculture*, 13, 1893. DOI: 10.3390/agriculture13101893

- Palaparthi, V.S.; Baghini, M.S.; Singh, D.N. **2013**. Review of polymer-based sensors for agriculture-related applications, *Emerging Materials Research*, 2(4), 166-180. DOI: 10.1680/emr.13.00010
- Palencia, M.; Espinosa-Duque, A.; Otálora, A.; García-Quintero, A. **2021a**. Cellulose-based stimuli-responsive hydrogels. En: *Plant and Algal Hydrogels for Drug Delivery and Regenerative Medicine*. Elsevier, 423-470. DOI: 10.1016/B978-0-12-821649-1.00002-7
- Palencia, M.; Lerma, T.A.; Arrieta, A.A. **2020**. Antibacterial and non-hemolytic cationic polyurethanes with *N*-carboxymethyl-*N,N,N*-triethylammonium groups for bacteremia-control in biomedical-using materials, *Materials Today Communications*, 22, 100708. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2019.100708
- Palencia, M.; Lerma, T.A.; Garcés, V.; Mora, M.A.; Martínez, J.M.; Palencia, S.L. **2021b**. Functional and eco-friendly polymers in agriculture. En: *Eco-friendly Functional Polymers: An Approach from Application-Targeted Green Chemistry*. Elsevier, 181-191. DOI: 10.1016/B978-0-12-821842-6.00016-6
- Pan, S.Y.; He, K.H.; Lin, K.T.; Fan, C.; Chang, C.T. **2022**. Addressing nitrogenous gases from croplands toward low-emission agriculture, *npj Climate and Atmospheric Science*, 5, 43. DOI: 10.1038/s41612-022-00265-3
- Panic, V.V.; Madzarevic, Z.P.; Volkov-Husovic, T.; Velickovic, S.J. **2013**. Poly(methacrylic acid) based hydrogels as sorbents for removal of cationic dye basic yellow 28: Kinetics, equilibrium study and image analysis, *Chemical Engineering Journal*, 217, 192-204. DOI: 10.1016/j.cej.2012.11.081
- Pathak, V.; Kingsly Ambrose, R.P. **2019**. Starch-based biodegradable hydrogel as seed coating for corn to improve early growth under water shortage, *Journal of Applied Polymer Science*, 137(14), 48523. DOI: 10.1002/app.48523

- Prasad, R.; Bhattacharyya, A.; Nguyen, Q.D. **2017**. Nanotechnology in Sustainable Agriculture: Recent Developments, Challenges, and Perspectives, *Frontiers in Microbiology*, 8, 1014. DOI: 10.3389/fmicb.2017.01014
- Puoci, F.; Lemma, F.; Spizzirri, U. G.; Cirillo, G.; Curcio, M. et al. **2008**. Polymer in agriculture: A review, *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 3(1), 299-314. DOI: 10.3844/ajabssp.2008.299.314
- Qiu, S.; Zhou, S.; Tan, Y.; Feng, J.; Bai, Y. et al. **2022**. Biodegradation and Prospect of Polysaccharide from Crustaceans, *Marine Drugs*, 20(5), 310. DOI: 10.3390/md20050310
- Riseh, R.S.; Vazvani, M.G.; Kennedy, J.F. **2023**. The application of chitosan as a carrier for fertilizer: A review, *International Journal of Biological Macromolecules*, 252, 126483. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.126483
- Rodrigues Sousa, H.; Lima, I.S.; Neris, L.M.L.; Silva, A.S.; Santos Nascimento, A.M.S. et al. **2021**. Superabsorbent Hydrogels Based to Polyacrylamide/Cashew Tree Gum for the Controlled Release of Water and Plant Nutrients, *Molecules*, 26, 2680. DOI: 10.3390/molecules26092680
- Román-Doval, R.; Torres-Arellanes, S.P.; Tenorio-Barajas, A.Y.; Gómez-Sánchez, A.; Valencia-Lazcano, A.A. **2023**. Chitosan: Properties and Its Application in Agriculture in Context of Molecular Weight, *Polymers*, 15, 2867. DOI: 10.3390/polym15132867
- Saberi Riseh, R.; Gholizadeh Vazvani, M.; Hassanisaadi, M.; Skorik, Y.A. **2023**. Micro-/Nano-Carboxymethyl Cellulose as a Promising Biopolymer with Prospects in the Agriculture Sector: A Review. *Polymers*, 15, 440. DOI: 10.3390/polym15020440
- Samir, A.; Ashour, F.H.; Hakim, A.A.A.; Bassyouni, M. **2022**. Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications, *npj Materials Degradation*, 6(68). DOI: 10.1038/s41529-022-00277-7

- Sarkar, K.; Sen, K. **2018**. Polyvinyl alcohol based hydrogels for urea release and Fe(III) uptake from soil medium, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 736-744. DOI: 10.1016/j.jece.2018.01.004
- Shaghaleh, H.; Xu, X.; Wang, S. **2018**. Current progress in production of biopolymeric materials based on cellulose, cellulose nanofibers, and cellulose derivatives, *RCS Advances*, 8, 825-842. DOI: 10.1039/C7RA11157F
- Shamshina, J.L.; Oldham, K.T.; Rogers, R.D. **2019**. Applications of Chitin in Agriculture. En: Crini, G.; Lichtfouse, E. *Sustainable Agriculture Reviews*. Springer, 125-142. DOI: 10.1007/978-3-030-16581-9_4
- Shui, T.; Feng, S.; Chen, G.; Li, A.; Yuan, Z. et al. **2017**. Synthesis of sodium carboxymethyl cellulose using bleached crude cellulose fractionated from cornstalk, *Biomass and Bioenergy*, 105, 51-58. DOI: 10.1016/j.biombioe.2017.06.016
- Sikder, A.; Pearce, A.K.; Parkinson, S.J.; Napier, R.; O'Reilly, R.K. **2021**. Recent Trends in Advanced Polymer Materials in Agriculture Related Applications, *ACS Applied Polymer Materials*, 3(3), 1203-1275. DOI: 10.1021/acscapm.0c00982
- Sopanrao, K.S.; Sreedhar, I. **2024**. Polyvinyl alcohol modified chitosan composite as a novel and efficient adsorbent for multi-metal removal, *Separation and Purification Technology*, 340, 126731. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.126731
- Stahl, J.D.; Cameron, M.D.; Haselbach, J.; Aust, S.D. **2000**. Biodegradation of superabsorbent polymers in soil. *Environmental Science & Pollution Research*, 7, 83-88. DOI: 10.1065/espr199912.014
- Stuart, M. A.; Huck, W. T.; Genzer, J.; Muller, M.; Ober, C. et al. **2010**. Emerging Applications of Stimuli-Responsive Polymer Materials, *Nature Materials*, 9, 101-113. DOI: 10.1038/nmat2614

- Sun, C.; Shu, K.; Wang, W.; Ye, Z.; Liu, T. et al. **2014**. Encapsulation and controlled release of hydrophilic pesticide in shell cross-linked nanocapsules containing aqueous core, *International Journal of Pharmaceutics*, 463(1), 108-114. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2013.12.050
- Sun, Y.; Sun, G. **2003**. Novel refreshable N-halamine polymeric biocides: Grafting hydantoin-containing monomers onto high performance fibers by a continuous process, *Journal of Applied Polymer Science*, 88(4), 1032-1039. DOI: 10.1002/app.11772
- Supare, K., Mahanwar, P.A. **2022**. Starch-derived superabsorbent polymers in agriculture applications: an overview, *Polymer Bulletin*, 79, 5795-5824. DOI: 10.1007/s00289-021-03842-3
- Suri, K.; Annapoorni, S.; Sarkar, A.K.; Tandon, R.P. **2002**. Gas and humidity sensors based on iron oxide-polypyrrole nanocomposites, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 81(2-3), 277-282. DOI: 10.1016/S0925-4005(01)00966-2
- Szewczuk-Karpisz, K.; Wiśniewska, M.; Medykowska, M.; Galaburda, M.V.; Bogatyrov, V.M. **2021**. Simultaneous adsorption of Cu(II) ions and poly(acrylic acid) on the hybrid carbon-mineral nanocomposites with metallic elements, *Journal of Hazardous Materials*, 412, 125138. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125138
- Thongsomboon, W.; Baimark, Y.; Srihanam, P. **2023**. Valorization of Cellulose-Based Materials from Agricultural Waste: Comparison between Sugarcane Bagasse and Rice Straw, *Polymers*, 15, 3190. DOI: 10.3390/polym15153190
- Tong, Y.; Wu, Y.; Zhao, C.; Xu, Y.; Lu, J. et al. **2017**. Polymeric Nanoparticles as a Metolachlor Carrier: Water-Based Formulation for Hydrophobic Pesticides and Absorption by Plants, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65, 7371-7378. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b02197

- Vasconcelos do Nascimento, C.D.; de Andrade Feitosa, J.P.; Simmons, R.; dos Santos Días, C.T.; Vasconcelos, Í. et al. **2021**. Durability indicatives of hydrogel for agricultural and forestry use in saline conditions, *Journal of Arid Environments*, 195, 104622. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2021.104622
- Wang, C.; Yang, M.; Liu, L.; Xu, Y.; Zhang, X. et al. **2020**. One-step synthesis of polypyrrole/Fe₂O₃ nanocomposite and the enhanced response of NO₂ at low temperature, *Journal of Colloid and Interface Science*, 560, 312-320. DOI: 10.1016/j.jcis.2019.10.076
- Wong, A.; de Oliveira, F.M.; Tarley, C.R.T.; Sotomayor, M.P.T. **2016**. Study on the cross-linked molecularly imprinted poly(methacrylic acid) and poly(acrylic acid) towards selective adsorption of diuron, *Reactive and Functional Polymers*, 100, 26-36. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2016.01.006
- Woodhouse, J.; Johnson, M.S. **1991**. Effect of superabsorbent polymers on survival and growth of crop seedlings, *Agricultural Water Management*, 20(1), 63-70. DOI: 10.1016/0378-3774(91)90035-H
- Wypij, M.; Trzcińska-Wencel, J.; Golińska, P.; Avila-Quezada, G.D.; Ingle, A.P. et al. **2023**. The strategic applications of natural polymer nanocomposites in food packaging and agriculture: Chances, challenges, and consumers' perception, *Frontiers in Chemistry*, 10, 1106230. DOI: 10.3389/fchem.2022.1106230
- Xiang, Y.; Li, C.; Hao, H.; Tong, Y.; Chen, W. **2021**. Performances of biodegradable polymer composites with functions of nutrient slow-release and water retention in simulating heavy metal contaminated soil: Biodegradability and nutrient release characteristics, *Journal of Cleaner Production*, 294, 126278. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126278
- Xu, S.; Li, X.; Wang, Y.; Hu, Z.; Wang, R. **2018**. Characterization of slow-release collagen-g-poly(acrylic acid-*c*-2-acrylamido-2-methyl-1-propane sulfonic acid)-iron(III) superabsorbent polymer containing fertilizer,

Journal of Applied Polymer Science, 136(11), 47178. DOI: 10.1002/app.47178

Xu, S.; Yin, Y.; Wang, Y.; Li, X.; Hu, Z. et al. **2019**. Amphoteric superabsorbent polymer based on waste collagen as loading media and safer release systems for herbicide 2, 4-D, Journal of Applied Polymer Science, 137(12), 48480. DOI: 10.1002/app.48480

Xu, X.; Bai, B.; Wang, H.; Suo, Y. **2017**. A Near-Infrared and Temperature-Responsive Pesticide Release Platform through Core-Shell Polydopamine@PNIPAm Nanocomposites, ACS Applied Materials & Interfaces, 9(7), 6424-6432.

Ye, Z.; Guo, J.; Wu, D.; Tan, M.; Xiong, X.; Yin, Y.; He, G. **2015**. Photo-responsive shell cross-linked micelles based on carboxymethyl chitosan and their application in controlled release of pesticide, Carbohydrate Polymers, 132, 520-528. DOI: 10.1016/j.carbpol.2015.06.077

Yeole, B.; Sen, T.; Hansora, D.; Mishra, S. **2017**. Electrical and Gas Sensing Behaviour of Polypyrrole/silver Sulphide Nanocomposites, American Journal of Sensor Technology, 4(1), 10-20. DOI: 10.12691/ajst-4-1-2

Yue, X.; Huang, J.; Jiang, F.; Lin, H.; Chen, Y. **2019**. Synthesis and characterization of cellulose-based adsorbent for removal of anionic and cationic dyes, Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 14. DOI: 10.1177/1558925019828194

Zainul Armir, N.A.; Zulkifli, A.; Gunaseelan, S.; Palanivelu, S.D.; Salleh, K.M. et al. **2021**. Regenerated Cellulose Products for Agricultural and Their Potential: A Review, Polymers, 13, 3586. DOI: 10.3390/polym13203586

Zhan, F.; Liu, M.; Guo, M.; Wu, L. **2004**. Preparation of superabsorbent polymer with slow-release phosphate fertilizer, Journal of Applied Polymer Science, 92(5), 3417-3421. DOI: 10.1002/app.20361

Zhang, L.; Tang, S.; Guan, Y. **2020**. Excellent Adsorption–Desorption of Ammonium by a Poly(acrylic acid)-Grafted Chitosan and Biochar Composite for Sustainable Agricultural Development, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(44), 16451-16462. DOI: 10.1021/acssuschemeng.0c05070

Zhang, Z.; Wang, X.; Liu, T.; Liu, L.; Yu, C. et al. **2022**. Al³⁺ coordinated chitosan hydrogel with ultrahigh water absorbency and environmental response, *Materials & Design*, 214, 110390. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110390

Capítulo 2.

Principales aplicaciones agrícolas de los polímeros funcionales: Una visión general.

2.1.- Introducción.

En el capítulo anterior se evidenció que los polímeros funcionales, tanto naturales, semisintéticos o sintéticos, son materiales versátiles que disponen de la capacidad de incrementar la efectividad y sostenibilidad de las prácticas agrícolas. Si bien inicialmente el propósito principal de los polímeros consistía en ser dispuestos como materiales estructurales para preservar las cosechas, actualmente su enfoque se ha orientado en mitigar la problemática ambiental generada por las prácticas agrícolas basadas en la explotación de recursos ecológicos, que incluyen el suelo y el agua, en conjunto con la aplicación indiscriminada de agroquímicos, como fertilizantes y pesticidas (Dhiman et al., 2022; Milani et al., 2017; Sikder et al., 2021). En este contexto, diversas investigaciones se enfocan en estudiar materiales basados en polímeros funcionales que permitan mejorar las propiedades del suelo, capturen contaminantes, ataquen plagas, controlen la dosificación de agroquímicos, fomenten el crecimiento de cultivos, entre otros. Por lo tanto, en este capítulo se ofrece una visión de estas aplicaciones en las que, el papel de los polímeros funcionales ha sido protagónico.

Cite as: A.A. Arrieta, E.M. Combatt, M. Palencia. 2024. Principales aplicaciones agrícolas de los polímeros funcionales: Una visión general. En: A.Á. Arrieta, E.M. Combatt, M. Palencia. Materiales poliméricos funcionales basados en productos de la agroindustria: Yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y Marañón (*Anacardium occidentale* L.). MT-Pallantia Publisher s.a.s., Cali - Colombia. pp. 53-84. DOI: 10.34294/b.001.c2.2024.03.

2.2.- Aplicaciones de los polímeros funcionales en la agricultura.

2.2.1.- Entrega controlada de agroquímicos.

Los agroquímicos, como fertilizantes y pesticidas, son esenciales en la agricultura para proteger y promover el crecimiento de las cosechas; sin embargo, se debe reconocer que su aplicación deliberada está asociada con efectos ambientales adversos, como la acumulación de estas sustancias en los ecosistemas y su eventual incorporación en la cadena alimenticia, representando una grave amenaza para los animales y seres humanos (Milani et al., 2017; Sikder et al., 2021). Frente a esta problemática, se han desarrollado múltiples tecnologías para la entrega controlada de agroquímicos, en función de satisfacer las necesidades actuales de la agricultura de una manera ecológicamente responsable. Entre estos sistemas se destacan los polímeros funcionales debido a su capacidad para: (i) preservar el agroquímico ante ambientes químicos degradantes, como el pH, la temperatura, la luz, entre otros, (ii) gestionar adecuadamente la dosificación del agroquímico, reduciendo la concentración de liberación, (iii) ser, por lo general, inocuos para el medio ambiente y, (iv) poder ser reutilizados, cargándose nuevamente con el agroquímico, lo que propicia una reducción de costos (Palencia et al., 2021a; Sikder et al., 2021).

Existen dos sistemas de liberación según su mecanismo de entrega: sistemas de liberación lenta, en el que se retrasa la liberación de la sustancia, entregándose en reducidas concentraciones; y sistemas de liberación controlada, donde el sustrato es liberado bajo ciertas condiciones específicas de pH, fuerza iónica, temperatura, entre otros (Milani et al., 2017; Pereira et al., 2015). En los primeros, la interacción polímero-agroquímico es, por lo general, débil, con el objetivo de que la sustancia sea liberada gradualmente en la medida en que se reduce su fuerza de interacción, por lo que es usual emplear adsorbentes físicos o polímeros anfífilos que, usualmente, se comportan como encapsuladores. En los sistemas de liberación controlada, por otra parte, se manejan hidrogeles o adsorbentes que son sensibles a estímulos específicos, cuya naturaleza se detalló en el capítulo anterior.

En la **Figura 2.1** se esquematizan los principales sistemas de liberación basados en polímeros funcionales, mientras que en la **Tabla 2.1** se reúnen los principales agroquímicos que han sido dosificados mediante polímeros funcionales como sistemas de entrega controlada.

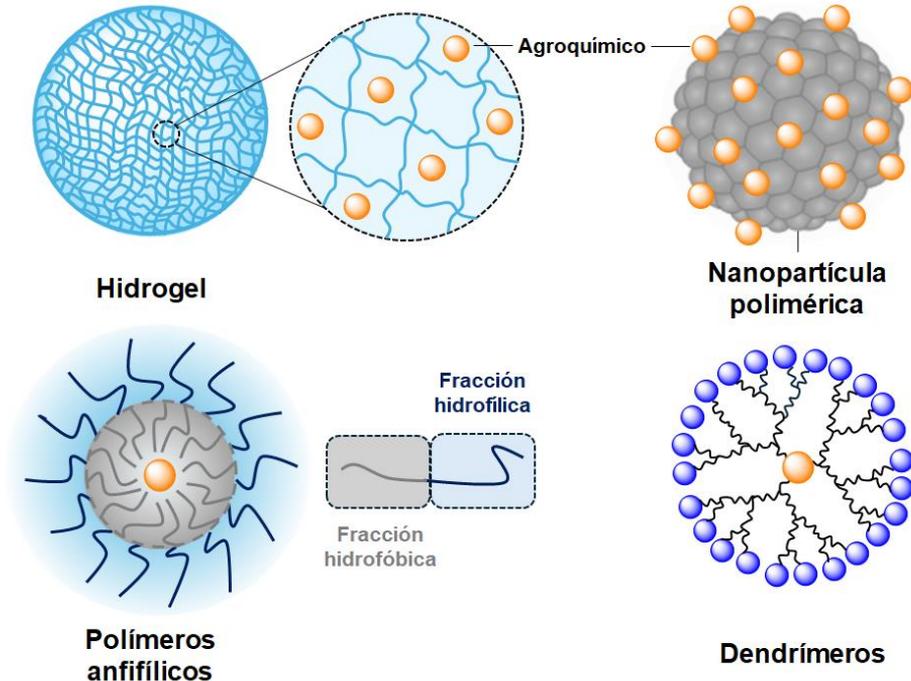


Figura 2.1. Principales sistemas de liberación controlada de agroquímicos basados en polímeros funcionales.

2.2.1.1.- Entrega controlada de pesticidas.

Como se ha expuesto previamente, los pesticidas, que incluyen herbicidas, insecticidas, fungicidas, nematocidas, entre otros, son agroquímicos encargados de proteger las cosechas contra agentes bióticos perjudiciales.

Tabla 2.1. Agroquímicos (AGQs) dosificados mediante sistemas de liberación controlada basados en polímeros funcionales.

Tipo de AGQ	AGQs *	Sistema	PF **	Ref.
Herbicida	Metolaclor	Encapsulador físico	PEtg- <i>b</i> -poli(AL- <i>co</i> -AG)	Tong et al., 2017
	Ácido 2,4-DFAc	Hidrogel	PEtg- <i>co</i> -PCL	Dabbaghi y Rahmani, 2018
	CMFA	Conjugado polimérico	Poli(3-HB- <i>co</i> -HV)	Kwiecien et al., 2018
	Ametrina	Encapsulador físico	Poli(3-HB- <i>co</i> -HV)	Lobo et al., 2012
Insecticida	Imidacloprid	Encapsulador físico	PEtg- <i>b</i> -PAR	Adak et al., 2012
			PACT- <i>b</i> - PEtg	Memarizadeh et al., 2014
			Qts- <i>co</i> -PAL	Li et al., 2011
	Tiametoxam	Encapsulador físico	DDMR-Cat	Liu et al., 2015
	Avermectina	Encapsulador físico	PMAGAA	Gao et al., 2019
	Clorpirifó	Hidrogel	AG/Alm	Roy et al., 2009
			Encapsulador físico	Qts- <i>co</i> -PAL
Clorhidrato de nicotina	Encapsulador físico	Qts	Yang et al., 2018	
Fungicida	Tiram	Hidrogel	Alm-PMAA	Singh et al., 2008
		Adsorbente	Alm- <i>co</i> -AG	Singh et al., 2009
	Flusilazol	Encapsulador físico	Qts- <i>co</i> -PAL	Mei et al., 2014

Nematicida	Avermectina	Encapsuladores físicos	Qts-PAGlu PAm	Liang et al., 2018 Yang et al., 2022
	Ivermectina	Nanopartícula polimérica Encapsulador físico	PCL PMAA	Mohammed et al., 2024 Junior et al., 2021
Fuente de micro-nutrientes	Fe ³⁺	Hidrogel	PAM	Meurer et al., 2017
	Zn ²⁺	Conjugado polimérico	Qts	Deshpande et al., 2017
	Zn ²⁺	Adsorbente	Acel	Callaghan et al., 2023
	Zn ²⁺ y Fe ³⁺	Nanofibras y nanopartículas	Cel	Dutta et al., 2022
Fuente de N	Urea	Hidrogel	Qts/Alm	Huey et al., 2019
			Alm	Xiao et al., 2017
			PAAm/MCel	Bortolin et al., 2013
		Encapsulador físico	Qts	Hussain et al., 2012
		Conjugado polímero-fertilizante	PAA	Rahman et al., 2009
Fuente de P	Fosfato	Hidrogel	Alm-S/PAA	Zhang et al., 2013b
			PMAOxP	Lipowczan y Trochimczuk, 2021
			AG-P/PAAm	Rohily et al., 2020

Fuente de N, P y K (NPK)	NPK	Hidrogel	PVA/Qts	Noppakundilo grat et al., 2014
	NPK	Hidrogel	Qts/CMC/PVA	Jabrail y Mutlaq, 2022

* Diclorofenoxiacético (DFAc), Ácido 4-cloro-2-metilfenoxiacético (CMFA).

** Polímero funcional (PF): Poli(ácido acrílico) (PAA), poli(ácido meta-acrílico) (PMAA), policaprolactona (PCL), poli(metacrilato de glicidilo-co-ácido acrílico) (PMAGAA), poli(ácido cítrico) (PACT), poli(ácido láctico) (PAL), poli(vinilalcohol) (PVA), poli(acrilamida) (PAAm), poli(etilenglicol) (PEtg), poli(ácidos alquílicos) (PAR), poli(acrilamida) (PAAm), poli(2-(metacrililoiloxietil)fosfato-co-bis[2-(metacrililoiloxi)etil]fosfato) (PMAOxP), poli(alilamina) (PAM), poliamina (PAm), poli(ácido glutámico) (PAGlu), almidón (Alm), almidón sulfonado (Alm-S), celulosa (Cel), metilcelulosa (MCel), acetato de celulosa (ACel), carboximetilcelulosa (CMC), alginato (AG), alginato fosforilado (AG-P), quitosano (Qts), poliácido láctico (AL), ácido glicólico (AG), hidroxibutirato (HB), hidroxivalerato (HV), DDMR-Cat.

Uno de los pesticidas más empleados son los herbicidas, los cuales representan el 48 % del consumo mundial de dichos agroquímicos en todo el mundo. Estas sustancias fitotóxicas tienen como objetivo el control de la proliferación vegetal indeseada, lo que es esencial para la productividad agrícola ([Gupta, 2018](#); [Marin-Morales et al., 2013](#)); sin embargo, los herbicidas han sido asociados con efectos adversos en el medio ambiente y la salud humana, generando una creciente preocupación acerca de su empleo en la agricultura ([Marin-Morales et al., 2013](#); [Kniss, 2017](#)). El metolaclor, por ejemplo, es uno de los herbicidas de cloroacetamida más empleado, el cual presenta una alta estabilidad en medios acuosos debido a su naturaleza hidrofóbica, acumulándose fácilmente en organismos acuáticos que eventualmente ingresan a la cadena alimenticia, resultando en serios riesgos para los seres vivos que consumen dichas especies contaminadas ([EPA, 1995](#); [Pereira et al., 2009](#)). Por lo tanto, es evidente la imperiosa necesidad de controlar la dosificación del metolaclor, en función de minimizar su impacto ecológico negativo. En ese sentido, los encapsuladores físicos, usualmente basados en polímeros funcionales anfífilos, han sido sistemas atractivos para su entrega controlada en actividad agrícolas. En un capítulo previo se comentó acerca de la investigación de [Tong et al. \(2017\)](#), quienes emplearon un polímero anfífilo funcional basado en polietilenglicol-*b*-poli(ácido láctico-*co*-glicólico) (PEG-*b*-PLGA) para encapsular metolaclor,

evidenciando dos resultados significativos: (i) que el efecto fitotóxico de dicho agroquímico encapsulado, evaluado en raíces de arroz, era más alto que el herbicida sin encapsular y, (ii) las pruebas de citotoxicidad evidenciaron una reducción en la toxicidad, denotando el potencial del encapsulador polimérico en mitigar los efectos adversos asociados con este pesticida.

Otro herbicida objeto de extensas investigaciones es el ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D), cuya toxicidad gastrointestinal y neuronal ha sido ampliamente documentada, subrayando en la necesidad de una dosificación mediante sistemas de liberación controlada (Demissie, et al., 2022; Rajendran et al., 2021). Dabbaghi y Rahmani (2018), por ejemplo, reportaron la síntesis de un hidrogel basado en PEG-policaprolactona (PCL), para investigar la capacidad de retención y liberación de este biocida, obteniendo óptimos resultados en términos de las propiedades de hinchamiento del material; sin embargo, la entrega del pesticida fue prematura, alcanzando su máxima liberación entre 1-2 días. Una molécula análoga es el 4-cloro-2-metilfenoxiacético (CMFA), la cual posee una toxicidad similar al 2,4-D. Kwiecien et al. (2018), en una investigación novedosa, demostraron que la preparación de un conjugado de CMFA con poli(3-hidroxi-*co*-hidroxivalerato), poli(ácido láctico) (PLA) y poli(adipato-*co*-tereftalato de butileno), podía ser empleado como mantillo herbicida al liberar controladamente dicho agroquímico, demostrando su capacidad para suprimir la maleza y, al mismo tiempo, reducir el cultivo modelo de habas.

Los insecticidas también han sido asociados con efectos tóxicos en peces y potencial riesgo de envenenamiento en los seres humanos, por lo que su aplicación en medios ecológicamente sensible también se ha tratado de regular (EPA, 2023; Zhu, 2004). El imidacloprid, por ejemplo, es uno de los insecticidas más destacados en la agricultura y, paralelamente, también es el responsable de numerosos casos clínicos de intoxicaciones (Bhatta et al., 2023; Gupta, 2018). En respuesta a esta problemática, Adak et al. (2012) emplearon el polímero funcional de PEG en bloque con polímeros de diferentes ácidos alifáticos, con el objetivo de encapsular físicamente dicho biocida, denotando una liberación lenta que requería 9 días para entregar solamente el 50 % del imidacloprid cargado inicialmente. De manera

análoga, [Memarizadeh et al. \(2014\)](#) también encapsularon este insecticida empleando un polímero funcional de poli(ácido cítrico)-*b*-PEG como sistema de entrega controlada, el cual liberaba el imidacloprid a pH = 10, que es precisamente el grado de acidez intestinal de la especie *Glyphodes pyloalis*, una polilla invasora. Este enfoque permitió reducir la dosis del pesticida y, consecuentemente, su riesgo toxicológico. Por otra parte, la tiametoxam, además de ser otro insecticida muy popular, ha sido clasificado como un peligro de clase III por la OMS, ya que, se ha relacionado con la producción de tumores hepáticos ([Ramanathan et al., 2020](#); [Yi et al., 2023](#)). [Liu et al. \(2015\)](#) desarrollaron un nanoportador basado en polímeros funcionales de dendrímeros catiónicos con la capacidad de inmovilizar y administrar dicho insecticida en función de erradicar larvas invasoras. El clorpirifós, en contraste, es un insecticida moderadamente tóxico asociado con efectos adversos en el sistema nervioso ([Gupta, 2018](#); [Wołejko et al., 2022](#)). [Roy et al. \(2009\)](#) prepararon un hidrogel basado en alginato y almidón para la liberación de clorpirifós, y evidenciaron que su entrega era gradual, requiriendo un periodo de 10 días para alcanzar la liberación total.

Los fungicidas, además de controlar la invasión por hongos, también son conocidos por generar trastornos endocrinos y problemas reproductivos ([Gupta, 2018](#); [Zubrod et al., 2019](#)). En ese sentido, la dosificación del tiram, uno de los fungicidas más empleados, se ha tratado de controlar mediante la disposición de adsorbentes basados en polímeros funcionales de almidón y alginato, evidenciando una liberación del fungicida que se extendió hasta por 9 días ([Singh et al., 2009](#)). [Singh et al. \(2008\)](#) investigaron la efectividad del empleo de un hidrogel basado en almidón y poli(ácido metacrílico) (PAAm) para controlar la administración del tiram, demostrando una liberación lenta de este agroquímico. Estos avances resaltaron el papel crucial que han impartido los polímeros funcionales para la generación de sistemas de liberación lenta o controlada de estos agroquímicos tóxicos.

2.2.1.2.- Entrega controlada de fertilizantes.

Los fertilizantes son sustancias que proveen macro y micronutrientes esenciales para mantener la integridad de los cultivos y promover su crecimiento. Los fertilizantes están basados principalmente en macro-

nutrientes, como el nitrógeno, fósforo y potasio, mientras que los micronutrientes, como el Cu, B, Fe, Na, Mn, Zn, entre otros, son esenciales para las plantas, pero en niveles de concentración reducidos, debido a que son tóxicos cuando exceden sus límites de dosificación, por lo que resulta imperativa la administración en la que estos elementos son entregados en el medio agrícola (Akelah, 2013; Palencia et al., 2021a).

Una de las investigaciones enfocadas en la liberación adecuada de estos nutrientes fue desarrollada por Deshpande et al. (2017), quienes emplearon el quitosano como polímero funcional para formar complejos con el Zn, en función de ser empleado como sistema de entrega controlada en cereales deficientes de dicho micronutriente. Los resultados obtenidos exhibieron que el contenido de Zn en los granos de trigo empleados en el estudio se incrementó hasta en un 42 %. Paralelamente, Meurer et al. (2017) prepararon un hidrogel basado en polialilamina para la liberación foliar de Fe^{3+} , mejorando el contenido de clorofila en las hojas de plantas de pepino. Huey et al. (2019), en un interesante estudio, prepararon un hidrogel a partir de los polímeros funcionales naturales de almidón y quitosano que actuaba como encapsulador de alicina, un inhibidor de la ureasa, mediante un mecanismo de absorción, con el objetivo de aumentar la eficiencia de la aplicación de fertilizantes nitrogenados, como la urea. Los resultados evidenciaron que el sistema quitosano/almidón/urea/alicina continuaba liberando nutrientes de nitrógeno hasta después de 7 días de aplicación, demostrando la aplicación del material para extender la liberación de este fertilizante. Bortolin et al. (2013) emplearon un hidrogel basado en poliacrilamida (PAAm), metilcelulosa y montmorillonita cálcica para liberar urea, obteniendo una desorción de este nutriente que era 200 veces más lenta que la entrega de la urea libre. Zhong et al. (2013) también emplearon un hidrogel basado en almidón sulfonado y poli(ácido acrílico) (PAA) para encapsular una roca fosfórica, obteniendo un material con la capacidad de liberar fósforo gradualmente hasta después de 30 días de ser aplicado. Noppakundilograt et al. (2014) prepararon un hidrogel de poli(alcohol vinílico) (PVA) y quitosano para la liberación de un fertilizante de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK), liberando estos nutrientes hasta incluso 30 días después de su aplicación.

A pesar de que los sistemas de liberación controlada han adquirido protagonismo en la ciencia de materiales, [Milani et al. \(2017\)](#) resaltó algunas limitaciones: (i) los elevados precios de producción, que incluyen el costo de los precursores, condiciones de la síntesis, reactivos adicionales en posteriores modificaciones, entre otros, (ii) escasez de métodos de validación de los perfiles de liberación de agroquímicos, (iii) los resultados obtenidos en el laboratorio usualmente difieren del comportamiento del material en campo y (iv) la dificultad de investigar el efecto ecológico que genera el agroquímico posterior a su liberación. Estos desafíos resaltan la necesidad de continuar avanzando en la investigación y desarrollo de sistemas de liberación controlada basada en polímeros funcionales en función de suplir las necesidades descritas.

2.2.2.- Acondicionadores del suelo.

La integridad del suelo impactará en el desarrollo de los cultivos, debido a que es el factor abiótico encargado de proveer soporte, nutriente y agua a las raíces, por lo que es imperiosa la necesidad de adoptar agentes acondicionadores de suelo que permitan preservar y mejorar sus propiedades fisicoquímicas ([Oladosu et al., 2022](#); [Sikder et al., 2021](#)). En esta aplicación agrícola, los polímeros superabsorbentes (SAP), es decir, hidrogeles, han adquirido especial interés, ya que, estos tienen la capacidad absorber gran cantidad de agua, promueven la formación de agregados, regulan las tasas de evaporación e infiltración del agua, fomentan la actividad microbiana, entre otros ([Palencia et al., 2021a](#); [Sikder et al., 2021](#)). Para que estos materiales poliméricos cumplan adecuadamente dicho propósito, adicional a su capacidad de absorción de agua, estos deberán disponer de: (i) alta capacidad de hinchamiento en soluciones salinas, (ii) alta durabilidad y estabilidad ambiental, (iii) ser biodegradables y, (iv) que su producción sea rentable ([Oladosu et al., 2022](#); [Sikder et al., 2021](#)). En la **Tabla 2.2** se muestran ejemplos de polímeros funcionales comúnmente empleados como agroquímicos y las propiedades que estos impactan en los suelos (este impacto es relativo y está definido sólo de forma parcial, dado que los estudios que se emplearon como referencia evaluaron un conjunto limitado de propiedades).

Tabla 2.2. Polímeros funcionales (PFs) empleados como SAP para mejorar las propiedades del suelo.

PFs	CAA (%)	Propiedades del suelo mejoradas	Referencias
Almidón	425	Porosidad y absorción de humedad e incremento de la actividad microbiana.	Parvathy et al., 2014
GGuar/PAA	800	Porosidad y absorción de humedad.	Thombare et al., 2018
PAGlu	-	Incremento de la actividad microbiana.	Yin et al., 2018
PAGlu	-	Incremento de la actividad microbiana.	Guo et al., 2023
PAA/PAAm	200	Estabilidad y estructura del suelo.	Yang et al., 2023
PAAm	-	Porosidad y retención de humedad.	Zhao et al., 2019
PAAm/PAA-K	52.7 – 71.4	Retención de humedad.	Misiewicz et al., 2019
PAA-Na	196	Estabilidad y estructura del suelo.	Bing-yi et al., 2022

CAA: Capacidad de absorción de agua (%).

PAA: poli(ácido acrílico), PAAm: poli(acrilamida), PAGlu: poli(ácido glutámico), PAA-Na o PAA-K: poliacrilato de sodio y potasio, respectivamente. GGuar: Goma Guar.

La porosidad del suelo es relevante debido a que promueve la oxigenación de las raíces de las plantas y facilita la filtración del agua (Palencia et al., 2021a; Sikder et al., 2021). Se ha propuesto en múltiples investigaciones que los SAP contribuyen a mejorar esta propiedad. Thombare et al. (2018), por ejemplo, prepararon un hidrogel basado en goma guar y PAA, demostrando que, además de incrementar la humedad en el suelo, promovió el aumento de su porosidad, resultando en un ambiente propicio para el crecimiento vegetal. Zhao et al. (2019), por su parte, determinaron que la adición de SAP basado en poli(acrilamida) (PAAm) incrementaba la fracción de arena con respecto al volumen de limo y

partículas de arcilla, lo que tendrá un efecto positivo en la aireación y flujo de agua en el suelo.

Una óptima estructura del suelo, en términos de la formación y cantidad de agregados, también promueve la integridad y el crecimiento de los cultivos debido a que se previene la erosión mientras que, al tiempo, se retiene y mejora la circulación de agua y nutrientes, generando un ambiente propicio para el crecimiento de los cultivos y la actividad microbiológica (Oladosu et al., 2022; Palencia et al., 2021a). Los SAP basados en polielectrolitos que atraigan las partículas del suelo, generando agregados de mayor tamaño, han sido un enfoque novedoso para preservar y mejorar la estructura de este factor abiótico. Bing-yi et al. (2022) estudiaron el efecto de un SAP de PAA aplicado en el suelo, evidenciando un incremento en la cantidad de agregados debido a la naturaleza polielectrolítica de dicho polímero funcional. Dicha observación también fue corroborada por la investigación reciente de Yang et al. (2023), quienes denotaron que al aplicar un SAP de PAA se generaba una mejora en la estructura del suelo, lo cual se manifestó en un incremento en la longitud de las raíces del maíz. El esquema de la formación de agregados promovida por el SAP de PAA se visualiza en la **Figura 2.2.**

Los microorganismos del suelo son cruciales para mantener los suelos sanos y preservar la integridad de las plantas a largo plazo (Oladosu et al., 2022; Sikder et al., 2021). Un suelo poroso se caracteriza por una alta actividad microbiana debido a que este se encuentra adecuadamente oxigenado, promoviendo la actividad de bacterias aeróbicas, como la *Aerobacter* y *Actinomycetes*, que son responsables del denominado “olor a tierra” del suelo, y limitando la supervivencia de bacterias anaeróbicas patógenas que generan efectos adversos en las plantas (O’Brien et al., 2013; Oladosu et al., 2022). En ese sentido, no sorprende que los SAP sean, nuevamente, la estrategia más eficaz para promover la actividad microbiológica. Yin et al. (2018), por ejemplo, estudiaron el efecto de un hidrogel basado en poli(ácido γ -glutámico) sintetizado biológicamente, y evidenciaron que la abundancia relativa de bacterias promotoras de crecimiento de las plantas, como *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Burkholderia*, había incrementado. Guo et al. (2023), en una publicación reciente,

reportaron que el SAP de poli(ácido γ -glutámico) podía aumentar la cantidad de microorganismos de 151 % hasta un 697 %.

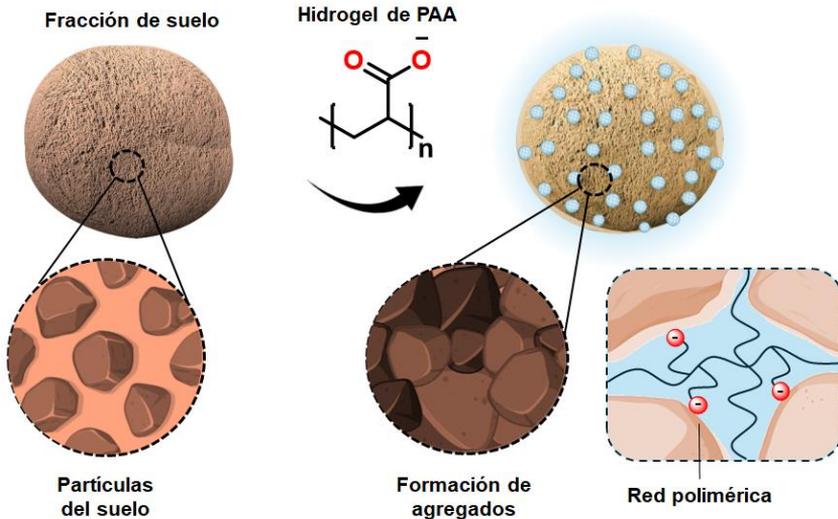


Figura 2.2. Mejora de la estructura del suelo mediante la formación de agregados promovida por un hidrogel basado en el polielectrolito PAA.

2.2.3.- Remoción de contaminantes.

Múltiples contaminantes, de naturaleza tanto orgánica como inorgánica, se acoplan accidentalmente en agroquímicos, como fertilizantes o pesticidas, y son posteriormente liberados al suelo. En otros casos, el agua de riego de los cultivos está contaminada porque su fuente se encuentra cercana a alguna industria generadora de desechos tóxicos. En ese sentido, ha resultado imperativo la generación de sistemas que permitan remover dichas especies químicas y, desde luego, los polímeros funcionales han sido materiales que se han caracterizado por presentar óptimos resultados en este campo. En la **Tabla 2.3** se resumen algunos materiales basados en polímeros funcionales empleados para remover contaminantes en el campo agrícola.

Tabla 2.3. Polímeros funcionales (PFs) empleados como SAP para mejorar las propiedades del suelo.

Material	PF	Contaminante	Remoción (mg/g)	Ref.
Hidrogel	PAmAmMPS	Safranina-T	484.2	Kaşgöz y Durmus, 2008
		Azul de Cresilo Brillante	494.2	
	Cel/CMC	Azul de metileno	9800	Peng et al., 2016
Adsorbente	Alm/PAN	Navy blue	91.74	Olad y Azhar, 2014
	Gel	Verde de malaquita	950.5	Abu Elella et al., 2024
	Lgn/CMC/AG-Na	Cd	1.29×10^{-3}	Tao et al., 2017
		Pb	22.3×10^{-3}	
	PAN/Qts	Rojo Congo	9540	Janaki et al., 2012
	PCMT	Pb	588	Li et al., 2013
	PEI	Cu	330	Molinari et al., 2005
	PEI/Gel	Cd	66	Li et al., 2016
		Pb	66	
	Qts/PAAm	Direct Blue 78	9420	Elzahar y Bassyouni, 2023

Almidón (Alm), polianilina (PAN), celulosa (Cel), carboximetilcelulosa (CMC), alginato de sodio (AG-Na), polietilenimina (PEI), quitosano (Qts), poli(acrilamida-co-ácido 2-acrilamida-2-metilpropanosulfónico) (PAmAmMPS), poli(cardanol-co-melamina-co-tiourea) (PCMT), poli(acrilamida) (PAAm), gelatina (Gel), lignina (Lgn).

Los metales pesados, como Cd, Cu, Ni, Zn, Hg, Cr, Pb, As, entre otros, generan preocupación debido a que estos no se degradan naturalmente y, por lo tanto, se acumulan en el ecosistema, representando una grave amenaza para los animales y seres humanos (Milani et al., 2017; Palencia et al., 2021a). Tao et al. (2017) prepararon un adsorbente híbrido de polímeros funcionales naturales, como la lignina y el alginato de sodio, y semisintéticos

como la carboximetilcelulosa (CMC), para remover metales pesados, como el Pb y el Cd, de suelos contaminados en un área minera en Nanjing, China, evidenciando óptimos resultados de eliminación debido a la captura de estos iones metálicos a través de interacciones electrostáticas y enlaces de coordinación. Li et al. (2023) prepararon un adsorbente basado en grupos amino y mercapto, los cuales podían retener Pb mediante un mecanismo de quimisorción a través de la formación de enlaces de coordinación metal-adsorbente. Los polímeros funcionales también permiten eliminar especies orgánicas contaminantes, como tintes, que pueden infiltrarse en el suelo debido al riego con agua proveniente de industrias textiles. Janaki et al. (2012) emplearon el quitosano, en conjunto con la polianilina, para adsorber el rojo congo, un tinte orgánico, a través de interacciones electrostáticas e hidrofóbicas. El esquema de remoción de este contaminante en el suelo se ilustra en la **Figura 2.3**. Kaşgöz y Durmus (2008) sintetizaron un hidrogel basado en poli(acrilamida-co-ácido 2-acrilamida-2-metilpropanosulfónico) que, al igual que el material anteriormente expuesto, podía retener tintes de Safranina-T y Azul de Cresilo Brillante mediante las interacciones previamente mencionadas. Estas investigaciones subrayan la capacidad de los polímeros funcionales en mitigar el impacto ambiental de actividad industriales, evitando que estas afecten al campo agrícola.

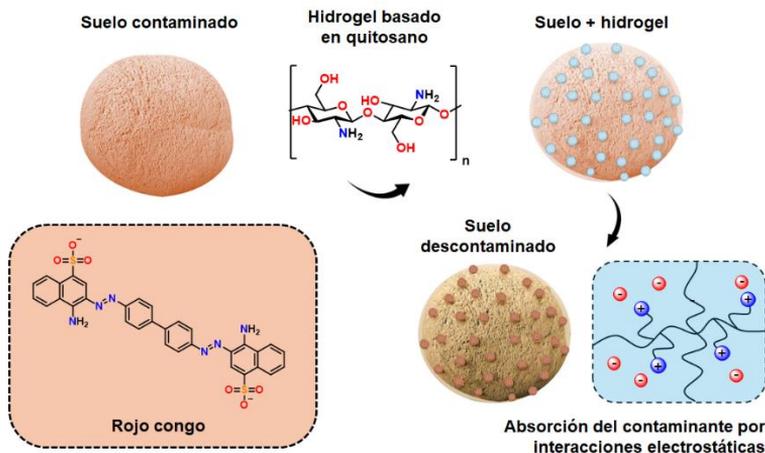


Figura 2.3. Remoción de Rojo Congo mediante un hidrogel basado en quitosano.

2.2.4.- Mejora en el rendimiento de las plantas.

Los reguladores de crecimiento vegetal son especies químicas que promueven los procesos fisiológicos de las plantas para inducir su crecimiento. Entre los promotores más conocidos se encuentran las auxinas, basados en ácidos indol-3-ilacético o 1-naftilacético, giberelinas, citoquininas, entre otros (Akelah, 2013; Palencia et al., 2021a). Vlahoviček-Kahlina et al. (2021) emplearon polímeros funcionales naturales de quitosano y alginato para microencapsular, a través de interacciones electrostáticas y enlaces de hidrógeno, novedosos reguladores de crecimiento vegetal basados en ácido 2,3-deshidroaspártico, ácido 2-amino-3-metoxicarbonilacrílico y el 1-metil-metilaminomaleimida, evidenciando una liberación sostenida y dirigida en siembras de maíz, cebada y trigo. Palencia et al. (2021b) informaron acerca de la síntesis eco-amigable de poliuretanos funcionales con grupos aminoglucósidos catiónicos, el cual liberaba, de manera controlada a través de estímulos químicos de pH y fuerza iónica, la fitohormona denominada ácido naftalenacético. El esquema de esta investigación se ilustra en la **Figura 2.4**.

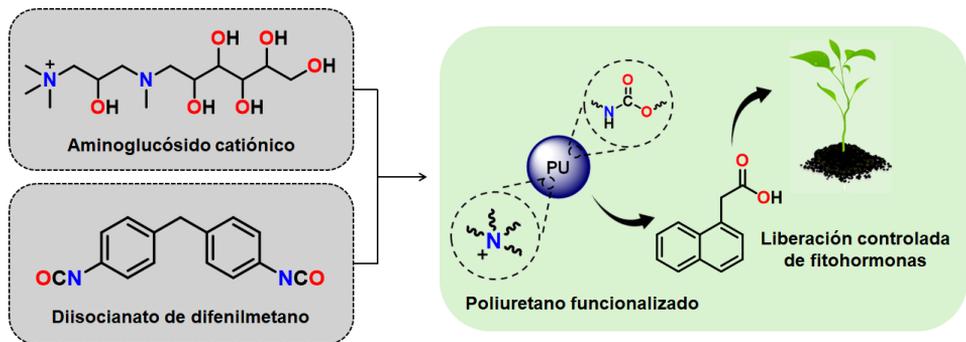


Figura 2.4. Preparación de poliuretanos funcionales catiónicos para la generación de sistemas de liberación controlada de fitohormonas.

El control de enfermedades de las plantas también es de importancia en la agricultura, siendo esencial para promover la sostenibilidad de los cultivos y la seguridad alimentaria. En ese sentido, el empleo de inductores, los cuales

son especies químicas que defienden las plantas contra enfermedades a través de la regulación de la expresión génica, ha emergido como una estrategia innovadora de fitoprotección (Oladosu et al., 2022; Sikder et al., 2021). Terry y Joyce (2004) realizaron una revisión en la que establecieron que los polímeros funcionales como la quitina y el quitosano presentan la capacidad de inducir los mecanismos de defensa de las plantas; sin embargo, todavía se desconoce el mecanismo preciso de inducción, aunque se ha sugerido que la basta cantidad de grupos nitrogenados, en conjunto con los -OH, facilita su interacción con los diferentes receptores de reconocimiento del sistema inmunológico vegetal (Stasińska-Jakubas y Hawrylak-Nowak, 2022). Mercier et al. (2008), por otra parte, estudiaron el efecto de las carrageninas como inductores, las cuales son polisacáridos sulfatados que actúan como polímeros funcionales en esta aplicación debido a la presencia de grupos sulfato que son reconocidos como especies patógenas por el sistema inmune de las plantas, desencadenando respuestas de protección vegetal. Choudhary et al. (2017), en una publicación más reciente, evaluaron la capacidad inductora del quitosano complejoado con cobre, evidenciando que este polímero modificado exhibía la capacidad de estimular la respuesta defensiva de las plantas mediante la producción de antioxidantes, como el superóxido dismutasa y peroxidasa, en conjunto con enzimas de defensa como el polifenol oxidasa y fenilalanina amoniaco-liasa.

El rendimiento de las plantas también puede mejorarse desde su etapa más temprana a través del recubrimiento de semillas con sustancias químicas protectoras basadas en pesticidas, o con sistemas que se encargan de transportar moléculas relevantes para el organismo vegetal, como reguladores de crecimientos, micro o macronutrientes, entre otros (Meurer et al., 2017; Oladosu et al., 2022; Palencia et al., 2021a). La gran ventaja de este enfoque es que la viabilidad de las semillas puede preservarse durante periodos prolongados sin comprometer su capacidad de germinación. Los polímeros funcionales han sido atractivos para este propósito debido a que, como se ha detallado en este capítulo, ellos pueden cargarse con los agroquímicos necesarios para proteger y promover la germinación de la semilla. Su et al. (2017) evaluaron la capacidad de SAP basados en PAAm/PAA como recubrimientos de semillas de plántulas de *Caragana korshinskii*, denotando que los hidrogeles mantenían la humedad de las

semillas, mitigando el estrés oxidativo ocasionado por una eventual condición de sequía. Paralelamente, [Pathak y Ambrose \(2019\)](#) recubrieron semillas de maíz con un hidrogel basado en almidón y succinato, y evidenciaron que las semillas recubiertas promovían la germinación de las especies vegetales.

2.2.5.- Otras aplicaciones.

La versatilidad de los polímeros funcionales ha permitido que su aplicación se extienda a otros aspectos agrícolas menos investigados. En el área de la transfección genética, por ejemplo, se han logrado importantes avances con los polímeros funcionales debido a que sus propiedades químicas propician su empleo como vectores de entrega de material genético a través de la pared celular rígida de las células vegetales ([Milani et al., 2017](#); [Sikder et al., 2021](#)). [Silva et al. \(2010\)](#), por ejemplo, emplearon un polímero conjugado basado en poli(fenileno etileno) modificado con grupos amino cargados positivamente, los cuales propician su interacción con los ácidos nucleicos de densidad de carga negativa, lo que facilitó la administración de ARN pequeño de interferencia (siRNA) a protoplastos de tabaco. De manera análoga, [Jiang et al. \(2014\)](#) emplearon dendrímeros catiónicos para el transporte de un virus de ARN bicatenario (dsRNA), evidenciando su capacidad para administrar material genético a través de las paredes celulares de las raíces de las plantas ([Sikder et al., 2021](#)). En una investigación fascinante, [Liu et al. \(2016\)](#) emplearon los polímeros funcionales basados en dendrímeros catiónicos que demostraron la capacidad de transportar el nucleopoliedrovirus de *Helicoverpa armigera*, que presenta un efecto pesticida contra gusanos del algodonero.

Otra aplicación novedosa consiste en mejorar los bioprocesos realizados por las plantas. Por ejemplo, diferentes investigaciones han empleado polímeros con estructuras conjugadas aromáticas, en función generar sistemas con la capacidad de absorber radiación UV que mejoren los procesos fotosintéticos de las plantas ([Sikder et al., 2021](#); [Wang et al., 2017](#)). [Wang et al. \(2017\)](#) emplearon poli[2,7-(9,9-dihexilfluoreno)-*alt-p*-fenileno] y poli[(9,9-dioctilfluorenil-2,7-diil)-*co*-(1,4-benzo-(2,1',3)-tiadiazol)] como sistemas de recolección de luz UV, los cuales, al formar agregados con los

cloroplastos, se evidenció una aceleración en las tasas de transporte de electrones en el fotosistema II; sin embargo, todavía faltan investigaciones acerca de la citotoxicidad a largo plazo acerca de estos sistemas poliméricos aromáticos.

2.3.- Otras aplicaciones.

Los sistemas basados en polímeros funcionales, que incluyen hidrogeles, adsorbentes, y encapsuladores basados en polímeros anfifílicos o dendrímeros, se han destacado por ser eficaces para liberar agroquímicos, como fertilizantes y pesticidas, de manera lenta y controlada, reduciendo la toxicidad asociada a estas sustancias cuando se adicionan en altas concentraciones. Adicionalmente, los hidrogeles que son empleados como SAP actúan como agentes acondicionadores del suelo ya que, además de preservar la humedad del medio, mejoran las propiedades de este factor abiótico, como su porosidad y estructura. Por otra parte, la versatilidad de los polímeros funcionales relacionada con la presencia de grupos hidrofílicos, hidrofóbicos, quelatogénos o fragmentos cargados, le han permitido disponerse como sistemas de captura de especies iónicas contaminantes (tintes o metales pesados), y como agentes de entrega de moléculas promotoras del crecimiento vegetal. Toda esta información, la cual fue recopilada en el presente capítulo, resalta el papel protagónico que tienen los polímeros funcionales en el desarrollo de prácticas agrícolas que, además de ser efectivas, son amigables con el medio ambiente.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Sucre, la Universidad de Córdoba, y la Universidad del Valle, así como al Departamento Nacional de Planeación de Colombia, específicamente, al Sistema General de Regalías (SGR) por la financiación recibida a través del proyecto BPIN 2020000100027.

Bibliografía

- Abu Elella, M.H.; Aamer, N.; Abdallah, H.M.; López, E.A.; Mohamed, Y.M.A. et al. **2024**. Novel high-efficient adsorbent based on modified gelatin/montmorillonite nanocomposite for removal of malachite green dye, *Scientific Reports*, 14, 1228. DOI: 10.1038/s41598-024-51321-2
- Adak, T.; Kumar, J.; Shakil, N.A.; Walia, S. **2012**. Development of Controlled Release Formulations of Imidacloprid Employing Novel Nano-Ranged Amphiphilic Polymers, *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 47, 217-225. DOI: 10.1080/03601234.2012.634365
- Akelah, A. **2013**. Polymeric Materials: Preparation and Properties. En: *Functionalized Polymeric Materials in Agriculture and the Food Industry*. Springer, 1-61. DOI: 10.1007/978-1-4614-7061-8_1
- Bhatta, O.P.; Chand, S.; Chand, H.; Poudel, R.C.; Lamichhane, R.P. et al. **2023**. Imidacloprid poisoning in a young female: a case report, *Journal of Medical Case Reports*, 17, 43. DOI: 10.1186/s13256-022-03742-8
- Bing-yi, J.; Chi-peng, Z.; Yue, W.; Wei, H.; Ji-qing, S.; Wen-bo, B. **2022**. Effects of different concentrations of super-absorbent polymers on soil structure and hydro-physical properties following continuous wetting and drying cycles, *Journal of Integrative Agriculture*, 21(11), 3368-3381. DOI: 10.1016/j.jia.2022.08.065
- Bortolin, A.; Aouada, F.A.; Mattoso, L.H.C.; Ribeiro, C. **2013**. Nanocomposite PAAm/Methyl Cellulose/Montmorillonite Hydrogel: Evidence of Synergistic Effects for the Slow Release of Fertilizers, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(31), 7431-7439. DOI: 10.1021/jf401273n
- Callaghan, C.; Califano, D.; Gomes, M.H.F.; de Carvalho, H.W.P.; Edler, K.J. et al. **2023**. Cellulose Acetate Microbeads for Controlled Delivery of Essential

Micronutrients, ACS Sustainable Chemistry Engineering, 11(12), 4749-4758. DOI: 10.1021/acssuschemeng.2c07269

Choudhary, R.C.; Kumaraswamy, R.V.; Kumari, S.; Sharma, S.S.; Pal, A. et al. **2017**. Cu-chitosan nanoparticle boost defense responses and plant growth in maize (*Zea mays* L.), Scientific Reports, 7, 9754. DOI: 10.1038/s41598-017-08571-0

Dabbaghi, A.; Rahmani, S. **2018**. Synthesis and characterization of biodegradable multicomponent amphiphilic conetworks with tunable swelling through combination of ring-opening polymerization and “click” chemistry method as a controlled release formulation for 2,4-dichlorophenoxyacetic acid herbicide, Polymers for Advanced Technologies, 30(2), 368-380. DOI: 10.1002/pat.4474

Demissie, Z.; Bekele, A.; Bane, A. **2022**. A Case of Severe 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid Poisoning Causing Diagnostic and Treatment Challenges, International Medical Case Reports Journal, 15, 389-392. DOI: 10.2147/IMCRJ.S375882

Deshpande, P.; Dapkekar, A.; Oak, M.D.; Paknikar, K.M.; Rajwade, J.M. **2017**. Zinc complexed chitosan/TPP nanoparticles: A promising micronutrient nanocarrier suited for foliar application, Carbohydrate Polymers, 165, 394-401. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.02.061

Dhiman, A.; Sharma, A.K.; Agrawal, G. **2022**. Polymer Based Engineered Materials for Sustainable Agriculture, ACS Agricultural Science Technology, 2(4), 693-711. DOI: 10.1021/acsagcitech.1c00278

Dutta, S.; Pal, S.; Panwar, P.; Sharma, R.K.; Bhutia, P.L. **2022**. Biopolymeric Nanocarriers for Nutrient Delivery and Crop Biofortification, ACS Omega 7(30), 25909-25920. DOI: 10.1021/acsomega.2c02494

Elzahar, M.M.H.; Bassyouni, M. **2023**. Removal of direct dyes from wastewater using chitosan and polyacrylamide blends, *Scientific Reports* 13, 15750. DOI: 10.1038/s41598-023-42960-y

EPA. **2023**. Insecticides. Disponible en: <https://www.epa.gov/caddisvol2/insecticides> (Recuperado 26-02-2024).

EPA. **1995**. Metolachlor. Disponible en: https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/reregistration/fs_PC-108801_1-Apr-95.pdf (Recuperado: 26-02-2024).

Gao, Y.; Zhang, Y.; He, S.; Xiao, Y.; Qin, X. et al. **2019**. Fabrication of a hollow mesoporous silica hybrid to improve the targeting of a pesticide, *Chemical Engineering Journal*, 364, 361-369. DOI: 10.1016/j.cej.2019.01.105

Gupta, P.K. **2018**. Toxicity of Herbicides. En: *Veterinary Toxicology*. Academic Press, 553-567. DOI: 10.1016/B978-0-12-811410-0.00044-1

Guo, J.; Zhang, J.; Zhang, K.; Li, S.; Zhang, Y. **2023**. Effect of γ -PGA and γ -PGA SAP on soil microenvironment and the yield of winter wheat, *PLOS ONE*, 18(7), e0288299. DOI: 10.1371/journal.pone.0288299

Huey, C.E.; Yahya, W.Z.N.; Mansor, N. **2019**. Allicin incorporation as urease inhibitor in a chitosan/starch based biopolymer for fertilizer application, *Materials Today: Proceedings*, 16, 2187-2196. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.06.109

Hussain, M.R.; Devi, R.R.; Maji, T.K. **2012**. Controlled release of urea from chitosan microspheres prepared by emulsification and cross-linking method, *Iranian Polymer Journal*, 21, 473-479. DOI: 10.1007/s13726-012-0051-0

Jabraail, F.H.; Mutlaq, M.S. **2022**. Controlled Delivery System for NPK Agrochemical Release from Chitosan Copolymer Hydrogels, *American*

Journal of Applied Sciences, 19(1), 84-92. DOI: 10.3844/ajassp.2022.84.92

Janaki, V.; Oh, B.T.; Shanthi, K.; Lee, K.J.; Ramasamy, A.K. et al. **2012**. Polyaniline/chitosan composite: An eco-friendly polymer for enhanced removal of dyes from aqueous solution, *Synthetic Metals*, 162(11-12), 974-980. DOI: 10.1016/j.synthmet.2012.04.015

Jiang, L.; Ding, L.; He, B.; Shen, J.; Xu, Z. et al. **2014**. Systemic gene silencing in plants triggered by fluorescent nanoparticle-delivered double-stranded RNA, *Na, Nanoscale*, 6, 9965-9969. DOI: 10.1039/C4NR03481C

Junior, O.V.; Cardoso, F.A.R.; de Souza, G.B.M.; Giufrida, W.F.; Filho, L.C. **2021**. Single step encapsulation process of ivermectin in biocompatible polymer using a supercritical antisolvent system process, *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 16(5), e2672. DOI: 10.1002/apj.2672

Kaşgöz, H.; Durmus, A. **2008**. Dye removal by a novel hydrogel-clay nanocomposite with enhanced swelling properties, *Polymers for Advanced Technologies*, 19(7), 838-845. DOI: 10.1002/pat.1045

Kniss, A.R. **2017**. Long-term trends in the intensity and relative toxicity of herbicide use, *Nature Communications*, 8, 14865. DOI: 10.1038/ncomms14865

Kwecien, I.; Adamus, G.; Jiang, G.; Radecka, I.; Baldwin, T.C. et al. **2018**. Biodegradable PBAT/PLA Blend with Bioactive MCPA-PHBV Conjugate Suppresses Weed Growth, *Biomacromolecules*, 19(2), 511-520. DOI: 10.1021/acs.biomac.7b01636

Li, B.; Zhou, F.; Huang, K.; Wang, Y.; Mei, S. et al. **2016**. Highly efficient removal of lead and cadmium during wastewater irrigation using a polyethylenimine-grafted gelatin sponge, *Scientific Reports*, 6, 33573. DOI: 10.1038/srep33573

- Li, F.; Yang, B.; Yang, F.; Wu, J.; Chen, J. et al. **2023**. Stabilization mechanism of Pb with an amino- and mercapto-polymer to assist phytoremediation, *Journal of Hazardous Materials*, 442, 130139. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.130139
- Li, M.; Huang, Q.; Wu, Y. **2011**. A novel chitosan-poly(lactide) copolymer and its submicron particles as imidacloprid carriers, *Pest Management Science*, 67(7), 831-836. DOI: 10.1002/ps.2120
- Liang, W.; Yu, A.; Wang, G.; Zheng, F.; Jia, J. et al. **2018**. Chitosan-based nanoparticles of avermectin to control pine wood nematodes, *International Journal of Biological Macromolecules*, 112, 258-263. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.01.174
- Lipowczan, A.; Trochimczuk, A.W. **2021**. Phosphates-Containing Interpenetrating Polymer Networks (IPNs) Acting as Slow Release Fertilizer Hydrogels (SRFHs) Suitable for Agricultural Applications, *Materials*, 14(11), 2893. DOI: 10.3390/ma14112893
- Liu, X.; Zheng, Y.; Zhang, S.; Liu, K.; Zhang, S. et al. **2016**. Perylenediimide-cored cationic nanocarriers deliver virus DNA to kill insect pests, *Polymer Chemistry*, 7, 3740-3746. DOI: 10.1039/C6PY00574H
- Lobo, F.A.; de Aguirre, C.L.; Souza, P.M.S.; Grillo, R.; de Melo, N.F.S. et al. **2012**. Preparation and Characterization of Polymeric Microparticles Used for Controlled Release of Ametryn Herbicide. En: *Properties, Synthesis and Control of Weeds*. IntechOpen, 5-16. DOI: 10.5772/31264
- Marin-Morales, M.A.; Ventura-Camargo, B.C.; Hoshina, M.M. **2013**. Toxicity of Herbicides: Impact on Aquatic and Soil Biota and Human Health. En: *Herbicides - Current Research and Case Studies in Use*. IntechOpen. DOI: 10.5772/55851
- Mei, X.D.; Liang, Y.H.; Zhang, T.; Ning, J.; Wang, Z.Y. **2014**. An Amphiphilic Chitosan-Poly(lactide) Graft Copolymer and its Nanoparticles as Fungicide

- Carriers, *Advanced Materials Research*, 1051, 21-28. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1051.21
- Memarizadeh, N.; Ghadamyari, M.; Adeli, M.; Talebi, K. **2014**. Preparation, Characterization and Efficiency of Nanoencapsulated Imidacloprid Under Laboratory Conditions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 107, 77-83. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2014.05.009
- Mercier, L.; Lafitte, C.; Borderies, G.; Briand, X.; Esquerré-Tugayé, M.T. et al. **2008**. The algal polysaccharide carrageenans can act as an elicitor of plant defence, *New Phytologist Foundation*, 149(1), 43-51. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2001.00011.x
- Meurer, R.A.; Kemper, S.; Knopp, S.; Eichert, T.; Jakob, F. et al. **2017**. Biofunctional Microgel-Based Fertilizers for Controlled Foliar Delivery of Nutrients to Plants, *Angewandte Chemie International Edition*, 56(26), 7380-7386. DOI: 10.1002/anie.201701620
- Milani, P.; França, D.; Balieiro, A.G.; Faez, R. **2017**. Polymers and its Applications in Agriculture, *Polímeros*, 27(03). DOI: 10.1590/0104-1428.09316
- Misiewicz, J.; Lejcuś, K.; Dąbrowska, J.; Marczak, D. **2019**. The Characteristics of Absorbency Under Load (AUL) for Superabsorbent and Soil Mixtures, *Scientific Reports*, 9, 18098. DOI: 10.1038/s41598-019-54744-4
- Mohammed, S.W.; El-Megrab, N.A.; Hasan, A.A.; Gomaa, E. **2024**. A remodeled ivermectin polycaprolactone-based nanoparticles for inhalation as a promising treatment of pulmonary inflammatory diseases, *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 195, 106714. DOI: 10.1016/j.ejps.2024.106714
- Molinari, R.; Poerio, T.; Argurio, P. **2005**. Polymer assisted ultrafiltration for copper-citric acid chelate removal from wash solutions of contaminated

- soil, *Journal of Applied Electrochemistry*, 35, 375-380. DOI: 10.1007/s10800-005-0795-8
- Noppakundilograt, S.; Pheatcharat, N.; Kiatkamjornwong, S. **2014**. Multilayer-coated NPK compound fertilizer hydrogel with controlled nutrient release and water absorbency, *Journal of Applied Polymer Science*, 132(2), 41249. DOI: 10.1002/app.41249
- O'Brien, A.T. **2013**. Supporting soil fungi to rebuild soils in agriculture, *Philosophy Activism Nature*, 10, 24-35.
- Olad, A.; Azhar, F.F. **2014**. Eco-friendly biopolymer/clay/conducting polymer nanocomposite: Characterization and its application in reactive dye removal, *Fibers and Polymers*, 15, 1321-1329. DOI: 10.1007/s12221-014-1321-6
- Oladosu, Y.; Rafii, M.Y.; Arolu, F.; Chukwi, S.C.; Salisu, M.A. **2022**. Superabsorbent Polymer Hydrogels for Sustainable Agriculture: A Review, *Horticulturae*, 8(7), 605. DOI: 10.3390/horticulturae8070605
- Palencia, M.; Lerma, T.A.; Garcés, V.; Mora, M.A.; Martínez, J.M.; Palencia, S.L. **2021a**. Functional and eco-friendly polymers in agriculture. En: *Eco-friendly Functional Polymers: An Approach from Application-Targeted Green Chemistry*. Elsevier, 181-191. DOI: 10.1016/B978-0-12-821842-6.00016-6
- Palencia, M.; Mora, M.; Lerma, T.A. **2021b**. Environment-friendly stimulus-sensitive polyurethanes based on cationic aminoglycosides for the controlled release of phytohormones, *Smart and Sustainable Built Environment*, 10(1), 1-17. DOI: 10.1108/SASBE-09-2019-0126
- Parvathy, P.C.; Jyothi, A.N.; John, K.S.; Sreekumar, J. **2014**. Cassava Starch Based Superabsorbent Polymer as Soil Conditioner: Impact on Soil Physi-

co-Chemical and Biological Properties and Plant Growth, Clean – Soil, Air, Water, 42(11), 1610-1617. DOI: 10.1002/clen.201300143

Pathak, V.; Ambrose, K. **2019**. Starch-based biodegradable hydrogel as seed coating for corn to improve early growth under water shortage, Journal of Applied Polymer Science, 137(14), 48523. DOI: 10.1002/app.48523

Peng, N.; Hu, D.; Zeng, J.; Li, Y.; Liang, L.; Chang, C. **2016**. Superabsorbent Cellulose–Clay Nanocomposite Hydrogels for Highly Efficient Removal of Dye in Water, ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 4(12), 7217-7224. DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b02178

Pereira, E.I.; Giroto, A.S.; Bortolin, A.; Yamamoto, C.F.; Marconcini, M.J. et al. **2015**. Perspectives in Nanocomposites for the Slow and Controlled Release of Agrochemicals: Fertilizers and Pesticides. En: Nanotechnologies in Food and Agriculture. Springer, 241-265. DOI: 10.1007/978-3-319-14024-7_11

Pereira, S. Martins, J.D.; Santos, M.S.; Moreno, A.J.M. et al. P.; Fernandes, M.A.S.; **2009**. Toxicity assessment of the herbicide metolachlor comparative effects on bacterial and mitochondrial model systems, Toxicology in Vitro, 23(8), 1585-1590. DOI: 10.1016/j.tiv.2009.06.032

Rahman, M.H.; Das, B.K.; Miah, M.A.J.; Ahmad, H. **2009**. Fixation of Urea to Polyacrylic Acid and Nitrogen Release Behavior of the Product (Polyurea)-A Comparison with Urea and Control (Without Nitrogen Fertilizer), Asian Journal of Crop Science, 1(1), 6-14. DOI: 10.3923/ajcs.2009.6.14

Rajendran, A.; Mahalingam, S.; Babu, G.R.; Rajendra, K.R.; Nathan, B. **2021**. 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid Poisoning Mimicking as Organophosphorus Poisoning, Cureus, 13(1), e12852. DOI: 10.7759/cureus.12852

- Ramanathan, S.; Kumar, S.; Sanjeevi, G.; Narayanan, B.; Kurien, A.A. **2020**. Thiamethoxam, a Neonicotinoid Poisoning Causing Acute Kidney Injury via a Novel Mechanism, *Nephrology Rounds*, 5(7), 1111-1113. DOI: 10.1016/j.ekir.2020.04.009
- Rohily, K.A.; El-Hamshary, H.; Ghoneim, A.; Modaihsh, A. **2020**. Controlled Release of Phosphorus from Superabsorbent Phosphate-Bound Alginate-Graft-Polyacrylamide: Resistance to Soil Cations and Release Mechanism, *ACS Omega*, 5(51), 32919-32929. DOI: 10.1021/acsomega.0c03740
- Roy, A.; Bajpai, J.; Bajpai, A.K. **2009**. Dynamics of controlled release of chlorpyrifos from swelling and eroding biopolymeric microspheres of calcium alginate and starch, *Carbohydrate Polymers*, 76(2), 222-231. DOI: 10.1016/j.carbpol.2008.10.013
- Sikder, A.; Pearce, A.K.; Parkinson, S.J.; Napier, R.; O'Reilly, R.K. **2021**. Recent Trends in Advanced Polymer Materials in Agriculture Related Applications, *ACS Applied Polymer Materials*, 3(3), 1203-1275. DOI: 10.1021/acsapm.0c00982
- Silva, A.T.; Nguyen, A.; Ye, C.; Verchot, J.; Moon, J.H. **2010**. Conjugated polymer nanoparticles for effective siRNA delivery to tobacco BY-2 protoplasts, *BMC Plant Biology*, 10, 291. DOI: 10.1186/1471-2229-10-291
- Singh, B.; Sharma, D.K.; Gupta, A. **2008**. In vitro release dynamics of thiram fungicide from starch and poly(methacrylic acid)-based hydrogels, *Journal of Hazardous Materials*, 154(1-3), 278-286. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.10.024
- Singh, B.; Sharma, D.K.; Kumar, R.; Gupta, A. **2009**. Controlled release of the fungicide thiram from starch–alginate–clay based formulation, *Applied Clay Science*, 45(1-2), 76-82. DOI: 10.1016/j.clay.2009.03.001

- Stasińska-Jakubas, M.; Hawrylak-Nowak, B. **2022**. Protective, Biostimulating, and Eliciting Effects of Chitosan and Its Derivatives on Crop Plants, *Molecules*, 27(9), 2801. DOI: 10.3390/molecules27092801
- Su, L.Q.; Li, J.G.; Xue, H.; Wang, X.F. **2017**. Super absorbent polymer seed coatings promote seed germination and seedling growth of *Caragana korshinskii* in drought, *Journal of Zhejiang University-Science B*, 18, 696-706. DOI: 10.1631/jzus.B1600350
- Tao, X.; Li, A.; Yang, H. **2017**. Immobilization of metals in contaminated soils using natural polymer-based stabilizers, *Environmental Pollution*, 222, 348-355. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.12.028
- Terry, L.A.; Joyce, D.C. **2004**. Elicitors of induced disease resistance in postharvest horticultural crops: a brief review, *Postharvest Biology and Technology*, 32(1), 1-13. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2003.09.016
- Thombare, N.; Mishra, S.; Siddiqui, M.Z.; Jha, U.; Singh, D. et al. **2018**. Design and development of guar gum based novel, superabsorbent and moisture retaining hydrogels for agricultural applications, *Carbohydrate Polymers*, 185, 169-178. DOI: 10.1016/j.carbpol.2018.01.018
- Tong, Y.; Wu, Y.; Zhao, C.; Xu, Y.; Lu, J. et al. **2017**. Polymeric Nanoparticles as a Metolachlor Carrier: Water-Based Formulation for Hydrophobic Pesticides and Absorption by Plants, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65, 7371-7378. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b02197
- Vlahoviček-Kahlina, K.; Jurić, S.; Marijan, M.; Mutaliyeva, B.; Khalus, S.V. et al. **2021**. Synthesis, Characterization, and Encapsulation of Novel Plant Growth Regulators (PGRs) in Biopolymer Matrices, *International Journal of Molecular Sciences*, 22, 1847. DOI: 10.3390/ijms22041847
- Wang, Y.; Li, S.; Liu, L.; Lv, F.; Wang, S. **2017**. Conjugated Polymer Nanoparticles to Augment Photosynthesis of Chloroplasts, *Angewandte*

Chemie International Edition, 56(19), 5308-5311. DOI: 10.1002/anie.201702376

Wołejko E.; Łozowicka, B.; Jabłońska-Trypuć, A.; Pietruszyńska, M.; Wydro, U. **2022**. Chlorpyrifos Occurrence and Toxicological Risk Assessment: A Review, International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(19), 12209. DOI: 10.3390/ijerph191912209

Xiao, X.; Yu, L.; Xie, F.; Bao, X.; Liu, H. **2017**. One-step method to prepare starch-based superabsorbent polymer for slow release of fertilizer, Chemical Engineering Journal, 309, 607-616. DOI: 10.1016/j.cej.2016.10.101

Yang, Y.; Cheng, J.; Garamus, V.M.; Li, N.; Zou, A. **2018**. Preparation of an Environmentally Friendly Formulation of the Insecticide Nicotine Hydrochloride through Encapsulation in Chitosan/Tripolyphosphate Nanoparticles, Journal of Agricultural and Food Chemistry, 66(5), 1067-1074. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b04147

Yang, Y.; Jiang, Q.; Peng, M.; Zhou, Z.; Du, X. et al. **2022**. A Star Polyamine-Based Nanocarrier Delivery System for Enhanced Avermectin Contact and Stomach Toxicity against Green Peach Aphids, Nanomaterials, 12(9), 1445. DOI: 10.3390/nano12091445

Yang, W.; Qu, Z.; Feng, G.; Yang, Y.; Song, R. **2023**. Response of root growth and distribution of maize plants to foliar-sprayed antitranspirant and soil-amended hydrogel polymer, Chilean Journal of Agricultural Research, 83(1). DOI: 10.4067/S0718-58392023000100094

Yi, L.; Zhang, S.; Chen, X.; Wang, T.; Yi, X. **2023**. Evaluation of the risk of human exposure to thiamethoxam by extrapolation from a toxicokinetic experiment in rats and literature data, Environment International, 173, 107823. DOI: 10.1016/j.envint.2023.107823

- Yin, A.; Jia, Y.; Qiu, T.; Gao, M.; Cheng, S. et al. **2018**. Poly- γ -glutamic acid improves the drought resistance of maize seedlings by adjusting the soil moisture and microbial community structure, *Applied Soil Ecology*, 129, 128-135. DOI: 10.1016/j.apsoil.2018.05.008
- Zhang, J.; Li, M.; Fan, T.; Xu, Q.; Wu, Y. et al. **2013a**. Construction of novel amphiphilic chitosan copolymer nanoparticles for chlorpyrifos delivery, *Journal of Polymer Research*, 20(107). DOI: 10.1007/s10965-013-0107-7
- Zhang, K.; Lin, Z.T.; Zheng, X.L.; Jiang, G.B.; Fang, Y.S. **2013b**. Starch derivative-based superabsorbent with integration of water-retaining and controlled-release fertilizers, *Carbohydrate Polymers*, 92(2), 1367-1376. DOI: 10.1016/j.carbpol.2012.10.030
- Zhao, W.; Cao, T.; Dou, P.; Sheng, J.; Luo, M. **2019**. Effect of various concentrations of superabsorbent polymers on soil particle-size distribution and evaporation with sand mulching, *Scientific Reports*, 9, 3511. DOI: 10.1038/s41598-019-39412-x
- Zhong, K.; Lin, Z.T.; Zheng, X.L.; Jiang, G.B.; Fang, Y.S. et al. **2013**. Starch derivative-based superabsorbent with integration of water-retaining and controlled-release fertilizers, *Carbohydrate Polymers*, 92(2), 1367-1376. DOI: 10.1016/j.carbpol.2012.10.030
- Zhu, K.Y. **2004**. Insecticide Toxicity. En: *Encyclopedia of Entomology*. Springer, 1187-1188. DOI: 10.1007/0-306-48380-7_2190
- Zubrod, J.P.; Bundschuh, M.; Arts, G.; Brühl, C.A.; Imfeld, G. et al. **2019**. Fungicides: An Overlooked Pesticide Class? *Environmental Science & Technology*, 53(7), 3347-3365. DOI: 10.1021/acs.est.8b04392

Capítulo 3.

Polímeros y polímeros compuestos eco-amigables: biodegradabilidad y aplicaciones.

3.1.- Introducción.

El uso excesivo de los polímeros sintéticos ha desencadenado una fuerte problemática no solo en la salud humana y animal, sino en el medio ambiente, este hecho puede explicarse por la poca o nula biodegradabilidad que presentan. Asimismo, la utilidad de estos polímeros está limitada por el alto costo y el agotamiento de los productos petroquímicos (Li et al., 2020). Por este motivo, los esfuerzos están enfocados hacia la búsqueda de nuevas alternativas que cumplan con ciertos criterios como: más amigables con el medio ambiente (o ecoamigables), alta disponibilidad, bajo costo y biodegradables. En este escenario, los nuevos protagonistas son los llamados polímeros naturales, o simplemente, biopolímeros.

En este capítulo se aborda, de manera concisa, sobre los polímeros ecoamigables, de dónde pueden ser obtenidos, así como el uso de biorresiduos como fuente promisorio de materiales biopoliméricos. Asimismo, se aborda el concepto de biodegradabilidad, los factores que lo afectan, y sus métodos para la cuantificación de ésta. Finalmente, el uso de los biopolímeros y sus perspectivas es discutido.

Cite as: Á.Á. Arrieta, E.M. Combatt, M. Palencia. 2024. Polímeros y polímeros compuestos ecoamigables: biodegradabilidad y aplicaciones. En: Á.Á. Arrieta, E.M. Combatt, M. Palencia. Materiales poliméricos funcionales basados en productos de la agroindustria: Yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y Marañón (*Anacardium occidentale* L.). MT-Pallantia Publisher s.a.s., Cali - Colombia. pp. 85-104. DOI: 10.34294/b.001.c3.2024.03.

3.1.1.- Polímeros ecoamigables.

Se denominan polímeros ecoamigables a aquellos materiales poliméricos que derivan de fuentes renovables, es decir, de biomasa (He et al., 2014). Estos materiales han tenido auge debido a la preocupación mundial que existe por el uso desmesurado de materiales poliméricos de un solo uso, y los cuales, generalmente no son degradables. Estos materiales están dentro de los denominados polímeros sostenibles, las cuales son aquellos materiales que son derivados de fuentes de carbono (las que también comprenden sus combinaciones), y que, al finalizar su ciclo, pueden ser reutilizados (Mohanty et al., 2022; Wang et al., 2020).

3.1.2.- Polímeros compuestos ecoamigables.

Los polímeros compuestos ecoamigables abarcan las uniones posibles entre materiales biopoliméricos que son amigables con el medio ambiente, y otro tipo de material que los una y refuerce, estas uniones -puede ser en este caso-, con fibras naturales (Moustafa et al., 2019). Este tipo de materiales pueden clasificarse según el tipo de partículas involucradas, su estructura e interacciones, así como el tipo de fibra presente. Sus aplicaciones son diversas, dependiendo del tipo de propiedad que se quiere mejorar, por ejemplo, en la mejora del proceso del tratamiento de aguas contaminadas. El compuesto quitosano/ AlCl_3 muestra 100 % de efectividad contra la cianobacteria *M. aeruginosa* (Udayakumar Prabu et al., 2021).

3.1.3.- Fuentes naturales de polímeros.

3.1.3.1.- Almidón.

El almidón es un biopolímero natural formado por cierta cantidad de monosacáridos de D-glucosa, unidas por enlaces glucosídicos α -D-(1 \rightarrow 4) y/o α -D-(1 \rightarrow 6), como se muestra en la **Figura 3.1**. Estructuralmente, el almidón está constituido por amilosa y amilopectina. La amilosa, cuyos enlaces son α -D-(1 \rightarrow 4), y el cual representa aproximadamente 25 % del almidón, y es soluble en agua (**Figura 3.1a**). Por otra parte, la amilopectina, posee enlaces α -D-(1 \rightarrow 4) y α -D-(1 \rightarrow 6), como se muestra en la **Figura 3.1b**. Los enlaces α -

D-(1→6) representan aproximadamente el 4-6 % de los enlaces presentes en este polímero. La amilopectina es el componente mayoritario en el almidón (~ 75 %), esta composición varía teniendo en cuenta la fuente natural.

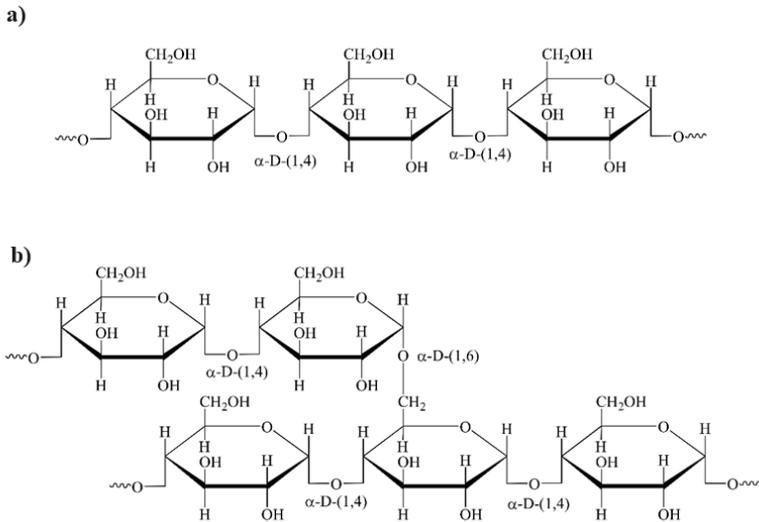


Figura 3.1. Estructura del almidón: a) amilosa, y b) amilopectina.

Este biopolímero presenta ciertas características que hacen de él un producto interesante para la ciencia, siendo algunas de ellas la capacidad de biodegradarse, es renovable, presenta una alta disponibilidad, es benigno con el medio ambiente. Gracias a su alta disponibilidad, el almidón puede ser extraído de diferentes fuentes naturales como la yuca, arroz, maíz y papa (Majaron et al., 2020).

3.1.3.2.- Celulosa.

La celulosa es un biopolímero lineal conformado por cadenas de D-glucopiranosas unidas mediante el enlace β (1→4), como se muestra en la **Figura 3.2**. La longitud de la cadena presente en este polímero depende de la fuente natural del cual sea obtenida, por lo que está compuesta de 2000 a

14000 unidades de glucosa (Carreño Pineda et al., 2012). Este biopolímero es poco soluble en agua, el cual presenta dos regiones: amorfa y cristalina. Estas regiones son obtenidas dependiendo de las condiciones de extracción.

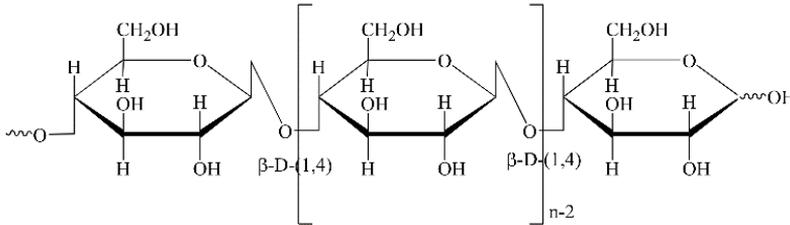


Figura 3.2. Estructura de la celulosa.

La celulosa es el componente principal de la pared celular en las plantas. Sus propiedades dependen de la formación de uniones inter- e intramoleculares (Ghanbarzadeh & Almasi, 2013). Sus aplicaciones son variadas, no solo en la fabricación de papel y sus derivados, sino también en la industria alimenticia, farmacéutica, de explosivos, entre otras (Carreño Pineda et al., 2012).

3.1.3.3.- Lignina.

La lignina es otro polímero obtenido de forma natural, el cual proviene de las plantas y algunas algas. Es un biomaterial complejo, sus monómeros son tres: alcohol *p*-coumarílico, alcohol coniferílico, y alcohol sinapílico. El enlace predominante (40 – 60 % en árboles) en la lignina es el arilglicerol- β -ariléter; o β -O-4 (Katahira et al., 2018), cuya estructura se muestra en la **Figura 3.3**, el cual se ha comprobado que es vital para las reacciones de depolimerización.

El contenido de lignina en las plantas varía según la especie: plantas herbáceas o árboles (Katahira et al., 2018). Su interés a nivel industrial radica en el aprovechamiento de la lignocelulosa (Zhao et al., 2022).

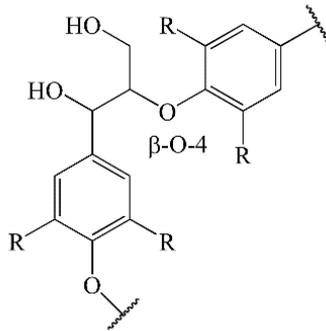


Figura 3.3. Enlace predominante β -O-4 en la lignina.

3.1.3.4.- Quitina.

La quitina, polímero presente en algunas especies de hongos, así como especies de animales, está conformado por una estructura lineal, la cual posee alta masa molecular, y que constituida por unidades de N-acetil-D-glucosamina unidas por enlaces β -D (1,4), como se muestra en la **Figura 3.4**. La quitina presenta 3 formas cristalinas: α , β , y γ . La α -quitina se presenta en forma de cristales ortorrómbicos, con uniones entre planos del polímero. La forma β presenta cristales monoclinicos, sin uniones entre planos. La solubilidad de este biopolímero depende de la forma alomórfica, siendo la β -quitina más soluble que la α -quitina, dependiendo del solvente usado. La forma γ está presente en forma de nanofibras (Bai et al., 2022).

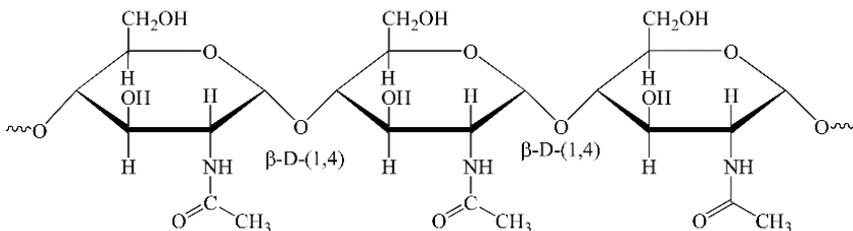


Figura 3.4. Estructura de la quitina.

Los usos de este material polimérico son variados, desde agente floculante, uso en alimentos y medicamentos como estabilizante, así como componente de las resinas de intercambio iónico (Arshad et al., 2020).

3.1.4.- Residuos agrícolas como fuentes de polímeros ecoamigables.

Los residuos agrícolas son una fuente abundante de materiales poliméricos, que pueden coadyuvar a disminuir el impacto ambiental. El uso de los residuos de plantas que generan almidón, tales como tubérculos (yuca, papa, entre otros), pueden incorporarse para generar materiales poliméricos sostenibles, y así poder ser reutilizados.

En el caso de la lignina, presente en muchas especies vegetales, el residuo formado puede ser de gran utilidad para la recuperación de suelos, como agente dispersante, entre otros. Dependiendo de la región geográfica, es posible la obtención de materiales poliméricos con los residuos producto de cosechas intensivas, como el arroz (*O. sativa*), donde la cascarilla antes generaba un problema ambiental enorme por su quema, ahora es posible obtener celulosa usando diversos métodos de preparación (Arshad et al., 2020).

3.2.- Biodegradabilidad de materiales poliméricos.

3.2.1.- Biodegradabilidad.

Los estudios sobre procesos de biodegradabilidad de polímeros naturales han tomado auge en los últimos años, gracias a la obtención de resultados muy significativos y prometedores. Este hecho, ha logrado captar la atención de ciertos científicos en el desarrollo de nuevos materiales biopoliméricos que probablemente puedan ser utilizados en la cotidianidad gracias a su poder degradable. La biodegradabilidad es definida como la habilidad de ciertos materiales, en este caso polímeros, de descomponerse por la acción de organismos vivos (Goswami & O’Haire, 2016). Este proceso puede deberse a la presencia de microorganismos, los cuales pueden hidrolizar el biocompuesto hasta llevarlo a azúcares elementales como monómeros, dímeros, oligómeros o en su defecto, en compuestos de baja masa molecular,

con el fin de metabolizarlo y aprovecharlos como fuente de energía. También puede ser debido a la actividad de enzimas microbianas (Da Silva et al., 2016; Li et al., 2020; Majaron et al., 2020; Salimi et al., 2020; Zoungran et al., 2020). En síntesis, la pérdida de masa durante la biodegradación puede atribuirse a la descomposición microbiana de la cadena molecular, actividad enzimática, reacciones complejas, como oxidación (Li et al., 2020).

3.3.- Factores que influyen en la biodegradabilidad.

Existen diversos factores que influyen en la biodegradabilidad, tales como (Ghanbarzadeh & Almasi, 2013; Nair et al., 2017; Saini, 2017; Samir et al., 2022):

- Estructura química del polímero, teniendo en cuenta el carácter hidrofóbico e hidrofílico de éste. La presencia simultánea de regiones hidrofóbicas e hidrofílicas incrementan la degradabilidad.
- Morfología del material polimérico. Cuando se da la degradación, ésta se produce con más facilidad en la parte amorfa.
- Masa molecular del polímero. Con el incremento de la masa molecular del polímero, la reacción de degradación tiende a disminuir. Si bien se puede incrementar la zona amorfa del polímero, también se puede dar que la región cristalina de éste incremente, la cual dificulta tales reacciones.
- Temperatura de fusión. La temperatura de fusión del polímero afecta la biodegradabilidad, donde el uso de polímeros de elevado peso molecular causa una disminución en la degradación de este.
- Reacciones fotoquímicas – radiación. Reacciones generadas por radiación, formación de radicales, así como fotólisis producidas por rayos X o rayos Gamma, las cuales modifican la estructura del polímero y afectar significativamente las reacciones de degradación.
- Procesos de oxidación – reducción. Al igual que en el ítem anterior, las reacciones de degradación pueden verse afectadas por procesos oxidativos que puedan ocurrir en el material polimérico.
- Otros factores también pueden afectar la biodegradabilidad, tales como pureza, difusividad, porosidad, así como resistencia térmica y mecánica.

3.4.- Métodos de determinación de biodegradabilidad.

Los métodos de determinación de la biodegradabilidad están clasificados según el medio donde se realiza (Pires et al., 2022):

- Compostaje. La determinación de la biodegradabilidad se realiza mediante las normas ISO (del inglés *International Organization for Standardization*, Organización Internacional de Normalización) 14855-1:2012, así como ASTM (*American Society for Testing and Materials*, Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales) D5338:15. Ambas normas usan la conversión del carbono presente en dióxido de carbono resultante de la prueba.
- Agua. Existen diversos métodos estandarizados para la determinación de la biodegradabilidad de polímeros en medios acuáticos, en las que se determina el oxígeno disponible y la cantidad de dióxido de carbono generado durante el ensayo. Tales normas son la ISO 18830:2016, ISO 19679:2016, ISO 14853:2016, ISO 23977-1:2020, ISO 23977-2:2020, ISO 15314:2018, ISO 22766:2020, ISO 62:2008, ASTM D6691-17, ASTM D7473/D7473M-21, ASTM D7991-15, ASTM D570-98(2018), y ASTM D5229/D5229M-20.
- Suelos. La determinación de la biodegradabilidad del polímero por la acción de los microorganismos presentes en esta matriz puede efectuarse usando las normas ISO 17556:2019, así como ASTM D5988-18. Estas normas se fundamentan en la detección del dióxido de carbono producido, teniendo en cuenta factores que influyen la degradabilidad del suelo, tales como pH, temperatura, así como oxígeno. Los polímeros más usados para estas determinaciones son almidón y celulosa.

Otra forma de determinar la degradación del biopolímero es realizada teniendo en cuenta la pérdida de masa, como se muestra en la ecuación 1 (Da Silva et al., 2016; Salimi et al., 2020), donde W_i y W_f son las masas de las biopelículas antes y después de la degradación, respectivamente.

$$\text{Degradación (\%)} = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad (1)$$

Esta última metodología se ha implementado en la determinación de la biodegradabilidad de biopolímeros de almidón y extracto de la cáscara de la nuez del anacardo, las cuales fueron sintetizadas previamente (Arrieta et al., 2022). Estos biopolímeros fueron sintetizados teniendo en cuenta la cantidad del extracto de la cáscara de la nuez del anacardo, y el pH. La prueba de biodegradabilidad consistió en el siguiente procedimiento: se preparó un suelo simulado utilizando 23 % de materia orgánica (bovinaza), 23 % de arena, 23 % limo-limoso y 31 % de agua (todos en porcentaje masa/masa). Seguidamente, las muestras de cada biopolímero fueron recubiertas con el suelo simulado, luego se empacaron en bolsas resellables agujeradas, y posteriormente enterradas en el suelo a una profundidad de 10 cm a una temperatura de 25 ± 3 °C, aproximadamente. La biodegradación fue controlada cada 3 días, de manera que las muestras se retiraron del suelo, se lavaron con abundante agua destilada y se secaron a 30 °C por 24 horas. En la **Figura 3.5** se muestra la representación esquemática del proceso de biodegradabilidad en suelo simulado.



Figura 3.5. Representación del proceso de biodegradabilidad en suelo simulado.

La **Tabla 3.1** registra los datos de la biodegradabilidad para las películas de biopolímeros. Es de notar que, al sexto día, los biopolímeros formados por almidón a pH 5.0, almidón + CNSL (0.125 g) a valores de pH 3.0 y 5.0, almidón + CNSL (0.250 g) a pH = 5.0, y almidón + CNSL (0.500 g) a pH = 7.0, mostraron un proceso de biodegradación muy acelerado, a tal punto de degradarse por completo.

Tabla 3.1. Porcentaje de degradación del biopolímero a base de almidón y extracto CNSL.

CNSL en el biopolímero (g)	pH	Proceso de biodegradabilidad (días)					
		0	3	6	9	12	15
0.000	3,0	0,0	73,0	90,8	98,2	100,0	
	5,0	0,0	50,5	100,0			
	7,0	0,0	64,0	97,5	100,0		
	9,0	0,0	54,3	96,0	100,0		
	10,0	0,0	49,5	90,3	99,6	100,0	
	12,0	0,0	20,5	90,5	98,0	100,0	
0.125	3,0	0,0	26,1	100,0			
	5,0	0,0	35,2	100,0			
	7,0	0,0	69,5	94,7	99,5	100,0	
	9,0	0,0	51,2	78,8	89,7	100,0	
	10,0	0,0	76,1	92,8	100,0		
	12,0	0,0	62,8	87,9	94,5	100,0	
0.250	3,0	0,0	56,9	94,8	100,0		
	5,0	0,0	44,0	100,0			
	7,0	0,0	33,7	96,5	100,0		
	9,0	0,0	49,1	79,2	95,2	100,0	
	10,0	0,0	70,0	93,0	98,4	100,0	
	12,0	0,0	55,2	81,9	92,6	100,0	
0.500	3,0	0,0	55,6	95,3	100,0		
	5,0	0,0	33,3	96,5	99,8	100,0	
	7,0	0,0	47,3	100,0			
	9,0	0,0	59,2	91,1	99,1	100,0	
	10,0	0,0	51,4	87,3	98,2	100,0	
	12,0	0,0	50,3	76,0	79,2	89,3	100,0

En cambio, los biopolímeros a base de almidón (0.000 g) a pH 7.0 y 9.0, almidón + CNSL (0.125 g) a pH = 10.0, almidón + CNSL (0.250 g) a pH 3.0 y 7.0, y almidón + CNSL (0.500 g) a pH = 3.0, revelaron un proceso de biodegradación moderado, puesto que se degradaron por completo al noveno día.

El resto de los biopolímeros se degradaron aún más lento respecto a los mencionados, esto es, al doceavo día, con excepción del biopolímero compuesto de almidón + CNSL (0.500 g) a pH = 12.0, ya que este último se degradó al quinceavo día. Es importante anotar que a medida que aumenta la cantidad del extracto CNSL en el biopolímero, el tiempo de degradación es más prolongado, o bien, existe una mejora significativa de la biodegradabilidad del biocompuesto respecto a aquellos en donde este último está ausente. De esta manera, las propiedades fenólicas del extracto CNSL son aceptables al momento de elaborar dichos polímeros, tal como se había predicho. Esto se observa, como una guía, en la **Figura 3.6**, para los biopolímeros con mayor cantidad de extracto de CNSL.

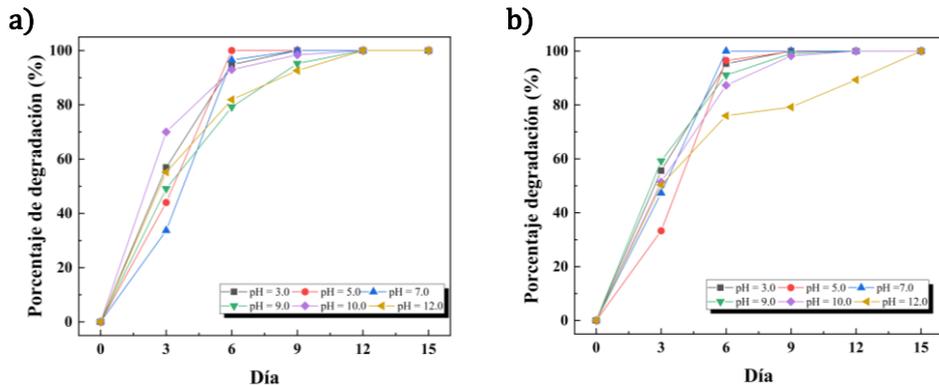


Figura 3.6. Evaluación de la degradación del biopolímero de almidón y el extracto de la cáscara de la nuez del anacardo, según la cantidad de extracto, en función del pH. a) 0,250 g CNSL, y b) 0,500 g CNSL.

3.4.1.- Biodegradabilidad de polímeros basados en almidones, celulosa y proteínas.

La aplicación de las pruebas de biodegradabilidad de almidones ha hecho que se busque de manera continua la mejora de las propiedades del almidón, realizando modificaciones, ya sea de índole estructural o superficial, haciendo que la formación de compuestos durante las reacciones de degradación sea más eficiente (Jiang et al., 2020; Yu et al., 2021). De igual forma, para la degradación de la celulosa, se involucran diferentes enzimas para llevar a cabo tal degradación (Béguin & Aubert, 1994).

En el caso de las proteínas, los mecanismos de degradación se dan de manera similar a los polímeros basados en carbohidratos, teniendo en cuenta las enzimas utilizadas, su concentración, así como las condiciones del medio que se usa para la biodegradabilidad (Tachibana et al., 2021).

3.5.- Aplicación de polímeros y polímeros compuestos eco-amigables.

3.5.1.- Polímeros eco-amigables comerciales.

Actualmente, se están usando polímeros ecoamigables, y que tienen valor comercial (Rosenboom et al., 2022). El sector de cosméticos ha incursionado con la inclusión de estos materiales en la mejora de sus productos. La celulosa, el cual es el polímero más renovable, tiene aplicabilidad en medicina: desde su uso como estabilizante en las células que producen insulina, hasta medio de transporte en el tratamiento de algunos tipos de cáncer (Dávalos Campos et al., 2023). El presente y futuro de los materiales poliméricos debe estar basado también en la economía circular (Rosenboom et al., 2022).

3.5.2.- La agroindustria y los polímeros ecoamigables.

Dado el auge de los polímeros ecoamigables, y su inclusión en diversas áreas de la industria, también es necesario el afianzamiento de estos materiales a nivel agroindustrial. La producción en masa de polímeros

ecoamigables a partir de los residuos agroindustriales, podría ayudar significativamente a la disminución de contaminantes, así como el desarrollo de actividades económicas menos lesivas al medio ambiente (Rosenboom et al., 2022). De igual forma, el uso de materiales poliméricos ecoamigables para su aplicación, por ejemplo, en recubrimiento de alimentos, ha sido una excelente alternativa al uso de plásticos de un solo uso (Moustafa et al., 2019).

3.5.3.- Perspectivas sobre polímeros eco-amigables.

Desde el punto de vista ambiental, con los polímeros ecoamigables se encuentra una solución al problema del uso excesivo de los plásticos de un solo uso, así como la disminución de la huella de carbono. Desde el punto de vista industrial, estos materiales han abierto posibilidades con respecto a su aplicabilidad y que puedan ser usados de manera general, en diversos campos. De igual forma, su implementación progresiva ayudaría al aprovechamiento de los recursos renovables, y propender al crecimiento económico, sin generar más daño al medio ambiente.

3.6.- Polímeros ecoamigables y nanotecnología.

3.6.1.- Generalidades.

Se ha implementado en los materiales biopoliméricos ecoamigables, la disminución del tamaño promedio de las partículas, y así incursionar en la nanotecnología. Esto ha generado expectativa sobre sus posibles aplicaciones. Dependiendo de las condiciones de síntesis, así como su posible aplicación, el auge de estos materiales hace que cada vez más investigadores evalúen las posibilidades de síntesis y uso en la vida diaria. El caso más estudiado es el empaquetado de alimentos usando materiales poliméricos ecoamigables, las cuales su tamaño promedio disminuyó notablemente, y con esto, se mejoró significativamente la estabilidad mecánica del polímero (Moustafa et al., 2019).

3.6.2.- Aplicaciones y ejemplos de desarrollos.

En la mejora de la resistencia de las bolsas plásticas, se elaboraron de películas de almidón/tereftalato polibutilenadipato, el cual se modificó con la introducción de nanopartículas de óxido de zinc. Esta inclusión, mejoró significativamente las propiedades mecánicas al biopolímero, cuando el ZnO está presente al 1 % p/p (Yi et al., 2020). En aplicaciones relacionadas con el almacenamiento de energía, se han preparado celdas solares basadas en polímeros, se viene trabajando en la modificación estructural de éstos, teniendo en cuenta los solventes y su posibilidad de reemplazarlos por compuestos químicos más amigables con el medio ambiente, con el fin de incrementar la eficiencia de conversión, la cual es de 17 % actualmente (Lee et al., 2020). En la industria cementera, se han desarrollado biopolímeros para aplicación de mejora de las propiedades del cemento. Con este objetivo, se preparó celulosa en forma de cristales, los cuales se añadieron a una mezcla de cemento Portland y arena. Esta inclusión hizo que la resistencia mecánica del material incrementara significativamente, con respecto a la mezcla original de cemento y arena (Barnat-Hunek et al., 2019).

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Sucre, la Universidad de Córdoba, y la Universidad del Valle, así como al Departamento Nacional de Planeación de Colombia, específicamente, al Sistema General de Regalías (SGR) por la financiación recibida a través del proyecto BPIN 2020000100027.

Bibliografía

- Arrieta, A. A.; Ducuara, J. A.; Combatt, E. M. **2022**. Bio-Based Electroactive Composite Biopolymer Films From Cassava Starch / Anacardic Acid. *Rasayan Journal of Chemistry*, 2022(Special Issue), 103–109. DOI: 10.31788/RJC.2022.1558189
- Arshad, M.; Zubair, M.; Ullah, A. **2020**. Miscibility, properties, and biodegradability of chitin and chitosan. En: *Handbook of Chitin and Chitosan: Volume 1: Preparation and Properties*, INC. DOI: 10.1016/B978-0-12-817970-3.00012-2
- Bai, L.; Liu, L.; Esquivel, M.; Tardy, B. L.; Huan, S.; Niu, X.; Liu, S.; Yang, G.; Fan, Y.; Rojas, O. J. **2022**. Nanochitin: Chemistry, Structure, Assembly, and Applications. *Chemical Reviews*, 122(13), 11604–11674. DOI: 10.1021/acs.chemrev.2c00125
- Barnat-Hunek, D.; Grzegorzczak-Frańczak, M.; Szymańska-Chargot, M.; Łagód, G. **2019**. Effect of eco-friendly cellulose nanocrystals on physical properties of cement mortars. *Polymers*, 11(12), 2088. DOI: 10.3390/polym11122088
- Béguin, P.; Aubert, J.-P. **1994**. Crystalline region. *FEMS Microbiology Reviews*, 13, 25–58.
- Carreño Pineda, L.; Caicedo Mesa, L.; Martínez Riascos, C. **2012**. Ingeniería y Ciencia Técnicas de fermentación y aplicaciones de la celulosa bacteriana: una revisión. *Ingeniería y Ciencia*, 8(16), 307–335.
- Da Silva, A.L.; Da Silva, L.R.R.; De Andrade Camargo, I.; Da Silva Agostini, D.L.; Dos Santos Rosa, D.; De Oliveira, D.L.V.; Fachine, P.B.A.; Mazzetto, S.E. **2016**. Cardanol-based thermoset plastic reinforced by sponge gourd fibers (*Luffa cylindrica*). *Polímeros*, 26(1), 21–29. DOI: 10.1590/0104-1428.2276

Dávalos Campos, R.L.; Cepeda Tovar, V.A.; Farías Cepeda, L.; Rubio Ríos, A.; Rosales Marines, L.; Medrano Enríquez, F.J. **2023**. Polímeros sustentables con aplicaciones comerciales e industriales. *CienciAcierta*, 73, 264–287.

Ghanbarzadeh, B.; Almasi, H. **2013**. Biodegradable Polymers. En: *Biodegradation - Life of Science*. InTechOpen. DOI: 10.5772/56230

Goswami, P.; O’Haire, T. **2016**. Developments in the use of green (biodegradable), recycled and biopolymer materials in technical nonwovens. En: *Advances in Technical Nonwovens*. Elsevier Ltd., 97-114 DOI: 10.1016/B978-0-08-100575-0.00003-6

He, A.; Li, S.; Ma, J.; Yang, Z. **2014**. Environmental friendly polymer materials for sustainable development. *International Journal of Polymer Science*, 2–4. DOI: 10.1155/2014/107028

Jiang, T.; Duan, Q.; Zhu, J.; Liu, H.; Yu, L. **2020**. Starch-based biodegradable materials: Challenges and opportunities. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3, 8–18. DOI: 10.1016/j.aiepr.2019.11.003

Katahira, R.; Elder, T. J.; Beckham, G. T. **2018**. A Brief Introduction to Lignin Structure. En: *Lignin Valorization: Emerging Approaches*. The Royal Society of Chemistry. 528. DOI: 10.1039/9781788010351-00001

Lee, S.; Jeong, D.; Kim, C.; Lee, C.; Kang, H.; Woo, H. Y.; Kim, B. J. **2020**. Eco-friendly polymer solar cells: Advances in green-solvent processing and material design. *ACS Nano*, 14(11), 14493–14527. DOI: 10.1021/acsnano.0c07488

Li, L.; Geng, K.; Liu, D.; Song, H.; Li, H. **2020**. Progress in Organic Coatings Relationship between starch liquefaction behavior and properties of polymer coated urea from liquefied starch. *Progress in Organic Coatings*, 147(April), 105759. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.105759

- Majaron, V.F.; da Silva, M.G.; Bortoletto-Santos, R.; Klaic, R.; Giroto, A.; Guimarães, G.G.F.; Polito, W.L.; Farinas, C.S.; Ribeiro, C. **2020**. Synergy between castor oil polyurethane/starch polymer coating and local acidification by *A. niger* for increasing the efficiency of nitrogen fertilization using urea granules. *Industrial Crops and Products*, 154, 112717. DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.112717
- Mohanty, A. K.; Wu, F.; Mincheva, R.; Hakkarainen, M.; Raquez, J.M.; Mielewski, D.F.; Narayan, R.; Netravali, A.N.; Misra, M. **2022**. Sustainable polymers. *Nature Reviews Methods Primers*, 2(1), 46. DOI: 10.1038/s43586-022-00124-8
- Moustafa, H.; Youssef, A.M.; Darwish, N.A.; Abou-Kandil, A.I. **2019**. Eco-friendly polymer composites for green packaging: Future vision and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 172, 16–25. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.05.048
- Nair, N.R.; Sekhar, V.C.; Nampoothiri, K.M.; Pandey, A. **2017**. Biodegradation of Biopolymers. En: *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Production, Isolation and Purification of Industrial Products*. Elsevier B.V. DOI: 10.1016/B978-0-444-63662-1.00032-4
- Pires, J.R.A.; Souza, V.G.L.; Fuciños, P.; Pastrana, L.; Fernando, A.L. **2022**. Methodologies to Assess the Biodegradability of Bio-Based Polymers - Current Knowledge and Existing Gaps. *Polymers*, 14(7), 1–24. DOI: 10.3390/polym14071359
- Rosenboom, J.G.; Langer, R.; Traverso, G. **2022**. Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews Materials*, 7(2), 117–137. DOI: 10.1038/s41578-021-00407-8
- Saini, R.D. **2017**. Biodegradable Polymers. *International Journal of Applied Chemistry*, 13(2), 179–196.
- Salimi, M.; Motamedi, E.; Motesharezedeh, B.; Hosseini, H.M.; Alikhani, H.A. **2020**. Starch-g-poly(acrylic acid-co-acrylamide) composites reinforced

with natural char nanoparticles toward environmentally benign slow-release urea fertilizers. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(3), 103765. DOI: 10.1016/j.jece.2020.103765

Samir, A.; Ashour, F.H.; Hakim, A.A.A.; Bassyouni, M. **2022**. Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications. *Npj Materials Degradation*, 6(1), 68. DOI: 10.1038/s41529-022-00277-7

Tachibana, Y.; Darbe, S.; Hayashi, S.; Kudasheva, A.; Misawa, H.; Shibata, Y.; Kasuya, K. **2021**. Environmental biodegradability of recombinant structural protein. *Scientific Reports*, 11(1), 1–10. DOI: 10.1038/s41598-020-80114-6

Udayakumar Prabu, G.; Muthusamy, S.; Selvaganesh, B.; Sivarajasekar, N.; Rambabu, K.; Sivamani, S.; Sivakumar, N.; Maran, J. P.; Hosseini-Bandegharai, A. **2021**. Ecofriendly biopolymers and composites: Preparation and their applications in water-treatment. *Biotechnology Advances*, 52, 107815. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2021.107815

Wang, Z.; Ganewatta, M.S.; Tang, C. **2020**. Sustainable polymers from biomass: Bridging chemistry with materials and processing. *Progress in Polymer Science*, 101, 101197. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2019.101197

Yi, T.; Qi, M.; Mo, Q.; Huang, L.; Zhao, H.; Liu, D.; Xu, H.; Huang, C.; Wang, S.; Liu, Y. **2020**. Ecofriendly preparation and characterization of a cassava starch/polybutylene adipate terephthalate film. *Processes*, 8(3), 329. DOI: 10.3390/pr8030329

Yu, X.; Chen, L.; Jin, Z.; Jiao, A. **2021**. Research progress of starch-based biodegradable materials: a review. *Journal of Materials Science*, 56(19), 11187–11208. DOI: 10.1007/s10853-021-06063-1

Zhao, L.; Zhang, J.; Zhao, D.; Jia, L.; Qin, B.; Cao, X.; Zang, L.; Lu, F.; Liu, F. **2022**. Biological degradation of lignin: A critical review on progress and

perspectives. *Industrial Crops and Products*, 188, 115715. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.115715

Zoungranan, Y.; Lynda, E.; Dobi-Brice, K.K.; Tchirioua, E.; Bakary, C.; Yannick, D.D. **2020**. Influence of natural factors on the biodegradation of simple and composite bioplastics based on cassava starch and corn starch. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104396. DOI: 10.1016/j.jece.2020.104396

Capítulo 4.

Aspectos nutricionales del cultivo de Yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y Marañón (*Anacardium occidentale* L.)

4.1.- Introducción.

La nutrición mineral es un eje principal en la producción de los cultivos, y de esta práctica depende el resultado final en la obtención del rendimiento en los cultivos de Yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y marañón (*Anacardium occidentale* L.). Estos cultivos son nativos de América del Sur y América tropical, con sitios de orígenes y adaptabilidad de la zona central de Brasil principalmente (FAO, 2021; Orduz y Rodríguez, 2022). Además, son especies que tienen alto potencial de rendimiento, pero que dependen principalmente de la cantidad y disponibilidad de los elementos químicos nutricionales en el suelo (Marschner, 2012). Por consiguiente, se hace necesario contribuir al conocimiento general de los principales aspectos que abarcan el amplio concepto de manejar la nutrición de un cultivo. Debido a esta adaptabilidad a diferentes condiciones agroclimáticas los convierte en pilares fundamentales en la industria mundial, la demanda del marañón ha crecido más del 7 % anual y su producción ha aumentado en un 6 % con una totalidad de 786.266 toneladas durante los periodos de 2019 a 2020 utilizándose gran parte su fruto, nuez y hojas (Dendena y Corsi, 2014), igual

Cite as: Á.Á. Arrieta, E.M. Combatt, M. Palencia. 2024. Aspectos nutricionales del cultivo de Yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y Marañón (*Anacardium occidentale* L.). En: Á.Á. Arrieta, E.M. Combatt, M. Palencia. Materiales poliméricos funcionales basados en productos de la agroindustria: Yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y Marañón (*Anacardium occidentale* L.). MT-Pallantia Publisher s.a.s., Cali - Colombia. pp. 105-166. DOI: 10.34294/b.001.c4.2024.03.

ocurre con la producción de yuca industrial, donde la raíz de yuca es utilizada ampliamente para el consumo humano y animal, oscilando producciones mayores a los 2.000.000 de toneladas con aumento de un 7,6 % para el mismo periodo 2020 (Rivera et al., 2021). Sin embargo, el manejo de estos dos cultivos depende de la proporción de elementos químicos nutricionales, que hay que aplicar en el momento oportuno para la obtención de rendimientos esperados (Benincasa, 2003). Entre los principales elementos químicos esenciales se encuentran el nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn) y boro (B).

El cultivo de yuca es ampliamente cultivado en las regiones tropicales (Olsen y Schaal, 2001), como la costa norte de Colombia y otras zonas subtropicales por ser un cultivo de gran adaptabilidad. Así mismo, por su facilidad de producción, diversidad y aceptación en el mercado, esta especie ha logrado un sitio en la canasta familiar para las poblaciones rurales y urbanas de muchos departamentos de Colombia. En este cultivo el principal órgano de interés para consumo y comercio industrial es la raíz, que se caracteriza por ser rica en carbohidratos y una de las mejores fuentes de energía (FIDAR, 2000).

En adición, en muchas poblaciones en diferentes regiones de Centro y Sur América, esta especie es de gran importancia, debido a que este cultivo es fuente de producción y alimentación en las poblaciones establecidas en regiones que poseen suelos pobres. Sin embargo, su adaptabilidad genética y fisiológica es capaz de absorber eficientemente agua y nutrientes en suelos químicamente pobres, logrando obtener rendimientos considerables para la subsistencia de los pobladores de estos lugares. Además, esta especie es fácil de adaptar a suelos con poca humedad, presenta tolerancia a plagas y enfermedades, y su manejo no genera grandes costos de producción. Por otra parte, este cultivo busca responder a las necesidades alimentarias e industriales, por lo que, de acuerdo con Fischer et al. (2014), establece incrementar en 1,3 % la producción de estos cultivos para fin de mejorar y aumentar la productividad de las regiones en relación con la producción del tubérculo, sin embargo, las hojas se utilizan como alternativa y complemento nutricional de este cultivo, pero la concentración de contenidos cianhídricos

hace que se convierta en un reto para la investigación y los programas de mejoramiento lograr que estos contenidos puedan eliminarse fácilmente y se pueda aprovechar subproductos a partir de la hoja de yuca sin que afecte los valores nutricionales, a pesar de ello, en varios continentes como África y Asia las hojas se utilizan después de un proceso de hervido para su consumo alimentario e industrial, gran parte de estos compuestos se eliminan (Díaz y López, 2021).

Por otro lado, el marañón es un cultivo nativo en regiones de América del Sur, siendo la mayor actividad económica en los países tropicales y subtropicales por su polivalencia en el aprovechamiento del fruto para la obtención de diversos productos industriales y medicinales, y su principal producto de aprovechamiento industrial es el fruto (nuez), que posee un alto contenido de proteínas y la cáscara posee un líquido que es aprovechado para la creación de insecticidas, impermeabilizantes y barnices (Oliveira y De Albuquerque, 2005; Dendena y Corsi, 2014). En Colombia muchas familias cultivan el marañón en forma de huertas familiares, sin ningún tipo de tecnologías para el crecimiento, simplemente, toman los recursos naturales del suelo. Adicional a esto, el marañón se puede adaptar fácilmente en suelos con poca nutrición y en condiciones de acidez, aunque sus condiciones óptimas sean de suelos profundos, con buen drenaje, sin pedregrosidad, contenido de bases por encima del 35 % y pH que oscilen entre 5.2 a 7.0 con buenos contenidos de materia orgánica superior a 1,4 % (Kenji y Araujo, 2016). Además, por estas características de adaptación, este cultivo es utilizado en gran medida en el área de reforestación en zonas costeras de África, Asia, India y América tropical (Salam y Peter, 2010).

Por esta razón, el marañón es fuente de estudio para tecnologías de producción mejorando la siembra, fertilización y todo lo referente al manejo del cultivo para obtener el mayor aprovechamiento posible, así mismo, este cultivo en Colombia necesita mejorar la escasa tecnificación con el objetivo de disminuir la brecha de las aplicaciones en prácticas de manejo agronómico y procesos de mecanización de la postcosecha para la obtención de la almendra y los subproductos del cultivo de marañón que principalmente son los de consumo fresco y la agroindustria (Das y Arora, 2017). Debido a esto, este capítulo del libro presenta aportes técnico-

científicos de diversas investigaciones realizadas para el cultivo de yuca y marañón en el sector agrícola enmarcando principalmente lo referente a la nutrición de estos cultivos, pasando por las descripciones fisiológicas de las plantas, formas de obtención de los nutrientes y los elementos fundamentales para cumplir con los ciclos de producción. Además, se involucran investigaciones que hacen aportes para entender la nutrición de estos cultivos. Se espera que este capítulo sea de utilidad principalmente para investigadores, productores, asistentes técnicos, y demás personas que quieran conocer generalidades para el manejo agronómico del cultivo de yuca y marañón.

4.2.- Cultivo de yuca (*Manihot esculenta* Crantz).

Desde hace muchos años el cultivo de yuca es considerado un alimento importante por su amplia utilización para el consumo humano y animal, ya que este cultivo es aprovechable en su totalidad (el tallo como semilla sexual, hojas para consumo humano y raíz) pero su principal órgano de interés es la raíz, aunque hoy en día ha tomado mayor importancia socioeconómica a nivel mundial, debido al trabajo de las agroindustrias en la transformación de la materia prima, como el almidón para usos en diferentes industriales (Aristizábal y Sánchez, 2007). Además, se estima que este tubérculo posee un alto valor nutritivo para mitigar la seguridad alimentaria (Latif y Müller, 2015), debido a que sus contenidos nutricionales de proteína, minerales, almidón y fuentes de energía completan un valor importante para su consumo, constituyéndose como uno de los alimentos con mayor aporte de caloría a la población humana y animal, y de manera directa por su adaptabilidad responde a las necesidades alimentarias y nutricionales que se puedan generar por el incremento del cambio climático según Henry (2019). Asimismo, de los cultivos tropicales, la yuca es el cultivo de raíces más ampliamente distribuido y cultivado en diferentes partes del mundo, y se considera como el tercer alimento más importante en los trópicos, debido a que sus raíces son ricas en almidón y son una fuente de alimento valiosa (ver Figura 4.1A) (Latif y Müller, 2015), especialmente en zonas donde las deficiencias y la desnutrición es muy extendida. Además, es importante en aquellas áreas donde el suministro de alimentos está constantemente limitado por las condiciones edafoclimáticas, y este cultivo tiene la capacidad

para desarrollarse en condiciones no favorables con relación a otros cultivos alimentarios (Gbadegesin et al., 2008). Por lo cual, en zonas donde el cultivo de yuca presenta buen crecimiento en condiciones óptimas, se pueden utilizar además de las raíces, las hojas como productos alimentarios e industriales aprovechando la máxima productividad del cultivo (ver **Figura 4.1B**) (Latif y Müller, 2015).



Figura 4.1. Establecimiento del cultivo de yuca (izquierda) y producción de tubérculos, Clon 1433-4 en Corozal, Sucre (derecha).

En el entorno productivo agrícola, esta especie al ser un cultivo tropical se adapta bien a ciertas condiciones agroecológicas como alta precipitación, suelos ácidos con bajo contenidos de elementos químicos nutricionales y alta saturación de aluminio intercambiable, lo que ha permitido que Colombia se ubique como el tercer productor de yuca de Latinoamérica, y este producto es el quinto a nivel agrícola con mayor volumen de producción después de la caña panelera, plátano, papa y arroz, según Parra (2019). En Colombia, se cultiva yuca para el consumo de mesa o "dulce" y materiales para la industria o "amarga", que son utilizadas para la producción de harinas, almidones y alimentos procesados. Además, los tipos de variedades cultivadas y condiciones agroclimáticas en diferentes zonas de Colombia se describen en la **Tabla 4.1**, teniendo en cuenta la investigación realizada por Cadavid (2011).

Tabla 4.1. Tipos de cultivares de yuca en diferentes zonas de Colombia (Cadavid, 2011).

Localidad	Condiciones agroclimáticas	Variedades	Usos
Caribe	Clima tropical entre semiárido y subhúmedo; altura de 0-300 m.s.n.m.; temperaturas >24 °C y precipitaciones entre 700 a 1.500 mm/año.	Venezolana, Corpoica, TAI, MTai, Caribeña, Belloti, Ropain, Sinuana, Reina	Industrial y Dulce
Eje cafetero	Trópico alto, altura de 1.300 a 2.000 m.s.n.m.; temperatura de 20-24 °C; precipitación de 1.500-2.500 mm/año.	Chirosa, Algodonosa, Panameña,	Dulce e Industrial
Orinoquía	Sabana de suelos ácidos, altura > 300 m.s.n.m. con clima unimodal con estación seca prolongada; temperatura >24 °C; humedad relativa alta; precipitación de 1.500 - 4.000 mm/año.	C. Melúa 31, Brasilera, Cebucan ICA, Vergara, La Roja	Doble propósito
Cauca	Trópico medio, altura de 800-1.200 m.s.n.m.; temperatura de 24-28 °C; humedad relativa alta; precipitación de 1.000 - 2.000 mm/año.	Verdecita, Mbra 12, Mper 183	Dulce e Industrial
Pacífico	Trópico bajo; precipitación > 3.500 mm/año; Altura <300 m.s.n.m.; humedad relativa alta.	Brasilera	Doble propósito

4.2.1.- Producción nacional.

Con relación al área de siembra y rendimiento del cultivo de yuca para uso industrial pasó de 3.724,9 a 10.919,05 ha con una producción de 59.278,7 a 176.588,34 toneladas (t) en los periodos de 2010 a 2019 en Colombia según [AGRONET \(2021\)](#). La región Caribe participa con el 48,12 % de la producción nacional y 54,17 % del área cosechada. El departamento de Córdoba aporta el 12,4 % con rendimientos no mayores a las 15 t/ha, la cual está por debajo del promedio nacional, mientras que los departamentos de Santander,

Arauca y Meta mantienen producciones mayores con 21, 18 y 17 t/ha, respectivamente (Parra, 2019). Debido a los bajos rendimientos, los investigadores están llevando a cabo planes de mejoramientos genéticos que contribuyen para que la especie se adapte mejor por sus características de rusticidad, bajos costos de producción y facilidad de propagación asexual, que la convierten en una alternativa para los productores de diferentes zonas de la región, ya que se puede establecer en zonas con escasez y exceso de agua, pendientes moderadas, suelos con baja fertilidad, lo cual, lo convierte en un cultivo potencial para las mejoras nutricionales de la población (Beovides et al., 2014).

4.2.2.- Elementos fundamentales de la fertilidad.

El cultivo de yuca se establece en cualquier tipo de suelo colombiano, se cultiva en suelos con orden alfisoles y vertisoles hasta oxisoles, aridisoles y/o inceptisoles, y las prácticas de preparación de terreno van de acuerdo con las características fisicoquímicas de cada suelo, aunque es un cultivo que tiene la capacidad de producirse en una gran gama de suelos, que abarcan suelos ácidos con bajo contenido nutricional, hasta suelos alcalinos con altos contenidos químicos. Sin embargo, en suelos ácidos para completar su ciclo y obtener altos rendimientos es necesario realizar aplicaciones de todos los elementos minerales como N, P, K, Ca, Mg y S; además de algunos microelementos como zinc, boro, manganeso, hierro (Zn, B, Mn, Fe), con los cuales se podría obtener resultados muy favorables para el productor (Cadavid, 2008). Por otra parte, en muchas zonas agrícolas de Colombia, se siembran cultivos en laderas, y en zonas de altas pendientes, y estos suelos presentan bajo potencial nutricional acompañado de un mal manejo agronómico por parte de los productores, generando baja productividad entre los pequeños y medianos productores (DANE, 2016). En estas áreas de bajo potencial nutricional, se deben tener en cuenta, las condiciones químicas de los suelos, y los requerimientos nutricionales de esta especie, para poder realizar una planificación de los elementos químicos a aplicar en forma de fertilizantes teniendo en cuenta las condiciones químicas de cada suelo independientemente y tener en cuenta que muchas veces es necesario aplicar enmiendas químicas para mejorar el entorno de crecimiento de las raíces. Cadavid (2011), indica que la fertilidad es muy importante para el

crecimiento de las plantas, y a su vez para determinar las concentraciones de cada elemento nutricional como P, S, K, y Ca entre otros, porque, las concentraciones de nutrientes dependen de la parte de la planta y estos contenidos pueden variar. Por ejemplo, los contenidos de Ca y Mg tienden a ser mayores en tallos y hojas, mientras que el P y K se encuentra en menor cantidad en hojas y aumenta sus concentraciones en tallos y raíces.

Por otra parte, en los suelos donde se puede producir este tipo de tubérculos presentan características fisicoquímicas con pH entre 4,8 a 7,1 en el rango de muy fuertemente ácido a levemente alcalino y los contenidos de materia orgánica depende de la ubicación geográfica donde se establezcan los cultivos de yuca, por ejemplo en la región Caribe, los contenidos de materia orgánica en los suelos son consideradas bajas, mientras en suelos de la región pacífica y zona del eje cafetero los porcentajes de materia orgánica son altos (Bello, 2021). Por lo tanto, dependiendo de los contenidos en los suelos, se debe realizar una recomendación para la aplicación de fertilizantes con el fin de lograr una mayor producción de forraje y de raíces. A continuación, en la **Tabla 4.2** se relacionan estudios químicos realizados en varios departamentos del país, donde se evidencian los contenidos nutricionales y la clase textural de los suelos.

Tabla 4.2. Características fisicoquímicas de algunos suelos para establecimiento de yuca a nivel nacional (López y Cadavid, 2015).

Departamento	Clase Textural*	pH	MO	K	Ca	Mg	Na	Al+H
		1:1	%	----- cmolc kg ⁻¹ de suelo -----				
Atlántico	A	6,2	0,6	0,06	1,67	1,00	0,17	-
Magdalena	A	6,1	0,2	0,05	0,87	0,28	0,13	-
Córdoba	ArA	4,8	2,8	0,5	0,30	0,20	-	2,20
Casanare	FA	5,5	0,8	0,46	3,76	1,21	1,09	0,09
Sucre	A	7,1	1,2	0,10	13,10	9,60	0,60	-
Valle	Far	6,3	1,4	0,45	8,33	5,56	0,22	-
Cauca	Ar	4,5	7,2	0,23	0,79	0,30	-	5,70
Quindío	FL	5,6	2,9	0,45	4,50	1,40	0,10	0,18

Departamento	Clase Textural*	P	S	Zn	B	Mn
		----- cmolc kg ⁻¹ de suelo ----				
Atlántico	Ar	4,2	-	-	-	-
Magdalena	A	8,3	-	-	-	-
Córdoba	ArA	3,0	-	1,00	0,20	-
Casanare	FA	47,0	15,0	6,60	0,03	41,0
Sucre	A	10,1	-	-	-	-
Valle	Far	40,2	42,0	4,08	0,35	-
Cauca	Ar	1,76	-	-	-	-
Quindío	FL	36,0	9,0	16,00	0,01	-

*A: Arenosa, ArA: Arcillo arenosa, FA: Franco arenosa, FAr: Franco arcillosa, Ar: Arcillosa, FL: Franco limosa.

En la región Caribe en los departamentos de Córdoba y Sucre, muchas áreas de suelos presentan características químicas favorables para el crecimiento del cultivo de yuca, con valores de pH de 5,1 a 6,6 (ver **Tabla 4.3**). Sin embargo, estos suelos presentan muy bajos contenidos nutricionales, que no son suficientes para suplir las necesidades o requerimientos nutricionales de este cultivo y alcanzar altos rendimientos. En la **Tabla 4.3** se observa que todas las variables químicas como la materia orgánica (aporte de nitrógeno), potasio, calcio, magnesio y fósforo se encuentran en niveles muy bajos, y estos son los macroelementos nutricionales de mayor absorción por parte de este cultivo.

Tabla 4.3. Características fisicoquímicas de diferentes suelos del departamento de Córdoba y Sucre para establecimiento de yuca.

Departamento	T *	pH	MO	K	Ca	Mg	Na	CICe
		1:1	%	----- cmolc kg ⁻¹ de suelo ----				
C. de Oro	A	5,9	1,01	0,09	1,73	0,48	-	2,3
Cereté	Far	6,6	3,1	0,48	13,2	7,26	-	21
Corozal	Far	6,0	2,80	0,26	17,8	5,90	0,30	-
Sincé	Far	5,6	1,56	0,11	7,82	2,11	-	10,1
Galeras	FA	5,1	0,83	0,13	2,08	1,69	0,14	5,74
Sincelejo	Far	6,4	0,96	0,28	17,1	7,56	0,66	25,6

Departamento	T*	P	S	Zn	B	Fe	Mn
		----- cmolc kg ⁻¹ de suelo -----					
C. de Oro	A	7,1	3,6	39	0,31	39,5	4,27
Cereté	Far	15,2	8,4	33	0,42	55,7	1,28
Corozal	Far	7,2	9,6	3,9	0,08	12,0	56,0
Sincé	Far	2,5	3,5	0,3	0,11	64	0,36
Galeras	FA	3,8	5,19	1,0	-	79,8	37,5
Sincelejo	Far	3,8	3,87	1,0	-	8,0	2,81

*Textura. A: arenosa, FA: franco arenoso, FAR: Franco arcillosa.

Los resultados expresados en el análisis de suelos determinan las deficiencias que limitarán rendimientos óptimos en el cultivo o la suficiencia química que reduciría la aplicación de fertilizantes disminuyendo los costos de producción. Acorde a esto, existen niveles críticos para el cultivo de yuca, dentro de los cuales en los niveles críticos bajos será necesario realizar mayores aplicaciones de nutrientes minerales para mejorar las condiciones nutricionales del cultivo. Con relación a esto se puede indicar a manera de ejemplo, que si los niveles óptimos de fósforo son 20 mg kg⁻¹, y el resultado del análisis de suelo el valor obtenido es de 5,0 mg kg⁻¹, entonces, se concluye que el fósforo es un elemento limitante en ese suelo, y es muy posible que se manifieste deficiencia de este nutriente en el cultivo como se muestra en la **Tabla 4.4**. Por lo anterior es necesario coleccionar muestras de suelos y enviarlas a los laboratorios especializados, para conocer el estado nutricional de estas muestras y poder realizar las aplicaciones de fertilizantes con criterio técnico y teniendo en cuenta los valores del análisis que se encuentren cercanos a los límites críticos de cada elemento, para obtener buenos rendimientos.

Tabla 4.4. Requerimientos mínimos de nutrientes para el cultivo de yuca (López, 2015 y Laekemariam, 2016).

pH 1:1	K ----- cmolc kg ⁻¹ de suelo -----	Ca	Mg -----	P --- mg kg ⁻¹ de suelo ---	S
4 - 8	0,1 - 0,17	0,25	0,12	7,0 - 10	8,0
5,1 - 6,1	0,3 - 1,2	1,9 - 5,4	0,6 - 1,8	1,2 - 4,3	8,6 - 24

N g kg ⁻¹	Mn ----- cmolc kg ⁻¹ de suelo -----	Zn -----	Fe -----	Al ----- % -----	Na -----
< 1,5	5,0	1,0	< 2,0	80,0	< 3,0
-	131	1,3 - 4,1	45 - 107	-	-

En la región Caribe la actividad productiva de este cultivo se encuentra en constante avance, pero algunas zonas están limitadas por condiciones de acidez del suelo y alta saturación de aluminio, encontrándose el pH en rangos de 4,80 a 6,33 con texturas arenosas y baja disponibilidad de nutrientes. Esto conlleva a que agricultores asocien el cultivo de yuca con algunos tipos de cultivos como maíz y ñame, los cuales mantienen una productividad baja a nivel local, regional y nacional (Combatt et al., 2017). Aunque, el cultivo de yuca tolera pH bajos, este cultivo tiene la habilidad para crecer en suelos con altos niveles de saturación de aluminio (tolerancia > 80 %), a pesar de que es muy sensible a la salinidad (EVA, 2022). De acuerdo con esto, lo recomendable es establecer el cultivo en condiciones óptimas, en suelos con buen drenaje, sin pendientes pronunciadas que puedan ser fácilmente erosionables, texturas con mayor contenido de arcilla o francas, con buena retención de humedad como se observa en la **Figura 4.2**, con el fin de que haya mayor volumen de raíces explorables para el desarrollo del cultivo (Ramírez y Jiménez, 2008).



Figura 4.2. Suelos de Córdoba (izquierda) y Sucre en producción de yuca (derecha).

La fertilización se hace de acuerdo con los requerimientos nutricionales del cultivo y estudio de suelo para conocer las limitantes que este puede presentar. Para ello es necesario realizar una serie de pautas que ayuden a obtener un buen diagnóstico, por lo cual este conjunto de actividades permite preservar el buen manejo de fertilidad de los suelos, sin que se pierda, mantenga o aumente a través del tiempo de las cuales se pueden destacar (Berrios et al., 2007):

- Determinar la densidad de siembra, el grado de tecnificación y el acceso al área a establecer.
- Realizar un análisis fisicoquímico de suelo y estudiar la topografía, historial de uso y condiciones climáticas del terreno.
- Conocer las características morfológicas del material vegetal, los requerimientos nutricionales y los niveles críticos de la misma.
- Establecer un plan de fertilización y/o labores de preparación de terreno de acuerdo con el resultado del análisis.
- Monitorear el cultivo durante todo su desarrollo para evitar ataques de ácaros, larvas, hongos o virus y realizar las labores agronómicas correspondientes.

4.2.3.- Requerimientos nutricionales para el cultivo de yuca.

Existen muchas alternativas tanto biológicas como químicas para recuperar, mantener o aumentar la fertilidad y productividad de suelos utilizados para el cultivo de yuca, a partir de los nutrientes extraídos por el cultivo y la fertilización del suelo, siendo esta práctica la de mayor impacto para el rendimiento del cultivo y condicionamiento del suelo (Ospina et al., 2002). En el cultivo de yuca, la fertilización es muy diversa, no sólo aumenta el rendimiento, sino que produce plantas más vigorosas con mayor área foliar, logrando que estas se ajusten a los procesos de crecimiento y desarrollo de la planta como en la absorción de los nutrientes requeridos en sus etapas fisiológicas (Parménides et al., 2015). Además, la absorción de nutrientes en las plantas es indicativo de la fertilidad del suelo y tiene relación directa con la tasa de crecimiento de estas, así como también de las modificaciones genéticas del cultivo, buscando que sean eficientes en la asimilación de cada uno de los elementos para obtener buenos rendimientos

a largo plazo (Sangakkara y Wijesinghe, 2014). Por lo tanto, al realizar aplicaciones de fertilizantes o enmiendas en suelos con bajo contenido de nutrientes, es notorio el crecimiento exponencial en las plantas, la aplicación de materiales orgánicos es importante para garantizar el contenido de agua en el suelo, absorber los nutrientes y a su vez demuestra un aumento significativo en la producción de raíces y suelos (Ikeh et al., 2023).

Este aumento notable en la ganancia de biomasa seca en la planta en condiciones de óptimas de fertilidad, se explica a través de la fenología de la planta durante su ciclo vegetativo. Por ejemplo, en la **Figura 4.3A** cuando no hay fertirrigación y solo las plantas absorben los nutrientes disponibles por el suelo, la mayor parte se acumulan en las raíces y tallos a partir de los seis meses en adelante hasta la cosecha, con una ganancia máxima de 1000 g/plantas en materia seca. Sin embargo, cuando la planta tiene las condiciones óptimas de nutrientes (ver **Figura 4.3B**), la acumulación de biomasa se presenta en etapas más tempranas, desde los 2 meses hasta cosecha principalmente en el órgano de importancia económica (raíz), se produce una ganancia mayor a los 1200 g/planta en raíz y esta fase los principales elementos químicos absorbidos y acumulados en materia seca son nitrógeno, potasio y fósforo (Howeler, 2018).

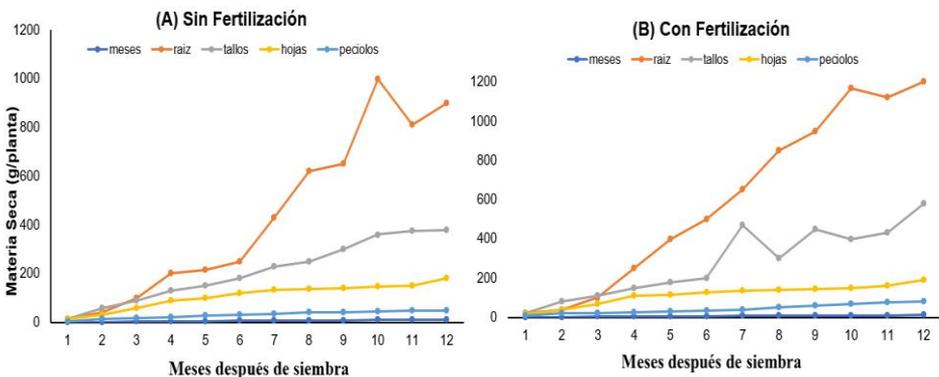


Figura 4.3. Distribución de materia seca en los órganos de la planta de yuca **A)** sin fertirrigación y con **B)** fertirrigación (Adaptado de Ospina et al., 2002).

4.2.3.1.- Fertilización inorgánica y orgánica del cultivo de yuca.

Teniendo en cuenta que este cultivo es un gran extractor de elementos del suelo, el plan de fertilización se realiza conociendo las cantidades de los requerimientos nutricionales. Según [Aguilar et al. \(2017\)](#), el orden de disponibilidad de nutrientes es de mayor a menor, por ejemplo: $K > N > Ca > Mg > P > S > Fe > Mn > Zn > Cu > B$. Con esto se demuestra que la eficiencia en la absorción de los nutrientes es de suma importancia, para conocer la necesidad del cultivo y aumentar la producción de biomasa. En algunos casos, cuando los suelos son muy fértiles o no han sido utilizados en agricultura, los productores no ven la necesidad de fertilizar, pero lo que se recomienda es realizar una fertilización de reposición para evitar su agotamiento a través del tiempo, apoyándose en prácticas de fertilización combinada (química + orgánico), que ayuden a mejorar y optimizar la absorción de los elementos disponibles en el suelo, conllevando a una asimilación rápida de nutrientes, sobre todo en suelos con bajos contenidos de minerales ([Combatt et al., 2017](#)). Por otra parte, en el cultivo de yuca se puede realizar análisis químicos del contenido foliar y determinar su composición nutricional. Por lo tanto, mediante un análisis foliar temprano en las hojas se puede conocer el estado nutricional de la planta y realizar correcciones en la fertilización del cultivo actual o de las próximas cosechas. En **Tabla 4.5** se puede observar los requerimientos en cultivos de yuca.

Tabla 4.5. Requerimientos nutricionales totales del cultivo de yuca en kilogramos por hectárea de los principales elementos nutricionales.

N	N	P	K	Ca	Mg
T ha ⁻¹	kg ha ⁻¹				
25	55,0	26,0	105,0	25,0	16,0
15	66,3	10,1	53,7	20,4	12,3
30	132,6	20,1	107,4	40,8	24,6
Extracción total de nutrientes de una planta					
-	174,0	72,0	200,0	100,0	42,0
-	132,6	20,1	107,4	-	-

*Suelos del municipio de Tuchín, Córdoba, Colombia. **Promedio general del cultivo de yuca a nivel nacional.

Por otra parte, según lo reportado por diferentes investigaciones realizadas por [DANE \(2016\)](#), se ha demostrado que el uso de fertilizantes comerciales en las zonas de influencia para el cultivo, manejan en promedio relaciones para nutrientes (kg ha^{-1}) que van desde 25 a 50 de N y P, 100 de K, 5 a 9 de Mg, 10 de S, 0,75 de Zn y 0,5 de B. Sin embargo, estas cantidades aplicadas se encuentran muy por debajo de los requerimientos establecidos, lo que conlleva a una gran extracción de estos nutrientes de los suelos, causando un gran deterioro químicos y desabastecimiento del potencial nutricional, lo que finalmente con el pasar de los años se traduce en bajo rendimientos en kilogramo por hectárea de sus tubérculos y además problemas de erosión y reducción en los contenidos de materia orgánica.

La yuca es un cultivo que responde a la aplicación de fertilizantes que contienen nitrógeno, fósforo y potasio, por esto es necesario mantener un adecuado nivel de los nutrientes del suelo para incrementar el rendimiento. De estos nutrientes, el K es considerado como elemento clave para aumentar el rendimiento de raíz y mejorar la calidad del tubérculo a través de la reducción de los glucósidos cianogénicos responsables de la amargura de la yuca, además de esto, mejora la influencia de la enzima del almidón sintetasa responsable de la producción de almidón ([Susan et al., 2005](#)). Sin embargo, si hay aplicaciones de altas cantidades de potasio que pueda exceder la dosis óptimas puede resultar en una disminución del contenido de almidón debido a la menor absorción de calcio y magnesio ([Fernandes et al., 2017](#)). Por otra parte, [Cadavid \(2011\)](#), menciona que el elemento de mayor importancia para producción de raíces es el N, debido a su absorción constante desde el enraizamiento hasta la fase final de acumulación de almidón. En **Tabla 4.6**, se observan los niveles de nutrientes contenidos en hojas de yuca de un cultivo en etapa de producción de tres a cuatro meses.

La aplicación de fertilizantes depende de los nutrientes, debido a que estos presentan diferentes características de movilidad y comportamiento en el suelo que son influenciados por la época, cantidad, dosis, fuentes y la fenología del cultivo, teniendo en cuenta que las aplicaciones deben realizarse durante todo el ciclo del cultivo de yuca para mantener la sostenibilidad de nutrición en el sistema productivo ([Martins et al., 2014](#)).

Tabla 4.6. Nutrientes en las hojas de cultivo de yuca en etapa de producción evaluadas de 3 a 4 meses (López, 2015).

Niveles críticos porcentuales en hoja de yuca					
Elemento	Deficiente	Bajo	Suficiente	Alto	Toxicidad
N	< 4,70	4,70 – 5,10	5,10 – 5,80	> 5,80	-
P	< 0,30	0,30 – 0,36	0,36 – 0,50	> 0,50	-
K	< 1,00	1,00 – 1,30	1,30 – 2,00	> 2,00	-
Ca	< 0,65	0,65 – 0,75	0,75 – 0,85	> 0,85	-
Mg	< 0,27	0,27 – 0,29	0,29 – 0,31	> 0,31	-
S	< 0,24	0,24 – 0,26	0,26 – 0,30	> 0,30	-
Niveles críticos en hoja de yuca (mg kg ⁻¹)					
Elemento	Deficiente	Bajo	Suficiente	Alto	Toxicidad
B	< 20	20 – 30	30 – 60	60 – 100	> 100
Cu	< 5	5,0 – 6,0	-	-	> 15
Fe	< 100	100 – 200	120 – 140	140 – 200	> 200
Mn	< 45	45 – 50	50 – 120	120 – 250	> 250
Zn	< 25	25 – 30	30 – 60	60 – 120	> 120

De esta manera [Cadavid \(2011\)](#), hace énfasis en que la aplicación de nutrientes debe realizarse alrededor del tallo en los primeros 20 cm, en las primeras épocas de aplicación que se han planificado y a 50 cm durante el resto de crecimiento del cultivo (ver **Figura 4.4**). Además de las aplicaciones químicas al suelo, estas pueden ser complementadas con fuentes orgánicas o biológicas con el fin de mejorar la reutilización y el reciclaje de nutrientes que son bien conocidos e incluyen en la reutilización de desechos orgánicos, la reducción de los insumos y los beneficios del compostaje y la reducción en los costos de los fertilizantes. Además de las propiedades físicas del suelo como estructura, consistencia, aumentan el porcentaje de poros que son necesarios para mantener los elementos químicos en la producción de los cultivos ([Havlin y Heiniger, 2020](#); [Bolaños et al., 2021](#)). Además, [Combatt et al. \(2017\)](#), indican que la aplicación de biofertilizantes aporta altos contenidos de elementos nutricionales, al igual que los fertilizantes inorgánicos, mejorando la actividad biológica y microbiota del suelo, que permiten aumentar el porcentaje de materia orgánica y esto se refleja en el rendimiento del cultivo. Por otra parte, en estudio realizados por [Gosling et al. \(2006\)](#), encontraron que la variedad ICA-Costeña responde positivamente

a aplicaciones de abonos orgánicos en suelos de Córdoba, con un índice de cosecha de 74,6 % con tratamientos de 1,5 a 2,0 t ha⁻¹ de bocashi y 0,2 t ha⁻¹ de fertilizante comercial, lo que indica la importancia de aplicar combinaciones de fertilizantes químicos y orgánicos aumenta la absorción de nutrientes.



Figura 4.4. Forma de aplicación de fertilizantes para el cultivo de yuca.

Sin embargo, [Magaña et al. \(2020\)](#) menciona que estas aplicaciones de fertilizantes orgánicos y químicos solo se hacen en suelo muy degradados con muy poco contenido nutricional, dado que, no se verá diferencias marcadas en las propiedades de suelos con buenas condiciones, aunque es una alternativa para favorecer el incremento de rendimientos y sustentabilidad del sistema productivo ([Combatt et al., 2017](#)). La respuesta del cultivo de yuca al realizar este tipo de práctica agronómica muestra diferentes concentraciones en el follaje y la raíz fresca por tonelada producida, bajo las siguientes aplicaciones combinadas de: $(\text{NH}_4^+)_2\text{SO}_4$ (1200 kg ha⁻¹), bórax (10 kg ha⁻¹) como fertilización química y 2,500 kg ha⁻¹ de lombricompost como fertilización orgánica con aplicación a los 30 días después de la siembra, los resultados son más detallados en **Tabla 4.7**.

Tabla 4.7. Respuesta de cultivares de yuca al aplicar fertilizantes químicos y orgánicos en suelos de Norte de Santander, Colombia (López, 2015).

Cultivar	Producción de raíces y follaje fresco (t ha ⁻¹)			
	Abono químico		Abono orgánico	
	Follaje	Raíz	Follaje	Raíz
M Tai 8	8,1	37,1	11,8	40,8
CM-4843-1	9,8	39,1	12,4	43,8
CM-3306-4	8,6	26,6	10,2	23,9
CM-4365-3	10,9	32,0	11,9	34,9

Hay evidencias que la fertilización mineral es importante en la mejora de los nutrientes esenciales y es vital en la producción de raíces que tienen los cultivares de yuca, cuando se compara esta práctica con la aplicación de enmiendas orgánicas en términos de sostenibilidad. No obstante, el uso combinado de abonos orgánicos y fertilizantes de síntesis también son una forma efectiva de incrementar la absorción de elementos nutricionales (Lazcano et al., 2013; Omenda et al., 2019). Ballot et al. (2016) encontraron en la zona de sabana en la república centroafricana en el cultivo de yuca Gabón encontraron rendimientos de 40,02 t ha⁻¹ con la aplicación de 80, 40 y 120 kg ha⁻¹ de N, P y K. Sin embargo, Gougodo et al. (2023), con la aplicación combinada de 90, 30, 180 kg ha⁻¹ de N, P y K, más 3000 kg ha⁻¹ de estiércol de vaca encontraron rendimiento en la misma especie de cultivo un rendimiento de 50 t ha⁻¹.

4.2.3.2.- Síntomas de deficiencia y toxicidad de elementos nutricionales del cultivo de yuca.

El rendimiento del cultivo de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) es afectado por las condiciones de baja fertilidad de los suelos, especialmente en suelos ácidos o arenoso, donde la oferta química es limitada debido a la evolución del suelo o al poco aporte de los materiales que hacen parte de la fracción textural. Además de limitar los rendimientos, la baja fertilidad del suelo afecta aún más la composición nutricional de los cultivos, alterando su calidad nutricional. Por otra parte, en este cultivo al igual que otros cultivos

agrícolas, muchos nutrientes no se transportan fácilmente desde la raíz hasta las hojas, afectando el desarrollo normal y finalmente los rendimientos. De acuerdo con [Álvarez et al. \(2012\)](#), las deficiencias nutricionales en el cultivo de yuca han sido diagnosticados mediante síntomas de deficiencia y toxicidades en la planta, que son comprobadas con los análisis de suelos y estas se han estudiados en diferentes áreas productoras de yuca en muchos países del mundo. Por otra parte, en condiciones de suelos de bajo contenido nutricional, los nutrientes como el N y el K son los responsables de la adaptación de este cultivo en suelos ácidos ([Baduf, 2011](#)). [Barceló et al. \(2000\)](#) y [Melanby \(2013\)](#), explican que la deficiencia de N causa una disminución en la tasa de asimilación de CO₂, y la reducción en el rendimiento de las raíces de yuca está asociada a una deficiencia de K en los suelos ácidos, lo que ocasiona poca adaptabilidad del cultivo en suelos marginales. Consecuentemente es necesario conocer las funciones de los elementos nutricionales en las plantas, porque cada elemento cumple funciones específicas en los diferentes metabolismos que son responsables de mantener una óptima producción de raíces. En la **Tabla 4.8** se observan las diferentes sintomatologías que permite identificar la deficiencia o exceso de los nutrientes esenciales en el cultivo de yuca.

Tabla 4.8. Respuesta de cultivares de yuca al aplicar fertilizantes químicos y orgánicos en suelos de Norte de Santander, Colombia ([López, 2015](#)).

Elemento	Síntomas por deficiencia
Nitrógeno	Anomalía en el crecimiento de la planta, entrenudos cortos.
Fósforo	Amarillamiento parcial del follaje comenzando en las hojas inferiores y extendiéndose por toda la planta.
Potasio	Tallos delgados, lóbulos reducidos, las hojas inferiores se vuelven flácidas y necróticas de color amarillo – naranja, crecimiento reducido de la planta.
Calcio	Hojas de tamaño reducido con manchas púrpuras. Amarillamiento y necrosis en los ápices y márgenes de las hojas inferiores dependiendo el cultivar, tallos gruesos con entrenudos cortos.
Magnesio	Reducción en la formación de raíces y brotes. Hojas deformes y pequeñas, hojas jóvenes con clorosis y presentan deformación de los bordes.

Azufre	Clorosis intervenal o coloración amarilla en hojas bajas, poco desarrollo de altura de planta.
Boro	Amarillamiento uniforme de las hojas superiores.
Zinc	Planta de altura reducida, entrenudos cortos, deformación de hojas jóvenes pequeñas, reducción del desarrollo de raíces secundarias.
Hierro	Coloración amarilla intervenal o blanca en las hojas jóvenes. Las hojas se vuelven pequeñas, cloróticas en el punto de crecimiento. Clorosis uniforme de las hojas superiores y de los pecíolos, reducción del crecimiento de la planta. En suelos calcáreos, las hojas se vuelven blancas con clorosis en los bordes de las hojas jóvenes.
Manganeso	Clorosis intervenal de las hojas superiores o intermedias, reducción de altura de la planta, hojas jóvenes pequeñas, pero sin deformación.

Elemento	Síntomas por toxicidad
Aluminio	Reducción de la altura de la planta y el crecimiento de la raíz, amarillamiento de las hojas inferiores bajo condiciones severas.
Manganeso	Amarillamiento de las hojas inferiores con puntos púrpura, pardo o negruzco a lo largo de las nervaduras.
Boro	Manchado necrótico de las hojas inferiores en los bordes.
Salinidad	Solo se manifiesta en suelos salinos y/o alcalinos, amarillamiento uniforme en las hojas desde la parte inferior hasta el resto de la planta; los síntomas son muy similares a la deficiencia de hierro, notándose crecimiento deficiente en las plantas.

4.2.4.- Composición nutricional de la yuca.

4.2.4.1.- Fases fenológicas del cultivo de yuca.

De acuerdo con [Aguilar et al. \(2017\)](#), el cultivo de yuca consta de varias fases fenológicas durante sus doce meses de desarrollo, pero cada fase fenológica varía de acuerdo con la variedad sembrada. Desde la siembra hasta los cuarenta y cinco días generalmente, la semilla está en fase de enraizamiento, continua con la fase de engrosamiento hasta los seis meses y finalmente la planta se centra en la fase de acumulación en los tubérculos hasta la cosecha como se muestra en la **Figura 4.5**. Además, [Quirós y De Diego \(2006\)](#), indican que desde los seis meses en adelante la fase de llenado y

senescencia se caracteriza por una disminución en la biomasa aérea, debido a un menor crecimiento de la producción de tallos y hojas. Sin embargo, después de los 210 días después de siembra se reduce la producción de hojas, lo que acelera el proceso de senescencia de la planta e incrementa la translocación de fotoasimilados a las estructuras de reserva o raíces de almacenamiento. Fregene et al. (2000), sugieren que la selección de cultivares debe realizarse según la característica genética del material, debido a que la distribución de materia seca en los órganos de la planta estará más influenciada por su genoma que por las condiciones ambientales en las que se establezca la variedad. Además, las técnicas moleculares y estudio asistido por marcadores se pueden emplear para identificar factores genéticos involucrados en los procesos y productos de fotosíntesis, la calidad de raíz, contenido de almidón, deterioro postcosecha y localizar genes involucrados en la resistencia a enfermedades y pesticidas, uso eficiente de nutrientes, la floración y otros aspectos.

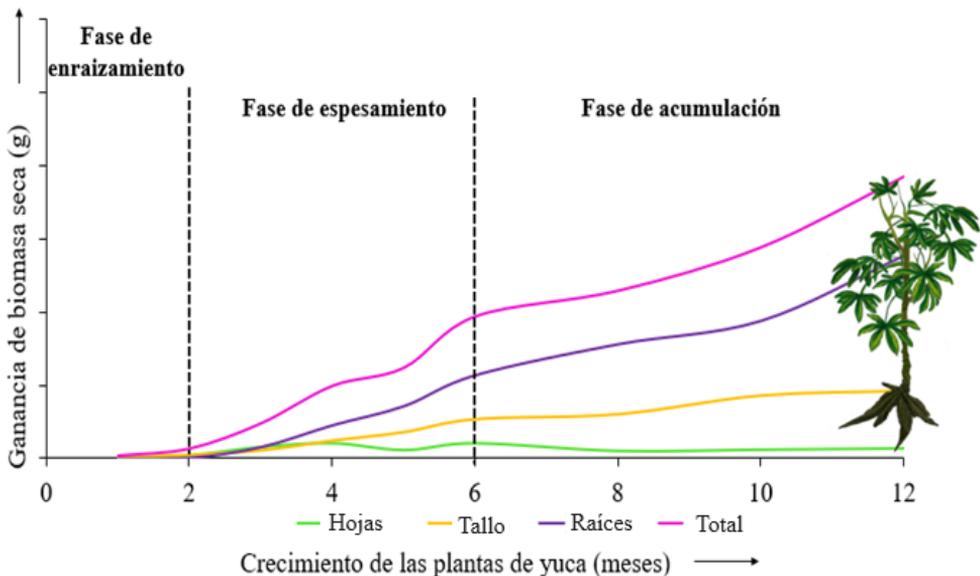


Figura 4.5. Ganancia de biomasa seca en cada órgano de la planta de yuca durante su fase fenológica.

4.2.4.2.- Contenidos nutricionales de la raíz.

La composición de nutrientes en los cultivos de yuca es diferente, ya que depende de la variedad, edad del cultivo, condiciones del suelo, aplicación de fertilizantes, clima, densidad de siembra, etc. Estos tubérculos contienen elementos indispensables que absorben durante su ciclo de crecimiento y desarrollo. Así mismo, la acumulación de materia seca de estos nutrientes en las raíces depende de las condiciones de manejo y ambientales donde se siembre el cultivo. Sin embargo, es importante conocer los contenidos nutricionales de las raíces, porque son la parte principal de la planta que se consume en las regiones y países donde se produce (Suárez y Mederos, 2011).

Autores como Gichuru (1991) y Ogedengbe (2012), indican que el cultivo de yuca tiene altos requerimientos de N y P, y estos son mayores que para otros cultivos. En estudios realizados en diversas variedades de yuca se encontraron resultados de concentraciones de 1,012 a 1,556 mg kg⁻¹ de P en la raíz expresada en materia seca, ya que este elemento es el principal formador de raíces y es el más requerido después N y K (Chávez et al., 2005), siendo inferior a los resultados de otras investigaciones, donde afirman que las concentraciones de fósforo total varían entre 6 a 152 mg. Resultados que demuestran que los contenidos de P van a depender principalmente de las condiciones de suelo donde se siembre el cultivo, asimismo, los requerimientos de Ca y K son similares a los de otros cultivos, y Salvador et al. (2014), encontraron para los contenidos de calcio los valores oscilan entre 19 a 176 mg y Chávez et al. (2005), encontraron contenidos (g/100 g de masa seca) de K entre 0,8 y 1,69. Además una alta concentración de K contribuye con rendimiento mayores de raíces, y también incrementa la resistencia del tizón bacteriano de la yuca (Burns et al., 2012).

Sin embargo, los nutrientes como K y N son los que más requiere la planta de forma general para tener un buen desarrollo de biomasa como se observa en **Tabla 4.9**.

Tabla 4.9. Extracción de nutrientes por tonelada de raíces frescas (Lorenzi et al.,1981; Mohankumar et al., 1996; Cadavid, 2011; Howeler, 2018; Polthaneey Wongpichet, 2017).

Extracción de nutrientes (kg ha ⁻¹)					
N	P	K	Ca	Mg	S
1,93 – 20,1	0,67 – 2,4	4,69 – 14,9	1,0 – 9,9	0,46 – 2,2	-
3,8	0,68	4,7	-	-	-
4,42	0,67	3,58	1,36	0,82	0,42
4,10	1,77	6,43	2,15	1,63	-
2,9 – 3,6	0,8 – 1,3	5,3 – 7,9	-	-	-

Este tubérculo o raíz contienen características de altos contenidos de almidón y fuentes de energía; el contenido de almidón oscila entre el 32 a 35 % en raíces frescas y de 80 a 90 % de raíces secas, y los contenidos de almidón contienen sustancias como la amilosa, que dentro de este contenido de porcentaje ocupa entre un 20 a 30 %, mientras que los contenidos de amilopectina se encuentran entre el 70 y 83 % dependiendo la variedad. Así mismo, la cantidad de sacarosa, glucosa, fructosa y maltosa suele ser baja en muchas variedades, pero en las variedades dulces más del 17 % del contenido de la raíz es sacarosa (Charles et al., 2005).

Por otra parte, los contenidos de humedad en harina de yuca oscilan entre el 9,2 a 12,3 %, y el contenido de fibra cruda difiere según la variedad y el estado de desarrollo de la raíz, resaltando que en raíces frescas se encuentran resultados de 1,8/100 g de fibra cruda, mientras que en harina de yuca este contenido no supera el 1,5 en raíz fresca y el 4 % en harina de yuca (Bayata, 2019). De Charles et al. (2005), encontraron que el contenido de lípidos varía entre 0,1 y 0,3 % de la masa fresca de raíces de yuca y está presente como no polar 45 % o glucolípidos 52 %. El contenido de proteína es bajo, del 1 al 3 % en base a materia seca y entre 0,4 y 1,5/100 g de peso fresco. Sin embargo, la yuca como alimento humano, ha sido criticada por su contenido proteico bajo y de mala calidad, pero la planta produce más peso de carbohidratos por unidad de superficie que otros cultivos alimentarios básicos en condiciones agroclimáticas comparables (Bayata, 2019).

Por otra parte, [McCallum et al. \(2017\)](#) exponen que los contenidos de minerales en este cultivo juegan un papel importante durante el ciclo de desarrollo fisiológico, y la falta de alguno de estos nutrientes puede provocar reacciones adversas al cultivo que pueden afectar la floración, fructificación entre otros factores que conlleven a que se tenga una baja productividad o bajos rendimientos. Según [Leonel \(2015\)](#) y [Ezui \(2016\)](#) el cultivo de yuca necesita unos niveles óptimos de elementos químicos en los suelos para poder mantener altos rendimientos, porque este cultivo requiere grandes cantidades de nutrientes, ya que tiene la capacidad de exportar de los suelos donde se cultiva alrededor de 1,27; 0,52; 3,02; 0,76; 0,60 y 0,36 kg t⁻¹ de raíces producidas de N, P, K, Ca, Mg y S, y 16,0; 1,51; 0,68; 2,23 y 2,43 g t⁻¹ de Fe, Mn, Cu, Zn y B, respectivamente. Por lo tanto, aunque este cultivo es considerado un cultivo que se puede sembrar en suelos de baja fertilidad, las plantas necesitan que sus requerimientos sean aportados con fertilizantes en niveles económicamente óptimos y en la **Tabla 4.10** se observan algunos contenidos de nutrientes determinados en las raíces.

Tabla 4.10. Concentración de diferentes parámetros químicos evaluados en la raíz de yuca.

Parámetro	Unidades (en 100 g)	Contenido	Referencias
Almidón	%	32 – 35	Suárez y Mederos, 2011
Humedad	%	5,9 – 6,3	Yacoub et al., 2018
Proteína	g	0,4 – 1,5	Charles et al., 2005
Cenizas	g	0,4 – 1,7	Bayata, 2019
Fibra	g	1,8	Bayata, 2019
Grasa	%	2,01 – 3,7	Lambebo, 2022
Calcio	mg	19 – 176	Salvador et al., 2014
Fósforo	mg	6 – 152	Bradbury, 1988
Potasio	mg	296,77	Lambebo, 2022
Magnesio	mg	57,74	Lambebo, 2022
Zinc	mg	14 – 41	Lambebo, 2022
Hierro	mg	14,28 – 16,65	Bradbury, 1988
Tiamina	mg	0,03 – 0,28	Bradbury, 1988
Vitamina A	µg	5,0 – 35,0	Lambebo, 2022
Ác. Ascórbico	mg	14,9 – 50	Salvador et al., 2014

En relación con los microelementos, también se han encontrados contenidos diferentes en los tubérculos. Para el Fe los contenidos expuestos por [Chávez et al. \(2005\)](#), en 20 cultivares de yuca, variaron entre 7,7 a 12,6 mg kg⁻¹ y [Lambebo \(2022\)](#), en estudios realizados en dos cultivares de yuca encontraron de 14,28 a 16,65 mg kg⁻¹ para Fe, mientras [Charles et al. \(2005\)](#), en un estudio en Mozambique - África, encontraron que el contenido de hierro de las raíces de yuca varió de 8 a 24 mg kg⁻¹, mientras que el zinc estuvo entre 3 y 140 mg kg⁻¹.

4.2.4.3.- Contenidos nutricionales en las hojas.

Las hojas del cultivo de yuca generalmente no se consumen en absoluto como alimento en los países de las Américas, pero en otros países las hojas de yuca se consideran un alimento para los pobres, y generalmente son utilizadas cuando escasean otras hojas de vegetales disponibles o durante la escasez de alimentos. En estos países donde se utiliza esta materia prima, las hojas de yuca se consumen como verdura en distintos niveles como fuente de proteínas y micronutrientes, según el cultivo y las recetas en al menos el 60% de los países del África y en algunos países asiáticos como Indonesia, Filipinas y Malasia ([Achidi et al., 2005](#); [Ngudi et al., 2003](#)). En estas regiones donde se consume como alimento se ha encontrado que las hojas aportan principalmente en base de materia seca un alto contenido de proteína cruda (17,7–38,1 %) dependiendo del cultivar y las condiciones climáticas ([Awoyinka et al., 1995](#)). También contiene altos contenidos de vitaminas B1, B2, C, carotenoides y minerales como fósforo, magnesio, potasio y calcio, pero bajos contenidos de manganeso, zinc, hierro, cobre y sodio, sin embargo, los contenidos de potasio, magnesio, fósforo, zinc y manganeso disminuye mientras que el calcio, sodio y hierro aumentan con la madurez de las hojas ([Ravindran and Ravindran, 1988](#)).

Por otra parte, las hojas de yuca son utilizadas para la alimentación animal en muchos países de Suramérica y estudios realizados por [Díaz y López \(2021\)](#), muestran que las hojas pueden ser aprovechadas para la alimentación de animales por su contenido nutricional, debido a que estas son ricas en micronutrientes, aunque estas pueden presentar compuestos cianogénicos, los cuales no son muy beneficiosos por la cantidad de ácido

cianhídrico que presenta. En la **Tabla 4.11** se describen los contenidos de humedad para las hojas de yuca los cuales se encuentran en rangos de concentración de 6,1 a 7,7 %, para proteína oscila entre 21,2 a 28,4 %, el valor de grasa cruda corresponde a 4,6 – 7,7 %, fibra cruda de 16,1 a 22,9 % de acuerdo con [Lambebo, \(2022\)](#).

Tabla 4.11. Contenido de nutrientes que están en hoja de yuca.

Parámetro	Unidades (en 100 g)	Contenido	Referencias
Almidón	%	19 – 24	Ospina et al. (2002)
Humedad	%	6,1 – 7,7	Lambebo (2022)
Proteína	%	21,2 – 28,4	Lambebo (2022)
Cenizas	%	7,9 – 8,7	Bujang and Jamil, (2016)
Fibra	%	16,1 – 22,9	Lambebo (2022)
Grasa	%	4,6 – 7,7	Lambebo (2022)
Calcio	mg	542 - 1182	Lambebo (2022)
Fósforo	mg	27 – 211	Bujang and Jamil, (2016)
Potasio	mg	1120 – 2234	Zekarias et al. (2019)
Magnesio	mg	260 – 370	Bujang and Jamil, (2016)
Zinc	mg	71 – 249	Lambebo, (2022)
Hierro	mg	0,4 – 8,3	Zekarias et al. (2019)
Tiamina	mg	0,06 – 0,31	Salvador et al. (2014)
Vitamina A	µg	8300 - 11800	Bradbury (1988)
Ác. Ascórbico	mg	60 – 370	Salvador et al. (2014)

Por otra parte, [Salvador et al. \(2014\)](#), encontraron que existe una relación directa entre la cantidad de carbohidratos que contiene la raíz y la cantidad de carbohidratos que contiene las hojas; los contenidos totales de carbohidratos en raíces de yuca oscilan con valores entre 25,7 a 35,7 g, mientras que en las hojas de yuca los contenidos son inferiores con valores de 7 a 18,3 g y estos carbohidratos en las hojas de yuca son principalmente almidón, con un contenido de amilosa que varía del 19 al 24 %. Además, de acuerdo con [Ospina et al. \(2002\)](#), las hojas de yuca contienen una mayor cantidad de proteínas, aminoácidos esenciales, carotenoides, vitaminas B1, B2 y C que las raíces, cantidades bajas de vitamina B, es decir, tiamina, riboflavina y niacina. En estudios realizados para determinar la composición de nutrientes en diferentes variedades de yuca ([Bujang y Jamil, 2016](#))

encontraron que la cantidad de ceniza obtenida fue de 7,9 a 8,7 % y determinaron en las hojas el elemento potasio presentó concentraciones están entre 2234 a 1120 mg en 100 g, seguido por el calcio de 1182 a 542 mg en 100 g. Así mismo, el contenido de hierro en las hojas de yuca osciló entre 284 y 93 mg kg⁻¹ y las concentraciones de zinc varían entre 47,8 y 27,0 mg kg⁻¹ (Burns et al., 2012). Además, las hojas extraen nutrientes de acuerdo con el siguiente orden de mayor a menor acumulación: K > Ca > Mg > Na > Fe > Zn (Lambebo, 2022).

4.2.4.4.- Concentraciones de cianuro en las hojas de yuca.

Las altas concentraciones que se pueden presentar de ácido cianhídrico en el cultivo de yuca conllevan a problemas para utilizar los órganos del cultivo en suplementos alimenticios para los animales. Este ácido se encuentra como cianoglucósidos de linamarina y lotaustralina que forman glucósidos cianogénicos a través de descomposiciones enzimáticas en los tejidos, los cuales son agentes de defensa contra ataques de animales y humanos (Gleadow y Woodrow, 2002). Una vez hidrolizados estos glucósidos cianogénicos liberan ácido hidrocínico, el cual puede ocasionar daños crónicos o incluso la muerte al ser consumidos. El contenido normal de cianoglucósidos es de 15 a 400 mg kg⁻¹ de peso húmedo en raíces frescas, aunque este contenido varía de 10 mg kg⁻¹ considerado bajo a 2000 mg kg⁻¹, considerado alto. Por otro lado, los autores sugieren que las hojas de yuca pueden alcanzar hasta los 1300 mg kg⁻¹ de cianuro en peso seco, mientras que el parénquima de la raíz podría llegar a alcanzar cantidades de 500 mg kg⁻¹ (Bayata, 2019).

Los productos transformados por las industrias en chips u hojuelas deben contener menos del 100 mg kg⁻¹ de cianuro en peso seco para ser considerados seguros para consumo, mientras que en peso fresco el contenido mínimo de ingesta disminuye a 10 mg kg⁻¹ para humanos y animales, y una ingesta mayor a 100 mg kg⁻¹ de cianuro puede causar problemas de intoxicación (IFAD y FAO, 2004). En hojas de yuca, se encuentran mayores contenidos de glucósidos cianogénicos que en las raíces, por lo que es un poderoso inhibidor de reacciones catalizadas por enzimas y los métodos de procesamiento tradicionales, como la molienda,

provocan la reducción del cianuro (Bayata, 2019). Además, un alto o bajo contenido de cianuro va a depender del tipo de variedad de yuca y a la adaptación de esta en las condiciones agroclimáticas donde se establezca el cultivo como se muestra en **Tabla 4.12**. De las variedades tradicionales que tiene actualmente el banco de germoplasma del CIAT, sobresalen las variedades de las regiones Andina y Orinoquía por tener los más bajos niveles de cianuro tanto en raíces como en hojas, mientras que las variedades de la región Caribe presentan niveles más bajos que en comparación con las variedades amargas utilizadas en el Amazonas (Ospina et al., 2020).

Tabla 4.12. Contenido de ácido cianhídrico en variedades de yuca industrial de diferentes zonas de Colombia (Ospina et al., 2020).

Zona	Cultivar	Contenido de HCN (mg kg ⁻¹ en peso seco)	
		Raíces	Hojas
Amazonas	COL2315	798	4034
	COL 2316		
	COL 2353		
	COL2469		
Andina	COL1108	88	1633
	COL2017		
	COL2019		
Caribe	COL 1722	385	3118
	COL 22		
	COL 474		
	COL 638		
Orinoquía	COL 1292	121	1534
	COL 1398		
	COL 1505		
	COL 1823		

4.3.- Nutrición del marañón.

El marañón (*Anacardium occidentale* L.) es originario del área tropical del continente americano, principalmente en países como Brasil, Colombia, Venezuela, y las Guayanas, siendo ampliamente cultivado en los continentes: América, Asia y Australia (FAO, 2021). De acuerdo con cifras del año

2019/2020 la producción mundial de la almendra de marañón fue de 786,266 toneladas (t) (Orduz y Rodríguez, 2022), siendo los principales productores de almendra países como la India con 176,000 t, Costa de Marfil con 136,000 t, Ghana con 65,340 t y Vietnam con 62,000 t (Dendena and Corsi, 2014). A lo largo de los años, este cultivo ha presentado un incremento del 7 % anual, mientras que según el reporte de Cashew Export Promotion Council of India, (2019) la demanda de la producción aumenta en un 6 % cada año por el impacto social y económico que ha causado a nivel mundial.

Por otro lado, el marañón es uno de los frutos conocidos como integrales, por su diversificación en el aprovechamiento de la especie. El fruto se utiliza como alimentación (nuez y pseudofruto o manzana) y del jugo mediante procesos industriales se extraen fenoles sintéticos, industrias de petróleo y gas, adhesivos, resinas y tensioactivos (Ike et al., 2021). Además de todos los usos mencionados, el principal aprovechamiento del fruto es la almendra que es conocida por su sabor y alto valor nutritivo, por ser apetecida presenta un precio alto en los mercados internacionales. Por lo cual, en Colombia este cultivo ha tomado un gran auge desde los años de 1990, estando presente en departamentos como el Vichada, Córdoba, Meta, Atlántico, Sucre, Tolima y Norte de Santander; siendo la principal fuente de siembra las huertas familiares (Gómez y Duque, 2016). En la **Tabla 4.13**, se observan las principales zonas, regiones productoras de marañón y descripción climatológica.

Tabla 4.13. Descripción climatológica de las zonas de producción del cultivo de marañón de Colombia.

Zona	Departamento	Municipios
Caribe Seco	Atlántico, Cesar, Guajira, Magdalena.	Polo Nuevo, Santo Tomas, Zapatoca, San Pablo del Llano.
Caribe Húmedo	Córdoba, Sucre	Chinú, Montería, Pueblo Nuevo, La Unión, San Benito.
Llanos Orientales	Vichada, Meta	Puerto Carreño, Cumaribo, Puerto Gaitán.
Valles secos interandinos	Tolima, Huila, Cauca, Norte de Santander	Natagaima, Coyaima, Ortega, Aipe, Villa vieja, Baraya, Cúcuta, Puerto Santander

4.3.1.- Aspectos básicos para la nutrición del marañón.

El principal problema para la siembra de marañón en Córdoba y Sucre es la poca tecnificación de este cultivo, que están asociado generalmente a comunidades campesinas que se encuentran agremiadas y están ubicadas en zonas de suelos muy marginales. El acceso de estos productores a tecnologías y dinero por parte del estado son escasas, además el apoyo de centro de investigación y universidades es poca, debido a que existe poco personal cualificados en todas las labores de manejo, principalmente materiales certificados que presenten características optimas a nivel fisiológico, productivo sanitario y que tengan alto potencial de producción. [Das y Arora \(2017\)](#), explican que, en Colombia, la escasa tecnificación del cultivo, que abarca plantaciones establecidas con semilla de material criollo, pero principalmente en la región de la costa Atlántica, limitada aplicación de prácticas de manejo agronómico y artesanal y semi-mecanización del proceso de postcosecha para obtención de la almendra. Una de las principales ventajas de este cultivo del marañón es que tiene la capacidad de adaptarse a diversas condiciones del suelo, logrando desarrollarse en suelos pobres y presentando sus mejores rendimientos en suelos con buena fertilidad, lo que también va de la mano con la fisiología de la planta, edad, absorción de nutrientes, manejo agronómico, fertilización y aplicación de enmiendas químicas. Por otra parte, para lograr entender la nutrición de una planta, es necesario conocer que existen naturalmente dos tipos de clasificaciones marcadas por su tamaño como lo son el marañón tipo enano y el tipo común.

Siendo el tipo común característico con una altura entre los 8 y 15 m, una copa que puede alcanzar una altura de 20 m ([Pivaa et al., 2003](#)), con una producción aproximada de 100 kg de nueces por cosecha. A diferencia del tipo enano que se caracteriza principalmente por su rápido crecimiento, menor tamaño y una productividad temprana presenta nueces más pequeñas, hojas más cercanas al suelo, por lo cual se obtiene una menor cantidad en kg de nueces por cosecha ([Bezerra et al., 2007](#)). Estas características tienen un efecto directo en la nutrición de los cultivos, debido

a que su manejo nutricional debe ser diferente para los dos tipos de marañón, enfocado directamente en las hojas, edad de fructificación y así suministrar los nutrientes en el momento oportuno, que depende principalmente del tipo de marañón que se está manejando.

4.3.2.- Condiciones agroecológicas.

Las condiciones agroecológicas, son un conjunto de características que presenta una zona determinada donde se van a establecer los cultivos, y estos presenten un rango de adaptación óptimo para su desarrollo y producción. Así mismo, estas características y/o factores están directamente relacionado con su adaptabilidad que es debida a sus caracteres genéticos que son propios de cada especie. Además, de sus requerimientos nutricionales e hídrico, de las características físicas y químicas del suelo, precipitación, vientos, brillo solar entre otros (Pivaa et al., 2003).

El cultivo de marañón se puede establecer en cualquier tipo de suelo, pero su crecimiento es mejora en suelos francos, arenosos, franco arenoso, profundos, con buen drenaje, sin pedregosidad y sin capas endurecidas en los primeros 100 cm (Kenji y Araujo, 2016), con bajo contenido de aluminio intercambiable, y los rangos de pH indicados oscilan entre 4,5 y 6,5. Según Falade (1978) este cultivo se desarrolla bien en suelos ácidos con baja fertilidad, pero se ha encontrado que el marañón es tolerante a la acidez y altas saturaciones de aluminio y sus exigencias nutricionales son menores que otras especies que se siembran en las mismas condiciones (Falade, 1978; Owen y Ramón, 1996).

Según Sys et al. (1993), el contenido de bases intercambiables se debe encontrar por encima del 35 %, pH debe oscilar entre 5,2 y 7, el nivel óptimo de materia orgánica es de 1,4 a 3,0 %. Este cultivo por ser una planta heliófila se apta a condiciones de hora/sol/año entre 1800 a 2500, la temperatura media óptima es de 27 °C, la cual puede variar entre 22 y 36 °C (Carr, 2014). Una precipitación adecuada se encuentra entre 800 y 1500 mm/año, preferiblemente destruidos entre 6 y 7 meses, y la humedad relativa entre 50 y 85 % (Frota y Parente, 1995; Aguiar y Acosta, 2002).

4.3.2.1.- Edad de la planta.

La edad de la planta permite inferir directamente sobre los contenidos de absorción de los elementos nutricionales de la especie, además, como el marañón posee dos tipos (común y enano) con diferentes edades de producción, es necesario conocer cada una de estas etapas al momento de la nutrición, puesto que, estudios realizados por [Lima et al. \(2003\)](#), el marañón en su estado joven absorbe los nutrientes de la siguiente manera: $N > K > Ca > Mg > P > S$ presentando altas concentraciones en las hojas, mientras que en estado adulto se enmarca principalmente en absorciones de $N > P > K$ ([Kumar et al., 1982](#)). Adicional a esto, autores como [Bezerra et al. \(2007\)](#), establecen que la importancia de la edad de la planta radica en que las concentraciones de los elementos nutricionales en las hojas de plantas adultas varían en función de la edad, movilidad, disponibilidad de los nutrientes, interacción genotipo-ambiente y las condiciones agroclimáticas que afecten al cultivo. Por lo tanto, el desconocimiento de esta característica del marañón puede ocasionar innumerables pérdidas económicas en las aplicaciones de fertilizantes.

De igual forma, la absorción de nutrientes de cualquier cultivo consiste en la interacción que existe entre las condiciones del suelo, disponibilidad de agua y mecanismos de absorción de los nutrientes por parte de la planta. Partiendo con las investigaciones realizadas por [Yadukumar y Rejani \(2008\)](#), las condiciones físicas y químicas que favorecen el buen desarrollo y crecimiento del marañón son suelos franco-arenosos profundos y bien drenados que no presenten indicios de compactación, con pH menores que 8,0 sin presencia de costras ni problemas por salinidad. El marañón por su parte, en estudios realizados muestran que la absorción de nutrientes en el cultivo, no suele ser un problema debido a que se puede adaptar a condiciones desfavorables, por ejemplo, [Cavalcante et al. \(2019\)](#) encontraron en algunos estudios que la absorción de los nutrientes en las etapas tempranas y jóvenes del marañón van en el siguiente orden descendente: $N > K > P > Mg > Ca > S > Fe > Mn > Cu > B > Zn$. Además, indican que es importante la asistencia técnica en la nutrición del cultivo, y debe conocer los contenidos nutricionales del suelo, las épocas de lluvia y

por último, la asimilación e importancia de cada uno de los elementos químicos que necesita la planta para cumplir su ciclo de cosecha en buenas condiciones.

4.3.2.2.- Forma de aplicación de los elementos nutricionales.

El suministro de los fertilizantes para suplir necesidades nutricionales de los cultivos y su asimilación dependen en gran medida de la forma en la que se aplican estos elementos químicos esenciales, debido a que varía de acuerdo con las especies que se estén manejando. En el cultivo de marañón, al igual que todos los cultivos se debe realizar una planificación de la aplicación de los nutrientes y enmiendas de acuerdo con la edad del cultivo y las condiciones de suelos y ambientales. Inicialmente debe haber control de maleza en la zona de ploteo que estará de acuerdo con la edad del cultivo, para evitar competencia directa por agua y nutrientes. Así mismo, hay que tener un histograma de la precipitación para conocer los meses de más lluvia y los meses con menos precipitación. Adicional, para ser una aplicación eficiente debe ir relacionada con la necesidad de los elementos en la planta y el periodo de mayor actividad radicular ([Mangalassery et al., 2021](#)). Por tanto, la aplicación para el cultivo de marañón se recomienda que sean en zanjas circulares de 25 cm de profundidad y 15 cm de ancho, donde se encuentra la mayor actividad radicular para facilitar la rápida y eficiente asimilación de los elementos nutricionales por parte del árbol de marañón, como se observa en la **Figura 4.6**.

En Colombia, existen diferentes zonas que han sido utilizadas específicamente para cultivos de marañón como es el caso de Chinú – Córdoba, establecido como uno de los principales productores de este cultivo a nivel nacional con aproximadamente 2000 ha con suelos profundos y con poca profundidad, con buen drenaje y altos contenidos de bases intercambiables denominado Haplocalcids, Haplustepts, Ustipsamments y Ustorthents ([Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2009](#)). De igual manera, en el mismo departamento se encuentra Montería con suelos con pendientes menores de 12 %, clasificados como Haplocalcids, Haplustepts, Ustipsamments, Ustorthents poco profundos y bien drenados

(Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2009). Por otro lado, en el departamento de Tolima, se cultivan aproximadamente 140 ha con semillas endémicas en suelos originados de rocas sedimentarias clasificados como Usthortents, Udorthents y Dystrudepts (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1997). Debido a la variabilidad de regiones donde se cultiva el marañón como se ve en la **Figura 4.7** y de las condiciones químicas de los suelos implementados en marañón, se realizaron estudios de las condiciones críticas que pueden impedir el crecimiento del cultivo, que según investigaciones realizadas por Jagdish (2019) los suelos excesivamente alcalinos y salinos son la principal limitante para este cultivo. Adicional a esto, las condiciones físicas de exceso de agua y capas cementadas impiden el crecimiento normal.



Figura 4.6. Forma de aplicación en plateo de fertilizantes para el cultivo de marañón.

La aplicación de nutrientes para el cultivo de marañón se realiza con fertilizantes de síntesis o abonos orgánicos, y para realizar estas prácticas primordialmente se debe conocer en gran medida las propiedades físicas y química de los suelos, con la finalidad de determinar la rigidez, sostenimiento, penetración de raíces, aireación, drenaje, almacenamiento de agua, plasticidad, entre otros parámetros físicos, como el contenido de materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, contenidos de macro y microelementos que componen la calidad misma del suelo, y poder

implementar prácticas de aplicación acorde a estas propiedades (Rucks et al., 2004). Si bien, el marañón es un cultivo perenne que su altura puede variar desde los 5 metros hasta los 20 metros (Lopes Serrano y Pessoa, 2016), tiene la particularidad de que no obtiene un buen desarrollo en suelos con poca profundidad y con altos contenidos de arcilla (> 60 %), por lo cual es preferible cultivarse en suelos con textura arenosa o franco-arenosa (Kenji y Araújo, 2016), sin que se presenten encharcamientos y/o capas cementadas y/o pedregosas. Además, se recomienda sembrar en los suelos que su pH oscile entre 4,5 y 6,5, que tengan niveles bajos de acidez intercambiable, debido a que las condiciones de alcalinidad y salinidad condicionan el crecimiento y desarrollo de este cultivo. Es por esto, que se recomienda la implementación de drenaje si el suelo se encharca, aplicación de enmiendas químicas si los suelos son ácidos para neutralizar las condiciones de acidez, aplicación de abonos orgánicos para mejorar la penetración de raíces e incrementar la porosidad y la retención de humedad, antes del establecimiento del cultivo.

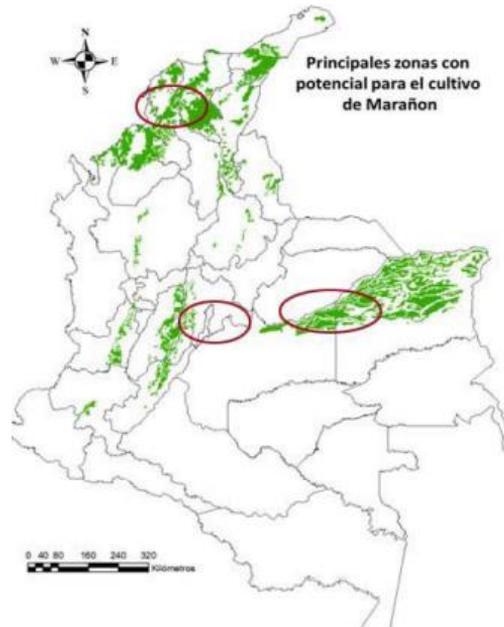


Figura 4.7. Regiones del país con marañón (Orduz y Rodríguez, 2022).

4.3.2.3.- Prácticas de manejo.

El cultivo de marañón al tener una alta demanda interna y externa necesita que los productores implementen buenas prácticas agrícolas, y estas son todas las labores que son necesarias para obtener altos rendimientos en campo y en la cosecha. Entre estas prácticas tenemos el manejo físico – químico de los suelos y la implementación de planes de fertilización que contribuyan con el incremento en la producción (Tibaduiza y Cañar, 2021). Además, en este cultivo, se han implementado diversas tecnologías o prácticas con la finalidad de una mayor eficiencia de las labores agrícolas y aumentar los rendimientos, y entre estas prácticas se encuentran: selección del material vegetal, óptima densidad de siembra, poda, manejo de arvenses, plagas y enfermedades, entre otras.

Colombia, posee regiones donde se encuentran altas densidades de plantas como se ve en la **Figura 4.8**, e incluso zonas con semillas mejoradas y plantaciones tecnificadas. No obstante, aún es necesario que se desarrollen investigaciones donde se determinen la calidad de los suelos, épocas de sequía, lluvia, variación climática, adaptabilidad de los clones, limitaciones de los rendimientos, densidad de las plantas y prácticas de manejo enfocadas a alcanzar los picos de la producción de cada una de las variedades de marañón a establecer. Sin embargo, en relación con densidades de siembra, los productores utilizan diferentes diseños o distancia de siembra, que son importantes debido a que la nutrición mineral está directamente relacionada con el número de árboles por hectárea. Autores como **Gómez y Duque (2016)**, publicaron datos de zonas de siembra evaluadas en Puerto Carreño (Vichada) con distancias de siembra de 12 m x 15 m para un total de 55 plantas/ha, en contraste con otras localidades donde utilizan sistema de siembra 10 m x 8 m para un total de 125 plantas/ha. Adicionalmente, se han realizado diversos estudios con clones a 12 m entre filas y 10 m por plantas, logrando una densidad de 83 plantas/ha.

Por otro lado, estudios realizados por **Silva et al. (2016)**, establecen que existen tres criterios para tomar la decisión de elegir la densidad de siembra: a) baja densidad de plantas y evitar el uso de podas, sembrando las plantas a 15 m entre filas y 12 m entre plantas; b) densidad de plantación media,

donde se debe utilizar poda de formación, podas sanitarias y de producción de plantas adultas, sembrando las plantas a 12 o 10 m entre filas y 10m entre plantas; y c) alta densidad de plantas (metodología poco implementada), donde se deben aplicar podas de formación, sanitarias, mantenimiento y de producción sembrando las plantas a 10 m entre filas y 8 m entre plantas.



Figura 4.8. Siembra de cultivo de marañón en Chinú, Córdoba - Colombia.

Una vez conocida la densidad de siembra y las características de los suelos, se pueden implementar las prácticas de correctivos químicos y la fertilización. Según [Baquero et al. \(2018\)](#), en los suelos ácidos (Oxisoles y Ultisoles), generalmente presentan altos contenidos de Al intercambiable y bajos contenidos de Ca, Mg y K con aproximadamente entre el 20 a 25 % de sus contenidos en la capacidad de intercambio catiónico, además bajo niveles de carbono orgánico y de nutrientes, y debido a estas características se recomienda incrementar la saturación de bases al 70 %, con el uso de cales agrícolas ([De Oliveira et al., 2013](#)), y las aplicaciones de correctivos se recomienda hacerla tres meses antes del trasplante.

4.3.2.4.- Material vegetal.

En el mundo existen solamente dos tipos de marañón como especies de *A. Occidentale* L, que son denominados tipo enano, gigante o común, dentro

de sus principales características, el común crece de 5 a 15 metros, con diámetro de copa de 12 a 14 metros, con periodo de florecimiento entre los 24 y 36 meses. Por el contrario, el enano crece solamente hasta aproximadamente 4 m de altura, con diámetro de copa de 6 a 8 m de ancho con periodo sexualmente activo entre los 6 y 18 meses de establecimiento (Bezerra et al., 2007).

Los cultivares que son atraídos económicamente, son los que poseen capacidades de alto rendimiento, la característica de la nuez que se desee (peso de nuez, peso grano y desarrollo del grano), calidad de la manzana (alto contenido de jugo), tolerancia a enfermedades, plagas y adaptación a diferentes condiciones agroecológicas (Kapinga et al., 2017). Por otro lado, en Colombia solamente se hacen uso de tres clones de marañón tipo criollo enano establecidos por Corpoica, los cuales son: Mapiria Ao1, Yopare Ao2 y Yucao Ao3 como se observan en la **Figura 4.9**.



Figura 4.9. Clones de marañón utilizados en Colombia: **A)** Mapiria Ao1; **B)** Yopare Ao2 y **C)** Yucao Ao3.

Adicional a esto, las características principales de algunos de los clones utilizados a nivel mundial son presentados en la **Tabla 4.14**.

Tabla 4.14. Caracterización de diferentes variedades de marañón que son utilizadas a nivel mundial y nacional.

País	Variedad	Tipo	Características
Tanzania	AC4	C	Alto rendimiento, muy apetecible en el mercado por su fruto seco y manzana, tolera las principales enfermedades e insectos y presenta buenos resultados de adaptabilidad.
	AZA2	C	Alto rendimiento, nuez y manzana con buena calidad, tolera la enfermedad del tizón de nueces, se adapta muy bien en diferentes condiciones agroecológicas.
Brasil	BRS 274	C	Altos rendimientos, nuez y manzana de calidad, tolera las principales plagas y enfermedades.
	CCp-76	E	
India	Vengurla-2	C	Altos rendimientos, nuez y manzana de calidad, tolera las principales plagas y enfermedades.
	Sulabha (K10-2)	C	
Colombia	Mapiria Ao1	E	Rendimiento promedio de 1,9 t/ha con 90 nueces por kilo de fruto. Con alta capacidad para tolerar Antracnosis.
	Yopare Ao2	E	Rendimiento promedio de 1,6 t/ha con 83 nueces por kilo de fruto. Presenta tolerancia a la Antracnosis.
	Yucao Ao3	E	Rendimiento promedio de 1,5 t/ha con 77 nueces por kilo de fruto. Presenta tolerancia a la Antracnosis.

Tipos: Común (C) o Enano (E).

4.3.3.- Composición nutricional del marañón.

Los frutos del marañón contienen una gran cantidad de compuestos y minerales que son importante para la salud y alimentación. Esta fruta contiene lípidos fenólicos, ácidos grasos saturados e insaturados, compuestos bioactivos como β -caroteno, luteína, zeaxantina, tiamina, ácido esteárico, ácido oleico, y el ácido linoleico (Ryan et al., 2006; Trox et al.

2010). De acuerdo con [Rufino et al. \(2009\)](#), la actividad antioxidante del jugo del marañón se atribuye principalmente al contenido de ácido ascórbico, y el jugo también contiene ácidos cítrico, málico y tartárico con 434578, 238237, 2127 mg/100 ml, respectivamente ([Scherer et al., 2008](#)). En este fruto contiene flavonoides ([Brito et al., 2007](#)), como los flavonoles glicosídicos y entre ellos el 3-*O*-galactósido, 3-*O*-glucósido, 3-*O*-ramnósido, 3-*O*-xilopiranosido, 3-*O*-arabinopiranosido y 3-*O*-arabinofuranósido. Adicional a esto, el fruto del marañón tiene altos contenidos de proteína 21 %, carbohidratos 22 %, grasas 47 %, minerales y vitaminas que son esenciales dentro de su caracterización y por lo cual han tomado una gran importancia en la dieta humana y animal ([Nagaraja, 2008](#)), que pueden ser una alternativa para sustituir muchos alimentos en la actualidad siempre y cuando se realicen muchas más investigaciones para tecnificar la producción de este producto. En investigación realizada por [Rico et al. \(2015\)](#), encontraron que el mineral con mayor contenido en la fruta (mg/100 g) de marañón fue potasio con promedio de 622 ± 59 , seguido del fósforo, magnesio, calcio y sodio con 503 ± 50 ; 249 ± 12 ; 41 ± 10 y $10.0 \pm 3,2$ respectivamente. Para los microelementos mayor contenido de hierro con $5,7 \pm 1,1$ mg/100 g, zinc con $5,3 \pm 0,5$ mg/100 g y selenio con $0,039 \pm 0,045$ mg/100 g. Sin embargo, otros autores han encontrado diferentes contenidos de elementos nutricionales como sodio, potasio, calcio, magnesio, fósforo, hierro, cobre, zinc, manganeso, selenio y cloro, de los cuales sus se han realizado diversas investigaciones de contenidos como se observan en la **Tabla 4.15**.

Tabla 4.15. Contenidos de elementos nutricionales en el fruto de marañón.

Elemento	Nagaraja, 2008 (%)	Josino et al., 2012 (mg/100 g)	Rico et al., 2015
Ca	0,040	3,58	41,0
Mn	0,002	0,76	-
Cu	0,002	0,95	-
K	0,570	144,33	622,5
Na	0,005	14,85	10,0
Zn	0,004	2,89	5,3
Fe	0,008	2,61	5,7
Mg	0,280	61,27	248,8

Por otro lado, la pseudofruta conocida como manzana del marañón es jugosa, con altos contenidos de fibras dietética total de 209 g/kg, siendo la mayor parte insoluble (88 %) (Scherer et al., 2008). Está compuesta por 88 % de jugo, 0,2 % proteína, 0,1 y 11,6 % de carbohidratos (Coto Amaya, 2003). Además, presenta altos contenidos de vitamina C (262 mg 100 ml⁻¹) superando el contenido de la naranja cinco veces (Mothé et al., 2017). Por otro lado, la almendra contiene 8,61 % de agua, 18,28 % de proteína, 41,9 % de etéreo, 0,8 % de fibra cruda, 2,4 % de ceniza, 28,68 % de carbohidratos, 0,51 % de fósforo, 0,69 % de potasio, 0,20 % de magnesio, 699 ppm de calcio, 65 ppm de Zinc razones por la cual se ha estado investigando la manzana para suplir la deficiencia de vitamina C en el cuerpo humano (Coto Amaya, 2003).

4.3.3.1.- Requerimientos nutricionales del marañón.

La aplicación continua y sostenible de los elementos químicos nutricionales es necesaria para lograr o mantener altos rendimiento de los cultivos, y la aplicación de fertilizantes orgánicos o de síntesis deben ser en cantidades óptimas para alcázar los requerimientos de los cultivos en las diferentes épocas fenológicas del cultivo a establecer (Zhang et al., 2020). Los cultivos en general necesitan de una fertilización equilibrada a través de fuentes inorgánicas y orgánicas, que son consideradas las principales fuentes nutricionales para lograr un crecimiento y producción de acuerdo con los requerimientos y las practicas nutricionales realizadas, siempre buscando reducir los costos de producción y el menor impacto ambiental.

Según Mangalassery et al. (2021), los requerimientos nutricionales permiten conocer la cantidad de cada uno de los elementos que cada planta necesita para completar sus procesos fisiológicos y bioquímicos para la producción de biomasa, y en la mayoría de los casos se hace necesaria la aplicación de prácticas de fertilización para lograr obtener los rendimientos esperados en un tiempo determinado. Además, esta práctica ha mostrado buenos resultados en arboles mejorando sus propiedades morfológicas, fisiológicas y de adaptación a diversas zonas. Es así, que el cultivo de marañón al igual que todas las plantas necesitan de unos elementos químicos nutricionales para desarrollar el máximo rendimiento de su

potencial genético, absorbiéndolos de las reservas nutricionales de los suelos. Sin embargo, cuando los suelos se encuentran desprovistos de los elementos químicos en la micela coloidal y no hay las cantidades suficientes que la planta requiere, es necesaria la implementación en el uso de fertilización orgánica o inorgánica para suplir los requerimientos nutricionales del cultivo de acuerdo con [Silva \(2016\)](#). Por otra parte, [Rodríguez et al. \(2011\)](#), explicaron que la demanda nutricional de una especie vegetal es la cantidad de elementos químicos nutricionales que se deben encontrar en los tejidos vegetales de una planta en las diferentes etapas fenológicas, para que los cultivos no presenten deficiencias y se afecte el crecimiento, desarrollo y rendimiento de ese cultivo.

Por lo cual, la fertilización depende principalmente del requerimiento de la especie, fertilizante utilizado y la dosis para poder cumplir con el crecimiento del cultivo sin que se presente fitotoxicidad. Por otro lado, la práctica de fertilización depende de la cantidad en el suelo, el clima, manejo, humedad y la absorción de los nutrientes por parte de la planta ([Volke et al., 1994](#)), la cual tiene la capacidad de tomarlos selectivamente y en las concentraciones que necesite. El cultivo del Marañón requiere principalmente elementos como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, hierro, boro, zinc y cobre de los cuales en **Tabla 4.16** se presenta su funcionalidad y deficiencia de los elementos en el marañón.

Tabla 4.16. Contenidos de elementos nutricionales en el fruto de marañón ([Smith, 1989](#); [Avilan et al., 1989](#)).

Elem.	Función	Deficiencia
N	Su mayor influencia radica en el crecimiento y rendimiento de la planta. Acción sobre el aumento de masa seca de la planta.	Tallo fino y una coloración verde clara, hojas viejas cloróticas.
P	Es un componente de enzimas, nucleoproteínas y lecitinas, para funciones vitales de la planta.	Reducción de crecimiento, coloración verde oscura en hojas viejas, carencia de hojas.
K	Influye en la calidad del fruto.	Clorosis en los bordes de las hojas, hojas necróticas.

Ca	-	Provoca ondulaciones en las hojas superiores.
Mg	Constituyente de clorofila a y b.	Clorosis en el ápice y bordes de hoja, posteriormente necrosis.
S	Componente de aminoácidos, proteínas y vitaminas.	Clorosis en hojas nuevas, necrosis en ápice.
Fe	Involucrado en transporte de electrones en la fotosíntesis.	Afecta en etapa de semillero, disminución de crecimiento.
Zn	-	Causante de la enfermedad de la hoja pequeña.

Aun estando a la mano una diversa información sobre la nutrición del marañón, algunos agricultores establecen que este cultivo no se hace necesaria la intervención química, sin embargo, autores como [Matimelo \(2017\)](#), indica que a este cultivo es importante realizar aplicaciones de elementos como N, P, K para aumentar la rigidez y rendimiento de las plantas hasta 15 kg de nueces por árbol. Por otro lado, autores como [Brito et al. \(2007\)](#), establecieron niveles de absorción para el marañón (ver **Tabla 4.17**).

Tabla 4.17. Niveles de absorción de nutrientes de la nuez de marañón en kg/ha ([Bezerra et al., 2007](#)).

N	P	K	Ca	Mg	S
31,36	4,15	6,30	-	-	-
6,76	0,70	3,28	0,24	0,67	0,27
11,35	1,47	6,16	0,38	2,23	0,60
13,80	2,00	6,65	1,00	1,60	0,70

Por lo que respecta, que la aplicación de fertilización ha mostrado muchas mejorías en los rendimientos y adaptabilidad de muchos materiales, aplicaciones de elementos como N, P, K, Ca, Mg y S, son los esenciales para que el cultivo se desarrolle en unas condiciones óptimas. Adicional a esto, la práctica de fertilización es necesario involucrar parámetros de diagnóstico de elementos que en este caso son los análisis foliares de los cuales, autores como [Crisóstomo \(2013\)](#), establece los niveles críticos para tener en cuenta las condiciones de fertilidad como se ven en la **Tabla 4.18**.

Tabla 4.18. Nivel crítico de los elementos nutricionales para el cultivo de marañón en kg/ha (Crisóstomo, 2003).

Elemento	Bajo	Adecuado	Alto
P	< 12	13 – 30	>30
K	< 1,5	1,6 – 3,0	>3,0
Ca	< 3,0	4,0 – 7,0	>8,0
Mg	< 4,0	4,0 – 7,0	>8,0
Zn	< 0,5	0,6 – 1,2	>1,2

Por lo cual, se debe aplicar una fertilización integrada con monitoreo constante de cada uno de los elementos para que en cualquier momento se realicen intervenciones químicas u orgánicas que permitan a los cultivos cumplir con su ciclo producción de biomasa en función del tiempo determinado.

4.4.- Conclusiones y recomendaciones.

Las condiciones de fertilidad de los suelos es un aspecto importante que se debe tener en cuenta para establecer cualquier tipo de cultivo, para el cultivo de yuca y marañón, las condiciones nutricionales dependen de muchos factores edafoclimáticos y antrópicos. La fertilización es una práctica de manejo agronómica que nos permite sostener una buena productividad, cuando se diagnostica requerimientos en la aplicación de fertilizantes de los elementos nutricionales, es importante conocer las necesidades del suelo para lograr un determinado rendimiento. De acuerdo con esto, estos elementos fundamentales de la fertilidad juegan un papel importante en la producción agrícola, es indispensable conocer y manejar aquellos factores que puedan mejorar la nutrición de los cultivos enfocado en la relación planta-suelo. Esto se asocia a las diferentes condiciones de suelo en donde los componentes de elementos minerales, microorganismos, agua y materia orgánica inciden directamente en el crecimiento de las plantas, la cantidad de fertilizantes, el uso del suelo, entre otros aspectos que favorecen que un suelo sea fértil. Como recomendación es favorable conocer las propiedades fisicoquímicas y las necesidades nutricionales de los cultivos que permitan aprovechar en cierta manera los usos que se le puedan dar

dependiendo el entorno, desde el punto de vista de la agroindustria, la obtención de subproductos y la implementación de nuevas técnicas pueden relacionarse directamente con la cantidad de nutrientes que la planta pueda extraer durante su ciclo fenológico para un fin industrial, de esta manera se recomienda establecer dependiendo la zona, las condiciones ambientales y de suelo un plan de fertilización adecuado para obtener buenos rendimientos de los cultivos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Sucre, la Universidad de Córdoba, y la Universidad del Valle, así como al Departamento Nacional de Planeación de Colombia, específicamente, al Sistema General de Regalías (SGR) por la financiación recibida a través del proyecto BPIN 2020000100027.

Bibliografía

- Achidi, U.; Ajayi, O.; Bokanga, M.; Maziya-Dixon, B. **2005**. The use of cassava leaves as food in Africa. *Ecology of Food and Nutrition*. 44 (6), 423 – 435. DOI: 10.1080/03670240500348771
- AGRONET. **2021**. Reporte de área, producción y rendimiento nacional del cultivo de yuca (*Manihot esculenta* Crantz). Ministerio de Agricultura.
- Aguiar, M.; Costa, C. **2002**. Exigências climáticas. Produção - aspectos técnicos. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical. 4, 21 – 25.
- Aguilar, E.; Segreda, A.; Saborío, D.; Morales, J.; Chacón, M.; Rodríguez, L.; Acuña, P.; Torres, S.; Gómez, Y. **2017**. Manual del cultivo de yuca (*Manihot esculenta* Crantz). Instituto Nacional de Innovación Tecnológica y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. 91.
- Álvarez, E.; Bellotti, A.; Calvert, L.; Areas, B.; Cadavid, L.F.; Pineda, B.; Lano, G.; Cuervo, M. **2012**. Practical Handbook for Managing Cassava Diseases, Pests and Nutritional Disorders. CIAT, CLAYUCA, Colombia. 378.
- Aristizábal, J.; Sánchez, T. **2007**. Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. *Italia*. 7, 105 – 107.
- Avilan, L.; Leal, F.; Bautista, D. **1989**. Manual de fruticultura. Ed., América CA. Chacaito, Caracas, Venezuela. 167-171.
- Awoyinka, A.; Abegunde, V.; Adewusi, S. **1995**. Nutrient content of young cassava leaves and assessment of their acceptance as a green vegetable in Nigeria. *Plant Foods for Human Nutrition*. 47, 21 – 28. DOI: 10.1007/bf01088163
- Baduf, R. **2011**. Study on mineral nutrition of cassava under different tillage practices. *International Journal of Science and Technology*. 23 (2), 552 – 558.

- Ballot, C.; Semballa, S.; Atakpama, W.; Yangakola, T.; Doubro Bo-Mbi, A.; Blavet, D.; Zinga, I.; Wala, K.; Batawila, K.; Akpagana, K. **2016**. Effet De Fumures Minérales Sur Le Rendement Et La Qualité Organoleptique Du Manioc (*Manihot Esculenta* Crantz) Dans La Zone De Savane Au Centre-Sud De Centrafrique. *European Scientific Journal*. 12 (6), 185 – 211. DOI: 10.19044/esj.2016.v12n6p202
- Baquero Peñuela, J.; Yacomelo, M.; Orduz-Rodriguez, J. **2018**. Efecto del yeso sobre las características químicas de un Oxisol de la Orinoquia colombiana cultivado con lima ácida Tahití. *Temas Agrarios*, 23 (2), 154–163. DOI: 10.21897/RTA.V23I2.1299
- Barceló, J.; Rodrigo, G.; García, B.; Tamés, R. **2000**. *Fisiología vegetal*. Madrid. 568.
- Bayata, A. **2019**. Review on nutritional value of cassava for use as a staple food. *Science Journal of Analytical chemistry*. 7 (4), 83 – 91. DOI: 10.11648/j.sjac.20190704.12
- Bello, K. **2021**. Establecimiento de un modelo productivo de yuca (*Manihot esculenta* Crantz), variedad chirosa con fines de comercialización en el municipio de Tuchín - Córdoba. Facultad de Ciencias Agropecuarias. https://ciencia.lasalle.edu.co/ingenieria_agronomica/210
- Benincasa, M. **2003**. Análise de crescimento de plantas noções básicas. FUNEP, Jaboticabal, Brasil. 2, 41 – 42.
- Beovides, Y.; Milián, M.; Coto, O.; Cabrera, A.; Basail, M.; Santos, A.; López, J.; Medero, V.; Cruz, J.; Ruiz, E.; Rodríguez, D. **2014**. Morphological and agronomic characterization of Cuban cassava cultivars (*Manihot esculenta* Crantz). *Cultivos Tropicales*. 35 (2), 43 – 50.
- Berrios, M.; Arredondo, C.; Tjalling, H. **2007**. Guía de manejo de nutrición vegetal de especialidad pimiento. SQM S.A. 8 – 10.

- Bezerra, M.; Lacerda, C.; Filho, E.; Abreu, C.; Prisco, J. **2007**. Physiology of Cashew Plants grown under Adverse Conditions. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19 (4). DOI: 10.1590/S1677-04202007000400012
- Bolaños, M.; Silva, E.; Casteblanco, L.; Bautista, L.; Cruz, S.; Peña, A. **2021**. Yuca (*Manihot esculenta* Crantz). Manual de recomendaciones técnicas para su cultivo en el Departamento de Cundinamarca. Mesa editorial.
- Bradbury, J.; Desmond, W. **1988**. Chemistry of tropical root crops: significance for the nutrition and agriculture in the pacifics. *Centre. Int. Agric. Res.* 6, 1 – 20.
- Brito, E.S.; Araujo, M.C.P.; Lin, L.Z.; Harnly, J. **2007**. Determination of the flavonoid components of cashew apple (*Anacardium occidentale* L.) by LC-DAD-ESI/MS. *Food Chem.* 105, 11121118. DOI: 10.1016/j.foodchem.2007.02.009
- Bujang, A.; Jamil, S. **2016**. Nutrient and antinutrient composition of different variety of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) leaves. *Journal Teknologi.* 78 (6), 59 – 63. DOI: 10.11113/jt.v78.9024
- Burns, A.; Gleadow, R.; Zacarias, A.; Cumbana, C.; Miller, R.; Cavagnaro, T. **2012**. Variation in the chemical composition of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) leaves and roots as affected by genotypic and environmental Variation. *Journal Agriculture and Food Chemistry.* 60 (19), 4946 – 4956. DOI: 10.1021/jf2047288
- Cadavid, F. **2011**. Manual de nutrición vegetal: una visión de los aspectos nutricionales del cultivo de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz). 1, 175.
- Cadavid, L. **2008**. Fertilización del cultivo de la Yuca (*Manihot esculenta* Crantz). Agrosavia.1172.
- Carr, M. **2014**. The water relations and irrigation requirements of cashew (*Anacardium occidentale* L.): A review. *Experimental Agriculture.* 50 (1), 24–39. DOI: 10.1017/S0014479713000392

Cashew Export Promotion Council of India., **2019**. 63rd Annual Report 2017
Government of India. 18.

Cavalcante, L.; Soares, C.; Taniguchi, A.; Lopes Serrano, A.; Melo, D. **2019**.
Nutrient accumulation and nutritional efficiencies of cashew genotypes,
Journal of Plant Nutrition, 42 (4), 344 – 350. DOI:
10.1080/01904167.2018.1555847

Charles, A. L.; Sriroth, K.; Huang, T. **2005**. Proximate composition, mineral
contents, hydrogen cyanide and phytic acid of five cassava genotypes.
Food Chemistral. 92(4), 615–620. DOI: 10.1016/j.foodchem.2004.08.024

Chávez A.; Sánchez T.; Jaramillo G.; Bedoya J.; Echeverry J.; Bolaños A. **2005**.
Variation of quality traits in cassava roots evaluated in landraces and
improved clones. Euphytica. 143 (1), 125–33. DOI: 10.1007/s10681-005-
3057-2

Combatt, E.; Polo, J.; Jarma, A. **2017**. *Manihot* cultivation yield using organic
and chemical fertilizers in an acid soil. Rev. Ciencias Agrícolas. 14 (1), 57–
64. DOI: 10.19053/01228420.v14.n1.2017.6088

Coto Amaya, O. M. **2003**. Guía Técnica: Cultivo del marañón. Centro Nacional
de Tecnología Agropecuaria y Forestal.

Crisóstomo, L.A.; de S. Santos., F.J.; de Oliveira, V.H.; Van Raij, B.; de C.
Bernardi, A.C.; Silva, C.A.; Soares., I. **2003**. Cultivo do cajueiro anão
precoce: Aspectos fitotécnicos com ênfase na adubação e irrigação.
Embrapa Agroindústria Tropical. Fortaleza. 8.

DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). **2016**. Boletín
mensual de insumos y factores asociados a la producción agropecuaria. El
cultivo de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz). 46, 1–89.

- Das, I.; Arora, A. **2017**. Post-harvest processing technology for cashew apple – A review. *Journal of Food Engineering*. 194, 87–98. DOI: 10.1016/J.JFOODENG.2016.09.011
- De Oliveira, V.; Kenji C.; Araujo L. **2013**. Nutrição Mineral do Cajueiro. *Embrapa Agroindústria Tropical*.
- Dendena, B.; Corsi, S. **2014**. Cashew, from seed to market: A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 34, 753 – 772. DOI: 10.1007/s13593-014-0240-7.
- Díaz, P.; López C. **2021**. Yuca: pan y carne, una alternativa potencial para hacer frente al hambre oculta. *Acta Biológica Colombiana*. 26 (2), 235 – 246. DOI: 10.15446/abc.v26n2.84569
- EVA (Evaluaciones Agropecuarias Municipales). **2022**. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Dirección de Política sectorial. Departamento de Córdoba. Municipio de Ciénaga de Oro.
- Ezui, K. S. **2016**. Fertilizer requirements for balanced nutrition of cassava across eight locations in West Africa. *Field Crops Research*. 185, 69 – 78. DOI: 10.1016/j.fcr.2015.10.005
- Falade, J. **1978**. Effects of Macronutrients on Mineral Distribution in Cashew (*Anacardium Accidentale* L). *Journal of Science of Food and Agriculture* 20, 91 – 86.
- FAO (Food and Agriculture Organization). **2021**. FAOSTAT, Data, Crops, Cashew nuts, with shell.
- Fernandes, A.M.; Gazola, B.; Nunes, J.G.S.; García, E.L.; Leonel, M. **2017**. Yield and nutritional requirements of cassava in response to potassium fertilizer in the second cycle. *Journal of Plant Nutrition*. 40, 2785–2796. DOI:10.1080/01904167.2017.1382520.

- FIDAR (Fundación para la Investigación y el Desarrollo Agrícola). **2000**. Reconocimiento, identificación de chisas rizófagas del cultivo de yuca en la zona de ladera del Norte del Departamento del Cauca. Folleto divulgativo.
- Fischer, T.; Byerlee, D.; Edmeades, G. **2014**. Crop yields and global food security: will yield increase continue to feed the world. Australian Government, ACIAR. 634, 1031 – 8194.
- Fregene M.; Angel F.; Gómez R.; Rodríguez F.; Chavarriaga P.; Roca, W.; Tohme, J.; Bonierbale M. **2000**. A molecular genetic map of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). Theoretical and Applied Genetics. 95, 431 – 441. DOI: 10.1007/s001220050580
- Frota, P.; Parente, J. **1995**. Clima e fenologia. In: Araújo, J. P. P. de; Silva, V. V. da (Org.). Cajucultura: modernas técnicas de produção. Fortaleza: EMBRAPA-CNPAT. 43-54.
- Galdamez. **2004**. Guía técnica del cultivo de marañón. Programa Nacional de Frutas de El Salvador. La Libertad, Santa Tecla. 10 (13), 38-41.
- Gbadegesin, M.; Wills, M.; Beeching, J. **2008**. Diversity of LTR-retrotransposons and Enhancer/Suppressor Mutator-like transposons in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). Molecular, Genetics and Genomics. 280, 305–317. DOI: 10.1007/s00438-008-0366-x
- Gichuru M. **1991**. Residual effects of natural bush, *Cajanus cajan*, and *Tephrosia candida* on the productivity of acid soil in southeastern Nigeria. Plant and Soil. 134 (1), 31 – 36. DOI: 10.1007/BF00010714
- Gleadow, R.; Woodrow, I. **2002**. Constraints on the effectiveness of cyanogenic glycosides in herbivore defense. Journal of Chemical Ecology. 28, 1301–1313. DOI: 10.1023/A:1016298100201
- Gómez, H.; Duque, J. **2016**. El Agro-negocio del marañón como perspectiva de desarrollo rural. Universidad de los Andes.

- Gosling, P.; Hodge, A.; Goodlass, G.; Bending G. **2006**. Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 113 (4), 17–35. DOI: 10.1016/j.agee.2005.09.009
- Gougodo, L.; Kosh, E.; Omenda, J.; Zaman, M.; Bendima B.B.; Batawila, K.; Akpagana, K. **2023**. Fertilization options for improved cassava productivity and economic profitability in the Pissa and Damara areas, Central African Republic: Comparative Approach. *African Journal of Agricultural Research*. 19 (1), 67 – 80. DOI: 10.5897/AJAR2022.16250
- Havlin, J.; Heiniger, R. **2020**. Soil fertility management for better crop production. *Rev. Agronomy*. 10 (9), 1349. DOI: 10.3390/agronomy10091349
- Henry, R. **2019**. Innovations in plant genetics adapting agriculture to climate change. *Current Opinion in Plant Biology*. 56, 168 – 173. DOI: 10.1016/j.pbi.2019.11.004
- Howeler R. **2018**. Nutrient input and losses in cassava-based cropping system: examples from Vietnam and Thailand. 3 – 31.
- Ike, D. C.; Ibezim-Ezeani, M. U.; Akaranta, O. **2021**. Cashew nutshell liquid and its derivatives in oil field applications: an update. *Green Chemistry Letters and Reviews*. 14 (4), 620 – 633. DOI: 10.1080/17518253.2021.1991485
- Ikeh, A.; Ndaeyo, N.; Ikeh, C. **2023**. Effects of integrated fertilization on soil sustainability and cassava (*Manihot esculenta* Crantz) yield in an ultisol. *Journal of Current Opinion in Crop Science*. 4 (2), 89 – 102.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). **1997**. Mapa Digital de Capacidad de Uso de las Tierras del Departamento de Tolima, República de Colombia. Escala 1:100.000.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). **2009**. Mapa Digital de Capacidad de Uso de las Tierras del Departamento de Córdoba, República de Colombia. Escala 1:100.000.

- International Fund for Agricultural Development (IFAD); Food and Agriculture Organization (FAO). **2004**. Global cassava market study. Proceedings of the validation forum on the global cassava development strategy.
- Jagdish. **2019**. Cashew Farming; Planting, care; Harvesting- A full Guide. Agri Farming.
- Josino, D.; Barros, C.; Gomes, T.; Wilane, R. **2012**. Study of the stability of cashew nuts obtained from conventional and organic cultivation. *Semina: Ciências*, 33 (5), 1855 – 1868. DOI: 10.5433/1679-0359.2012v33n5p1855
- Kapinga, F.; Kasuga, J.; Kafiriti, E. **2017**. Growth and production of cashew nut. Tanzania. Naliendele Agricultural Research.
- Kenji, C.; Araújo, L. **2016**. Clima e solo para o cajueiro. Em L. Serrano, Sistema de produção do caju Embrapa Agroindústria Tropical. 2, 54 – 60.
- Kumar, P.; Nair, B.; Rakhiappan, P.; Nagabhushanam, S.; Mohan, E. **1982**. Variation in mineral composition of leaves of cashew (*Anacardium occidentale* L.) as affected by season, position and age. *Indian Cashew J.* 14, 7 – 10.
- Laekemariam, F. **2016**. Soil Nutrient Status of Smallholder Cassava Farms in Southern Ethiopia. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare.* 6 (19), 12 – 15.
- Lambebo, T.; Deme, T. **2022**. Evaluation of nutritional potential and effect of processing on improving nutrient content of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) root and leaves. Department of Food Science and Applied Nutrition. 20. DOI: 10.1101/2022.02.04.479097

- Latif, S.; Müller, J. **2015**. Potential of cassava leaves in human nutrition: a review. *Trends Food Sci Technol.* 44 (2), 147–158. DOI: 10.1016/j.tifs.2015.04.006
- Lazcano C.; Gómez, M.; Revilla, P.; Domínguez, J. **2013**. Short-term effects of organic and inorganic fertilizers on soil microbial community structure and function. *Biology and Fertility of Soils.* 49 (6), 723 – 733. DOI: 10.1007/s00374-012-0761-7
- Leonel, M. **2015**. Culturas Amiláceas: batata-doce, inhame, mandioca e mandioquinha salsa. *Botucatu, CERAT/UNESP.* 1, 183 – 326.
- Lima, R.; Oliveira, V.; Fernandes, B.; Hernandez, F. **2003**. Acúmulo de N, K, Ca, Mg e S na matéria seca da parte aérea de mudas de cajueiro-anão-precoce submetidas a níveis crescentes de matéria orgânica. *Revista Brasileira de Fruticultura.* 25, 148 – 151. DOI: 10.1590/S0100-29452003000100041
- Lopes Serrano, L. A.; de Paula Pessoa, P. F. A. **2016**. Aspectos econômicos da cultura do cajueiro. *Sistema de produção do caju. Embrapa Agroindústria Tropical.* 2, 2–10.
- López, L.; Cadavid, L. **2015**. Tecnologías modernas para la producción de yuca. *Sena - CLAYUCA.* 586.
- Lorenzi, J.; Malavolta, E.; Gallo, J. **1981**. Acumulação de matéria seca e macronutrientes por dois cultivares de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). *Bragantia. Campinas.* 40, 145 – 156. DOI: 10.1590/S0006-87051981000100014
- Magaña, W.; Obrador, J., García, E., Castelán, M., Carrillo, E., **2020**. Rendimiento comparativo de la yuca bajo fertilización mineral y abono verde. *Revista mexicana de Ciencias Agrícolas.* 11 (6), 1259 – 1271. DOI: 10.29312/remexca.v11i6.2202
- Mangalassery, S.; Pandiselvam, R.; Preethi, P.; Manikantan, M.; Reddy, S.; Nayak, M.; Ramyashree, S. **2021**. Cashew apple pomace powder enriched the proximate, mineral, functional, and structural properties of cereal

- based extrudates. *Science Direct*. 139, 110539. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.110539
- Marschner, P. **2012**. Marschner's mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London. 3, 5 – 482.
- Martins, I.; Cazetta, J.; Fukuda, A. **2014**. Condições, modos de aplicação e doses de ureia revestida por polímeros na cultura do milho. *Pesquisa Agropecuária Tropical*. 44 (3), 271 – 279. DOI: 10.1590/S1983-40632014000300010
- Matimelo, M. **2017**. Fertilizer application of cashew. Zambia. FACTSHEETS FOR FARMERS.
- McCallum, E.; Ravi, B.; Wilhelm, G. **2017**. Tackling agriculturally relevant diseases in the staple crop cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Current Opinion in Plant Biology*. 38, 50 – 58. DOI: 10.1016/j.pbi.2017.04.008
- Melanby, U. **2013**. Assessing cassava growth and root yield performance under mineral nutrition. *Crop Physiology*. 5, 67 – 73.
- Mohankumar, C.; Nair, G.; Mandal, R. **1996**. Effect of FYM and NPK on cassava. In: Proc. 4th Symp. International Society Tropical Root Crops, Cali, Colombia. 122 – 124.
- Mothé, C.G.; Oliveira, N. N.; Freitas de Aqueline S.; Mothe, M.G. **2017**. Cashew tree gum: A scientific and technological review. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 2 (2), 681–688. DOI: 10.22161/IJEAB/2.2.14
- Nagaraja, K.V. **2008**. Nutritive value of cashew. National Research center for Cashew. India. Puttur – 574 202.

- Ngudi, D.; Kuo, Y.; Lambein, F. **2003**. Cassava cyanogens and free amino acids in raw and cooked leaves. *Food and Chemical Toxicology*. 41 (8), 1193 – 1197. DOI: 10.1016/S0278-6915(03)00111-X
- Ogedengbe, W. **2012**. Study on fertilizer effects on yield and nutrient content of cassava. *Journal of Root and Tuber Crops*. 23, 332 – 338.
- Oliveira, A.; De Albuquerque, U. **2005**. Woody medicinal plants of the caatinga in the state of Pernambuco (Northeast Brazil). *Acta Botanica*. 19 (1). DOI: 10.1590/S0102-33062005000100003
- Olsen, K.; Schaal, B. **2001**. Microsatellite variation in cassava (*Manihot esculenta*, Crantz) and its wild relatives: further evidence for a southern Amazonian origin of domestication. *American Journal of Botany*. 88 (1), 131 – 142. DOI: 10.2307/2657133
- Omenda, J.; Ngetich, K.; Kiboi, M.; Mucheru-Muna, M.; Mugendi, D. **2019**. Soil organic carbon and acid phosphatase enzyme activity response to phosphate rock and organic inputs in acidic soils of central highlands of Kenya in Maize. *International Journal of Plant and Soil Science*. 30, 1 – 13. DOI: 10.9734/ijpss/2019/v30i230169
- Orduz, J.; Rodríguez, E. **2022**. Cashew (*Anacardium occidentale* L.) a crop with productive potential: technological development and prospects in Colombia. *Journal Mesoamerican Agronomy*. 33 (2), 47268. DOI:10.15517/am.v33i2.47268
- Orduz-Rodriguez, J.; Rodriguez-Polanco, E. **2022**. El Marañón (*Anacardium occidentale* L.) un cultivo con potencial productivo: desarrollo tecnológico y perspectivas en Colombia. Universidad de Costa Rica. Volumen 33 (2), 47268.2022. DOI: 10.15517/am.v33i2.47268
- Ospina, B.; Ceballos, H.; Álvarez, E.; Bellotti, C.; Calvert, A.; Arias, V.; Cadavid, L.; Pineda, B.; Llano, G.; Cuervo, M. **2002**. La yuca en el tercer milenio: sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y

comercialización. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)
Cali. 327, 586.

Ospina, M.; Pizarro, M.; Tran, T.; Ricci, J.; Belalcazar, J.; Luna, J.; Londoño, L.; Salazar, S.; Ceballos, H.; Dufour, D.; López-Lavalle, L. **2020**. Cyanogenic, carotenoids and protein composition in leaves and roots across seven diverse population found in the world cassava germplasm collection at CIAT, Colombia. *International Journal of Food Science and Technology*. 56 (3), 1343 – 1353. DOI: 10.1111/ijfs.14888

Owen, E.; Roman, C. **1996**. El cultivo del marañón (*Anacardium occidentale* L.) en los Llanos Orientales de Colombia. Instituto Colombiano Agropecuario. 94, 286.

Parménides, F.; Torres, S.; Andrade, W. **2015**. Evaluación de la fertilización inorgánica en el cultivo de yuca en la región norte de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. 28 (2), 84 – 101.

Parra, J. **2019**. Cifras sectoriales: subsector productivo de la yuca, MADR.

Pivaa, J.; Cavalcanti, J.; Barros, L.; Crisóstomo, J. **2003**. Clones. En: Barros LM (ed), *Caju, Produção: Aspectos Técnicos*. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília. 74 – 78.

Polthane, A.; Wongpichet, K. **2017**. Effects of planting methods on root yield and nutrient removal of five cassava cultivars planted in late rainy season northeastern Thailand. *Agricultural Systems*. 8, 33 – 45. DOI: 10.4236/as.2017.81003

Quirós, A.; De Diego, J. **2006**. Análisis de crecimiento y absorción de nutrimentos de yuca (*Manihot esculenta* Crantz). Tesis Lic. San Carlos, Costa Rica, ITCR. 121.

Ramírez, L.; Jiménez, P. **2008**. El cultivo de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz), para producción forrajera y su utilización en la alimentación de bovinos: manual técnico. 1.

- Ravindran, G.; Ravindran, V. **1988**. Changes in the nutritional composition of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) leaves during maturity. Food chemistry, 27 (4), 299 – 309. DOI: 10.1016/0308-8146(88)90014-3
- Rico, R.; Bulló, M.; Salas, J. **2015**. Nutritional composition of raw fresh cashew (*Anacardium occidentale* L.) kernels from different origin. Food Science Nutrition. 4 (2), 329 – 38. DOI: 10.1002/fsn3.294.
- Rivera, T.; Andrade, R.; Labarta, R.; Calle, F.; Becerra, L. **2021**. Boletín informativo del sector yuquero, Colombia 2007-2020. Brief. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Cali, Colombia. 1 – 5.
- Rodríguez Piedrahita, L.; Arango Wiesner, L.V.; Pulido Chavarro, N.A. **2011**. Propuesta tecnológica para el aprovechamiento integral del marañón: nuez, pseudofruto y subproductos. Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Rucks, L.; García, F.; Kaplán, A.; Ponce de León, J.; Hill, M. **2004**. Propiedades físicas del suelo. Facultad de Agronomía. 78.
- Rufino, M.; Fernandes, F.; Alves, R.; Brito, E. **2009**. Free radical-scavenging behavior of some north-east Brazilian fruits in a DPPH system. Food Chem. 114, 693695. DOI: 10.1016/j.foodchem.2008.09.098
- Ryan, E.; Galvin, T.; O'Connor, A.; Maguire, N. **2006**. Fatty acid profile., tocopherol., squalene and phytosterol content of Brazil., pecan., pine., pistachio and cashew nuts. International Journal of Food Sciences and Nutrition. 57, 219–228. DOI: 10.1080/09637480600768077.
- Salam, M.; Peter, K. **2010**. Cashew: A monograph. Studium Press. 5 – 257.
- Salvador, E.; Steenkamp, V.; McCrindle, C. **2014**. Production, consumption, and nutritional value of cassava (*Manihot esculenta*, Crantz) in Mozambique: An Overview. Review Academic Journals. 6(3), 29-38. DOI: 10.5897/JABSD2014.0224

- Sangakkara, U.; Wijesinghe, D. **2014**. Nitrogen Fertilizer Affects Growth, Yield, and N Recovery in Cassava (*Manihot esculenta* Crantz), Communications in Soil Science and Plant Analysis. 45 (11), 1446 – 1452. DOI: 10.1080/00103624.2014.904330
- Scherer, R.; Rybka, A.; Godoy, H. **2008**. Simultaneous determination of tartaric, malic, ascorbic and citric acids in acerola, ac,ai and cashew pulps, and stability evaluation in cashew juices. Química. Nova. 31, 11371140.
- Silva, R.A.; Liberio, S.; Amaral, F.; Nascimento, F.; Torres, L.; Monteiro-Neto, V.; Guerra, R. **2016**. Actividad antimicrobiana y antioxidante de las flores de *Anacardium occidentale* L. en comparación con extractos de corteza y hojas. Bioscentia Medicina. 4, 87–99.
- Suárez, L.; Mederos, V. **2011**. Apuntes sobre el cultivo de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz). Tendencias actuales. Cultivos tropicales. 32 (3), 27 – 35.
- Susan J.; Ravindran C.; James G. **2005**. Long term fertilizer experiments: three decades experience in cassava, technical bulletin series. Central Tuber Crops Research Institute. 45, 8.
- Sys, C.; Van Ranst, E.; Debaveye, J.; Beernaert, F. **1993**. Land evaluation Part 3: Crop requirements. Agricultural Publications. 7, 39–40.
- Tibaduiza, L.; Cañar, D. **2021**. Sistematización de experiencias para la paz: el proceso de aprendizaje del cultivo de marañón en Puerto Carreño Vichada. Revista Científica Agroecosistemas. 8 (3), 13 – 21.
- Trox, J.; Vadivel, W.; Vetter, W.; Stuetz, V.; Scherbaum, U.; Gola, et al. **2010**. Bioactive compounds in cashew nut (*Anacardium occidentale* L.) kernels: effect of different shelling methods. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 58, 5341–5346. DOI: 10.1021/jf904580k
- Volke, H.; Etchevers J. **1994**. Recomendaciones de fertilización de cultivos: necesidades y perspectivas de una mayor precisión. Cuaderno de

Edafología 21. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

Yacoub, A.; Djerbi, A.; Fen-Chong, T. **2018**. Water absorption in recycled sand: New experimental methods to estimate the water saturation degree and kinetic filling during mortar mixing. *Construction and Building Materials*. 158 (15), 464-471. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.023

Yadukumar, N.; Rejani, R. **2008**. Soil And Water management in cashew plantations. National Research Centre for Cashew.

Zekarias, T.; Basa, B.; Herago, T. **2019**. Medicinal, nutritional, and anti-nutritional properties of cassava (*Manihot esculenta* Crantz): A review. *Academic Journal of Nutrition*. 8 (3), 34 - 46. DOI: 10.5829/idosi.aj.2019.34.46

Zhang, X.; Davidson, E.; Zou, T.; Lassaletta, L.; Quan, Z.; Li, T.; Zhang, W. **2020**. Quantifying nutrient budgets for sustainable nutrient management. *Glob. Biogeochem*. 34. DOI: 10.1029/2018GB006060

Capítulo 5.

Agroindustria de la yuca y marañón: Enfoque hacia la producción de biomateriales.

5.1.- Introducción.

La idea de innovación es un tema importante que incentiva a la investigación de la industria hacia un crecimiento económico y prolongación a largo plazo en la sostenibilidad de las inversiones, lo que lleva a aumentar el consumo de los recursos y a su vez el incremento de los materiales industriales para acelerar la producción y consumo de los mismos (Van Hoof et al., 2020), por esto se han implementado nuevos métodos para garantizar la innovación para la producción a gran escala a nivel mundial (Betoret et al., 2015). En este recorrido de la investigación y búsqueda de nuevos materiales a partir de materias primas renovables y autosustentables, se ha encontrado como posible alternativa la transformación los subproductos del cultivo de yuca y el marañón, con el fin de disminuir la explotación de combustibles fósiles y derivados de los mismos (Tumwesigye et al., 2016), debido a que en la cosecha de estos cultivos se genera gran cantidad de desechos como cáscara, pulpa, aguas residuales y hojas, entre otros. Sin embargo, a estos residuos se les puede realizar un tratamiento específico para transformarlos en biomateriales que pueden ser utilizados para cubrir

Cite as: A.A. Arrieta, E.M. Combatt, M. Palencia. 2024. Agroindustria de la yuca y marañón: Enfoque hacia la producción de biomateriales. En: Á.Á. Arrieta, E.M. Combatt, M. Palencia. Materiales poliméricos funcionales basados en productos de la agroindustria: Yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y Marañón (*Anacardium occidentale* L.). MT-Pallantia Publisher s.a.s., Cali - Colombia. pp. 167-210. DOI: 10.34294/b.001.c5.2024.03.

una amplia gama de tecnologías de procesamiento de bajo costo (Betoret et al., 2015). Por lo cual, en los últimos años se ha visto un incremento tanto en los cultivos de yuca industrial y marañón, no solo en Córdoba sino a nivel mundial. De igual forma, el departamento de Sucre es considerado uno de los más importantes en la producción este tubérculo, debido a que representó para el año 2017 el 81,3 % del área total cultivada de yuca, frente al 18,7 % del área cultivada de yuca industrial (Mendoza et al., 2019). Por lo cual, el crecimiento de la producción de yuca en el año 2021 presentó un rendimiento de 65.993 toneladas, lo que representa el 30% de la producción a nivel nacional, en un área de 12.000 hectáreas (MADR, 2019), generando un impacto positivo en la producción del cultivo de yuca para los agricultores, ya que los tubérculos que son formados a partir de la raíz, son más utilizados en el proceso y transformación en subproductos para la agroindustria como es el caso de los salvados para animales a partir de la harina seca y almidón.

Por otra parte, en los años de 1995 y 1998, Colombia incremento la iniciativa del cultivo de marañón, siendo así que para el año 2016, el departamento del Vichada ya contaba con 3000 ha de producción, utilizando clones proporcionados por AGROSAVIA (Arango et al., 2016). Según Van Hoof et al., (2020) a inicios del año 2021, esa cifra aumento exponencialmente dando como resultados para la región del Vichada una producción de 7000 – 8000 ha de cultivo, siendo favorable ya que muestran un incremento en la producción anual, convirtiendo esta región en el mayor productor de marañón en Colombia. El buen rendimiento de estos cultivos depende especialmente de las condiciones agroclimáticas del terreno, por lo cual, a nivel nacional los departamentos con mayor potencial gracias a sus condiciones ambientales y extensión de tierras para cultivar el marañón son: Atlántico, Magdalena, Bolívar, Córdoba, Sucre y Cesar, debido a que tienen suelos óptimos y condiciones climáticas apropiadas para la siembra del cultivo de marañón (MADR, 2019). Por consiguiente, Córdoba es la segunda región con mayor producción de marañón después del Vichada, aportando una producción de 2050 ha, lo que equivale al 25,6% de la producción total nacional, sin dejar a un lado la producción anual del departamento de Sucre con 160 ha, correspondientes al 2,0 % de la producción total (Corporación

Colombiana de Investigación Agropecuaria, 2016; Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1997). Además, el departamento de Córdoba fue catalogado por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria como idóneo para este cultivo porque cuenta con excelentes condiciones agroclimáticas y edáficas del país para incrementar los rendimientos y optimizar la calidad del fruto obtenido de marañón (SIOC, 2018).

Por otro lado, el cultivo de marañón, además de su delicioso fruto, aporta un subproducto proveniente de la cáscara, el cual es un líquido viscoso de color negro a marrón rojizo que se encuentra dentro de la cáscara del anacardo. Según la investigación realizada por Rodríguez et al. (2011), el aceite proveniente de la cáscara de marañón es considerado como un recurso natural y potencialmente económico como método de extracción para las cooperativas marañoneras. Este líquido está constituido principalmente por fenoles como el cardol, cardanol y ácido anacárdico, compuestos apetecidos por las industrias petroquímicas, ya que puede ser utilizado como derivado fenólico para su uso en la fabricación de polímeros utilizados en la producción de láminas, pinturas, adhesivos y plásticos (Vit, 2003). Sin embargo, el líquido de la cáscara del marañón está compuesto alrededor de un 80-90 % de ácido anacárdico y 10 - 20 % de cardoles, por lo cual, los ácidos anacárdicos son característicos por tener alta actividad farmacológica como antitumoral y antifúngico. Además, la composición química del fruto es ampliamente utilizada en el campo de la medicina como materia prima para producir fármacos de liberación controlada, aunque también se utiliza para desarrollar otros productos en el área de la alimentación (Dos Santos et., 2022).

Los subproductos de estas dos materias primas son importantes desde el punto de vista industrial, ya que pueden procesarse para formar diversos compuestos como los biopolímeros, hidrogeles y membranas, haciendo que el proceso y la obtención de estos productos sean de bajo costo y amigables con el medio ambiente (Sharma et al., 2020). El objetivo de este capítulo fue realizar una investigación sobre las innovaciones en biomateriales utilizando como materia prima la yuca y marañón, ya que son renovables y

biodegradables, contribuyendo a la transformación de los cultivos en la agroindustria. Además, se hizo un enfoque especial en los productos y subproductos derivados, teniendo en cuenta, su composición química y estructural para determinar su potencial en la producción de alimentos, suplementos y sistemas de envasado (Tumwesigye et al., 2016).

5.2.- Agroindustria de la yuca.

El consumo de los tubérculos del cultivo de yuca ha crecido exponencialmente con el paso de los años, presentando un mayor desarrollo en cuanto a la producción en los trópicos y regiones subtropicales de todo el mundo. Por tal razón, es viable este cultivo para el desarrollo productivo y económico, debido a su composición química, nutricional y estructural, que permite darle un enfoque diferente a su uso como materia prima de biomateriales, nutrición animal y derivados alimenticios (Meza y Julca, 2015). Además, el alto contenido de almidón en sus raíces y la carga de minerales y vitaminas de sus hojas han permitido su explotación como fuente de almidón, recurso nutricional, y aportes en diferentes países en desarrollo, principalmente en África, Asia, y América Latina (Sánchez et al., 2009).

Por otra parte, la principal característica de la planta de yuca es su raíz, la cual es muy apetecida por las familias de muchas regiones, en la cual se acumulan diferentes componentes que le permiten a la planta almacenar energía y transformarla en compuestos que le dan características especiales para su consumo (Bernal et al., 2017). La pulpa es apetecida a pesar de que es dura y llena de fibras en toda su estructura. Además, contiene muchos hidratos de carbono, azúcares, y presenta una característica muy marcada que es la oxidación cuando se le retira la cáscara. Cabe recalcar que, en muchas regiones, consideran la cáscara como desecho porque presenta características de dureza, ser leñosa y no comestible por su sabor amargo (Sánchez et al., 2009).

En la **Tabla 5.1** se encuentra la composición del tubérculo de yuca según lo informado por diferentes autores.

Tabla 5.1. Composición química porcentual del tubérculo de yuca (Sánchez et al., 2009; Tumwesigye et al., 2016).

Amilosa	Proteína	Azúcar	Ceniza	Grasa
20,7	0,49	3,8	0,24	0,13
16 – 20	0,05–0,28	-	0,12–0,33	0,04–0,38
20,6–21	0,59–0,63	-	0,32–0,66	-

La producción total del tubérculo de yuca a nivel nacional se divide en dos sectores, donde un 94,4 % es directamente para consumo humano, mientras que el 5,6 % restante de la producción es destinado a la industrialización (Parra, 2020). Esto es debido a que la escala de producción es pequeña de un 85 %, puesto que solo se cultiva en áreas menores de 10 ha, con técnicas de cultivo tradicionales y poca intervención tecnificada; la mayor área de estos cultivos se lleva a cabo en tierras arrendadas que generan en promedio 53 jornales por hectárea de yuca industrial o amarga, mientras que el cultivo de yuca dulce o fresca genera 40 jornales por hectárea de trabajo (MADR, 2019). No obstante, se ha aumentado la superficie de siembra en Colombia, superando los bajos rendimientos de producción, de tal forma que para el año 2020 se sembraron 218.521 ha para una producción nacional de 2.481.183 toneladas de las cuales cada año se producen cerca de 60 millones de toneladas de almidón que provienen de diferentes cultivos a nivel global, donde el 10 % se obtiene de la raíz de yuca (FAOSTAT, 2022). De acuerdo con Diaz et al. (2021) los tubérculos del cultivo de yuca son la cuarta fuente de alimentación debido a la gran cantidad de calorías que le puede aportar a la dieta diaria de la población humana, convirtiendo estos tubérculos en parte esencial de los cultivos de pan coger de muchas familias en todos los departamentos de Colombia, sin embargo, este tipo de cultivo no es del todo limpio ya que deja gran cantidad de desechos una vez es recolectada la producción por parte de los agricultores, los cuales pueden ser aprovechados para la alimentación de animales (MADR, 2019), y de acuerdo con DNP (2016) se estima que el 25 % de los 9,76 millones de toneladas de raíces y tubérculos son desperdiciados por gran parte de la población agricultura del país.

De acuerdo con [Vargas y Pérez \(2018\)](#) en el proceso de industrialización de la actividad agrícola, con el fin de producir un mayor valor agregado se genera una gran cantidad de residuos que son desechados, a los cuales no se les brinda manejo adecuado para su degradación natural, ya que son dejados al aire libre en cualquier zona destapada, lo que ocasiona el deterioro de la calidad del medio ambiente. Por lo tanto, se están explorando nuevos desafíos en las industrias alimenticia, farmacéutica, textil, química, de construcción y biotecnológicas de transformar estos residuos en biosorbentes, coagulantes y obtención de nanofibras a partir de celulosa de los mismos, además de la extracción de biomasa para el tratamiento de aguas contaminadas y especialmente en la agrícola, donde utilizan los productos derivados del tubérculo de yuca como una forma de recubrimiento en la producción de fertilizantes para que sean más eficientes y de lenta solubilidad durante la aplicación para disminuir la pérdida de nutrientes en el suelo, convirtiendo así el biopolímero derivado de yuca en una alternativa que busca reducir el riesgo de contaminación ([Wicaksono et al., 2013](#); [Torres et al., 2010](#)). Además, se han estado realizando investigaciones para la elaboración de biopolímeros biodegradables a base de almidón que no solo sirvan como mecanismo de liberación lenta de fertilizantes, sino que puedan convertirse en nutrientes en el ciclo de vida de muchos microorganismos, teniendo en cuenta su capacidad de interacción con el medio ambiente, de tal forma que se convertiría en abono orgánico para el suelo ([Nafchi et al., 2013](#)).

5.2.1.- Productos derivados de la yuca.

La yuca (*Manihot esculenta* Crantz) tiene gran importancia en la bioeconomía por su alto contenido de almidón que es utilizado para producir bioetanol, bioquímicos y biomaterial, además, es de gran aplicación en diferentes industrias ([Gao et al., 2020](#)). Un punto a favor de estos cultivos de yuca, en comparación con otros tubérculos, es la habilidad para crecer en suelos ácidos con poca fertilidad, limitada frecuencia de lluvias y largos periodos de sequía ([Aristizábal et al., 2007](#)). También, se pueden encontrar diferentes variedades que son aptas para producción industrial, de las cuales se derivan diferentes subproductos para el desarrollo de materiales y el tipo

de yuca dulce que es para consumo humano directo, entre otros usos (CIAT, 2019). Por otro lado, los productos y subproductos derivados de la yuca pueden tener diferentes usos y valores agregados dependiendo del tipo de industria empleada, el principal producto obtenido de este cultivo es la raíz para consumo directo. Las raíces de yuca tienen un alto contenido energético, ya que su aporte para el consumo humano es de 43 kcal/p/d en promedio, esto varía dependiendo del país y la costumbre alimenticia, por ejemplo, en países africanos supera las 300 kcal/p/d a diferencia de Colombia que es de 67 kcal/p/d (FAOSTAF, 2022).

5.2.1.1. - Productos alimenticios.

Entre los principales productos y subproductos de yuca se encuentran los que abarcan la alimentación humana, debido a que sus usos culinarios son muy diversos, por lo cual, Colombia tiene una amplia gastronomía a base de yuca como son las tortas, buñuelos, rosquitas, harinas, snacks, croquetas y arepas precocidas que son congeladas, enyucado, carimañolas, diabolines, bollo de yuca y casabe, entre otros productos típicos; los tubérculos de yuca se deben consumir cocidos, fritos o asados, ya que no se pueden consumir crudos porque son ricos en ácido cianhídrico que provocan vómitos e incluso la muerte en cuestión de horas (Gao et al. 2020). La harina de yuca, es otro subproducto de gran uso en la industria de la panificación, porque al ser mezclada con la harina de trigo, se puede fabricar galletas, pan, pastas, relleno de carnes frías, espesantes, condimentos, entre otros. En cuanto a su composición química es apetecida por la industria de la panadería porque puede reemplazar un 15 % de la composición de la harina de trigo sin que haya diferencia alguna, estas características se pueden observar en la **Tabla 5.2**, donde se muestran las diferencias de composición (Aguilera, 2011).

El almidón es un subproducto apetecido por diferentes industrias desde el ámbito alimenticio, textil, farmacéutico, construcción entre otros, debido a sus propiedades de adaptación a muchos procesos de producción, lo que conlleva a realizar estudios para su desarrollo en el mercado de la ciencia y tecnología. Según Ojeda et al. (2021), además, presenta una constitución química que le dan unas características especiales para ser utilizado en diferentes campos, como su viscosidad, resistencia al esfuerzo cortante y

resistencia a la congelación, y debido a estas características se pueden producir diferentes productos a base de almidón como: almidón no modificado o nativo, almidones con modificaciones físicas, químicas o biológicas en su estructura y edulcorantes.

Tabla 5.2. Características fisicoquímicas de las harinas de yuca y trigo (adaptado de [Aguilera, 2011](#)).

Parámetro	Harina de yuca	Harina de trigo
Humedad (%)	8,4	11,0
Materia seca (%)	91,6	89,0
Almidón (%)	87,4	69,0
Proteína (%)	1,3	14,0
Fibra (%)	1,2	0,9
Cenizas (%)	1,1	0,7
Ácido cianhídrico (ppm)	13,0	-
Azúcares (%)	1,4	0,9
Amilosa (%)	12,3	13,9
Amilopectina (%)	87,7	86,1
Absorción de agua (g)	4,1	3,1
Solubilidad (%)	8,8	13,3

De acuerdo con [Westby et al. \(2002\)](#), este material se obtiene básicamente cuando se rompen las paredes celulares de los tubérculos, las cuales permiten la liberación de las partículas que se extraen mediante un proceso de liberación controlada con agua para luego filtrar y así obtener el líquido que es una mezcla de agua/almidón, y el proceso de separación se da por decantación, obteniendo un sedimentado que contiene las partículas de almidón y posteriormente se somete a secado para ser molido y utilizado en distintos procesos industriales. En investigaciones realizadas por [Pérez y Bertoft \(2010\)](#), fue encontrado que el contenido de almidón puede variar dependiendo del contenido de materia seca y espesor de piel, el rendimiento también depende de las condiciones de secado, ya que cuando se utiliza un horno rinde más que secado al sol. Además, otro factor es el tiempo de cosecha y el almacenamiento de la raíz, debido a que un mayor tiempo de almacenamiento disminuye el contenido de almidón. De igual forma, las condiciones ambientales también son determinantes, cuanto más largo sea

el período de lluvia, mayor será el contenido de almidón de las raíces de yuca en una misma variedad (Olomo y Ajibola, 2003).

5.2.1.2. - Productos no alimenticios.

En las industrias no alimentarias, el almidón es transformado en una gran variedad de productos como adhesivos, estampillas, recubrimiento de papel, pañales, aglutinante, etiquetas; se utiliza como adhesivo para unir las cabezas de los fósforos, pegante para núcleos de fundición; en cuanto a la industria farmacéutica es utilizado para fabricar los recubrimientos de las cápsulas y tabletas, en textiles es utilizado para realizar estampados y acabados en las telas finas (Mathew et al., 2002). También, tiene grandes usos en la industria de cosméticos y agrícola, ya que se utiliza como ingrediente activo para la fabricación de cremas, maquillajes, jabones, detergentes, germicidas, fungicidas, insecticidas, absorbente en artículos de limpieza donde cumple la función de tensoactivo para aumentar la formación y estabilización de la espuma, es biodegradable; por lo cual se puede utilizar para formar películas de plásticos biodegradables, entre otros (Andersen et al., 2001).

Por otro lado, este almidón al clasificarse como agrio, debido a que puede fermentarse, le confiere propiedades codiciadas a los alimentos y el almidón dulce es preferido en la industria por su semicristalinidad donde la amilopectina es el principal componente (Trujillo, 2014). Por estas características, es un ingrediente principal en las industrias cerveceras, ya que la adición como componente, le da un valor agregado al producto original, debido a que no cambia sus propiedades y tampoco altera los ingredientes iniciales en la fabricación de la cerveza tradicional, además, de crear un impacto socioeconómico en cuanto al aumento de ingresos de los agricultores (Amazonas, 2014).

El líquido que se extrae de la yuca, rico en almidón, es fermentado utilizando un tipo de levadura común en combinación con un medio de cultivo bacteriano durante cuatro días para obtener el etanol mediante un proceso de destilación y poder determinar el rendimiento de producción (Amutha et al., 2001). Según la investigación realizada por FAO, 2006, de

estos procesos de obtención de etanol a partir de yuca, se esperaría obtener una producción de 280 litros de etanol al 96 %, a partir de una tonelada de yuca con un contenido de 30 % en su composición de almidón. En Colombia la producción de litros de alcohol por hectárea de producto es de 200 litros a partir de una tonelada de yuca, mientras que en caña de azúcar se obtienen 75 litros de etanol a partir de una tonelada. En términos generales, el rendimiento en litros por hectárea por año empleando caña de azúcar es de 4900 L ha⁻¹ año⁻¹, mientras que en yuca es de 6000 L ha⁻¹ año⁻¹ demostrando el alto potencial de la yuca para producir alcohol carburante (Jansson et ál., 2009). Otra característica de importancia para la utilización de la yuca en la producción de bioetanol es el impacto social, económico y ambiental que puede generar, mientras que la misma producción utilizando cultivos de maíz, puede generar un empleo por cada 2,43 ha y en cultivos de yuca se genera la misma cantidad de empleo por cada 1,66 ha (Ministerio de Minas, 2010), lo cual es favorable ya que permite adecuar las condiciones del ámbito rural en Colombia, estimulando el incremento del desarrollo agrícola e incluso promoviendo las comunidades de reemplazar los cultivos ilícitos.

Los polímeros a base de almidón son los más utilizados para la fabricación de biomateriales ya que está compuesto por dos homopolímeros derivados de la glucosa como son la amilosa y la amilopectina en una proporción de 20 – 30 % y 70 – 80 %, respectivamente. Por consiguiente, este polímero de almidón es utilizado para la fabricación de hidrogeles debido a sus propiedades ya que no es tóxico, es biodegradable, biocompatible y renovable (Mishra et al., 2008). Según Kong et al. (2009), cuando se prepara un hidrogel, se somete el polímero en agua para llevarlo a calentamiento con el fin que los gránulos absorban agua hasta cambiar varias veces su tamaño. Una vez la temperatura llega a un punto de 75 °C los gránulos se rompen liberando amilosa y amilopectina, obteniendo el proceso que se denomina gelatinización, el cual continúa cuando pierde calor y llega a temperatura ambiente donde se reorganizan las moléculas para formar la estructura de gel, este proceso se conoce como retrogradación (Kong et al., 2009). Según un estudio realizado por Selim et al. (2000), los hidrogeles de almidón tienen como particularidad que el proceso de ruptura de los gránulos es irreversible, por lo tanto, no cumplen con el concepto de

reversibilidad que caracteriza a los hidrogeles de tipo físico. En la **Figura 5.1**, se observa la forma física de un hidrogel a base de almidón de yuca.

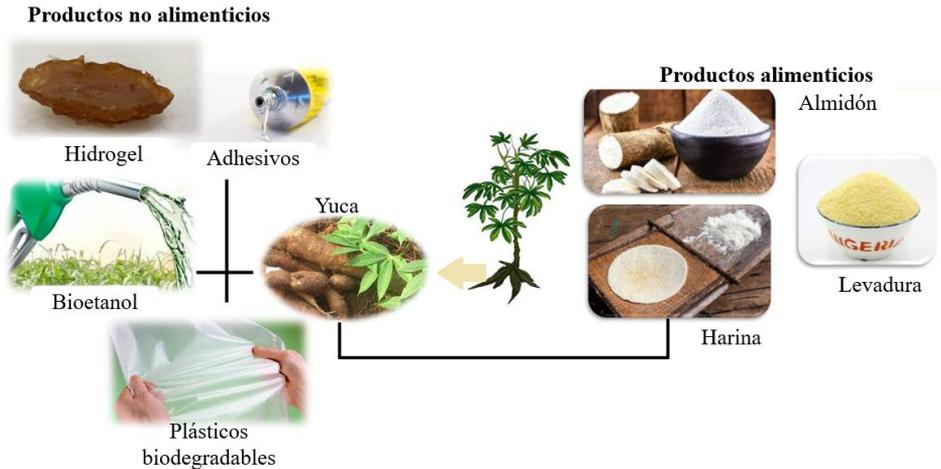


Figura 5.1. Esquema de los subproductos directos de la transformación de la yuca.

5.2.2. - Modificación y funcionalidad del almidón.

Las características fisicoquímicas del almidón, como gelatinización, retrogradación, estabilidad térmica, solubilidad, transmitancia, color, textura, etc., son apropiadas para crear tipos de almidones con modificaciones especiales para usos industriales (Pacheco y Techeira, 2009). Debido a que la industria alimentaria es muy específica y exigente con los controles de calidad y seguridad de los residuos químicos, no todos los subproductos biodegradables se usan en la industria (Guerrero et al., 2015). Generalmente, la funcionalidad de los almidones modificados en los alimentos es la adhesión y su uso aglutinante en frituras empanizadas, carnes frías y condimentos para snacks; como polvo colorante para chicles y productos de panadería; como revestimiento para snacks fritos, sustituto de grasas, espesante de helados y aderezos, agente encapsulante para el sabor de las bebidas, emulsificante, cremas, productos enlatados, agente gelificante para pastillas, entre otros (Peñaranda et al., 2008). Algunos de los

procesos químicos para lograr la modificación de los almidones y su utilidad en alimentos se explican en la **Tabla 5.3**.

Tabla 5.3. Estrategias de modificación del almidón y sus aplicaciones fundamentales.

Modificación	Producto	Función y aplicación	Referencias
Hidrólisis ácida	Almidón hidrolizado, diluidos con ácido y punto de ebullición ligero.	Menor viscosidad de la pasta caliente, gelificación mejorada, modificación estructural y se utilizan en chicles, pastillas, jaleas.	Peñaranda et al., 2008
Hidrólisis ácida	Almidón dextrinizado	Mayor solubilidad y estabilidad del gel, menor viscosidad, modificación de propiedades emulsificantes. Su principal uso es encapsular sabores en condimentos.	Shuren, 2000
Hidrólisis básica	Almidón hidrolizado alcalino	Aumentar la viscosidad.	Maher, 1983
Oxidación con hipoclorito	Almidón oxidado	Menor viscosidad, gránulos más blancos, alta claridad de la pasta, estabilidad a bajas temperaturas y adhesión. Se utiliza como aglutinante, revestimiento crujiente en alimentos fritos, texturizador en productos lácteos.	Korma et al., 2016
Almidón pregelatinizado	-	Mayor solubilidad y coagulación en agua fría, se utiliza en sopas instantáneas, salsas, aderezos, entre otros.	Peñaranda et al., 2008; Korma et al., 2016

Por otra parte, [Ibarra \(2018\)](#) indica que, para tratar de mitigar el impacto ambiental generado por la explotación de combustibles fósiles, se han realizado estudios para encontrar recursos sostenibles y renovables mediante procesos biológicos o bioquímicos con el fin de obtener bioproductos con alto potencial en diversas aplicaciones industriales como son las biopelículas, envases, fibras, adhesivos e hidrogeles por ser altamente biodegradables. Según [Piyachomkwan y Tanticharoen \(2011\)](#), cuando se utiliza el almidón para crear un biomaterial se puede utilizar como monómero o polímero natural, además, el almidón en forma de polímero presenta ventajas ya que es de bajo costo, renovable y biodegradable. Sin embargo, el almidón como polímero presenta una mínima desventaja en comparación con los polímeros a base de petróleo ya que es más hidrófilo y presenta pocas propiedades mecánicas.

5.2.2.1. - Propiedades de una película polimérica.

Las películas poliméricas presentan propiedades específicas que lo determinan para su uso industrial, una de ellas es la transparencia. [Tumwesigye et al. \(2016\)](#) en su investigación reportó que las películas a base de almidón presentan un porcentaje de transparencia de 3,6 % que es bajo, comparado con otras películas como Mercial NatureFlex con 4,6 % y Polylactide con 3,9 % (ver **Tabla 5.4.**). Los valores de transparencia bajo tienden a cero, mientras que los altos se aproximan al 100 %, y este porcentaje de transparencia es determinado por transmisión espectrofotométrica e índice de luminosidad cromática respectivamente, lo cual hace que se observe mayor transparencia como se observa en **Figura 5.2A**), estas películas transparentes son importantes en diferentes usos especialmente en empaques donde se requiere que los productos en la cadena de distribución sean vistos por los compradores. Según [Tumwesigye et al. \(2016\)](#) los subproductos provenientes de biopolímeros de yuca son capaces de convertir películas solubles en agua y resistentes que pueden ser usados para el envasado de productos frescos y alimentos, actuando como una bolsa de transporte de productos resistente al agua.

Por otro lado, las películas poliméricas tienen superficies homogéneas, que se pueden atribuir a la completa solubilización de derivados de

biopolímeros en la matriz polimérica, fuerte adhesión y estructura de red de malla polimérica, estas observaciones se pueden evidenciar en las **Figuras 2B) y 2C)**.

Tabla 5.4. Propiedades porcentuales de las películas poliméricas a base de almidón de yuca nativo (Tumwesigye et al., 2016).

Propiedad	Película de almidón de yuca	Película de PLA comercial
Humedad	0,19 - 0,45	0,10 - 0,20
Solubilidad	15,52 - 30,54	0,00
Transparencia	3,0 - 5,0	3,0 - 5,0
Cristalinidad	50,5 - 59,5	10,0 - 15,0
Biodegradabilidad (días)	20 - 100	40 - 50



Figura 5.2. A) Forma estructural de una película a base de almidón; B) bolsa de transporte; C) imagen estructural de malla revelada mediante un microscopio de barrido (adaptado de Tumwesigye et al., 2016).

5.2.3. - Fertilizantes de lenta solubilidad a base de polímero natural.

La principal importancia de las industrias de fertilizantes se basa en crear nuevos productos que contribuyan a disminuir o evitar la contaminación ambiental. Por lo cual, han desarrollado fertilizantes de lenta liberación o controlada, los cuales son capaces de potenciar la eficiencia y optimizar el aprovechamiento de los recursos disponibles y así aumentar su durabilidad en las plantas, lo que es favorable, debido a que su asimilación es más lenta, por lo cual, disminuye la pérdida de los mismos recursos (Shaviv, 2001). Para

demostrar esto, en el año 2005 los autores [González et al. \(2005\)](#), realizaron una microencapsulación de fertilizantes con liberación lenta y controlada a base de plantas marinas, las cuales fueron responsables de aportar los macros y microelementos necesarios para potenciar el resultado ecológico de los fertilizantes. Además, recrearon estudios *in vitro* a los fertilizantes producidos para garantizar su efectividad al momento de la liberación controlada de los nutrientes, lo cual es favorable para garantizar la disminución de la posible contaminación ambiental, ya que se evitan pérdidas por lixiviación que pueden producir comúnmente los fertilizantes convencionales.

Por otro lado, los fertilizantes de lenta solubilidad a base de almidón en forma de hidrogeles presentan características favorables ya que son biodegradables, de bajo costo y mayor retención de agua para el suelo. En la investigación realizada por [Soto y Oliva \(2012\)](#), utilizaron un método innovador para crear fertilizantes de liberación lenta, utilizando la síntesis de radiación *in situ* de hidrogeles monolíticos a base de almidón mezclados con urea mediante el injerto de poliacrilamida, además, analizaron los efectos de la intensidad de irradiación en los hidrogeles con diferentes proporciones de poliacrilamida/almidón. Para la caracterización de los materiales se utilizó espectroscopia de Infrarrojo con Transformada de Fourier, Resonancia Magnética Nuclear, Microscopia Electrónica de Barrido y Reómetro. Con lo cual demostraron las relaciones entre las estructuras y propiedades del hidrogel con la tasa de liberación, mediante Espectroscopia de Infrarrojo con Transformada de Fourier y Resonancia Magnética Nuclear, para mostrar que el almidón y la poliacrilamida injertada se sintetizaron y polimerizaron con éxito mediante radiación *in situ*. Además, mostraron que las morfologías del hidrogel de almidón cambiaron su estructura de algodonoso a poroso, el cambio fue inmediato cuando se le agregó urea, por lo cual los hidrogeles monolíticos a base de almidón mezclados con urea y sintetizados por radiación mostraron un potencial prometedor para ser nuevos fertilizantes de liberación lenta fabricados por el método ecológico, simple y eficiente ([Lin et al., 2012](#); [Soto y oliva, 2012](#)).

5.2.3.1. - Recubrimiento de polímeros con fertilizantes de liberación controlada.

El principal inconveniente para recubrir materiales poliméricos es el grosor de la capa y la técnica utilizada para llevarlo a cabo (Moore, 1986). Las condiciones del suelo como el pH, salinidad, actividad microbiana y potencial redox no afectan el proceso de liberación de los nutrientes por medio de la membrana, lo cual permite que la temperatura y permeabilidad del polímero permanezca constante y la liberación de los nutrientes a través de la membrana sea más lenta y controlada (Shoji, 1992). La composición del material polimérico utilizado para recubrir los fertilizantes puede cambiar cuando la permeabilidad y a la humedad no es controlada adecuadamente, por lo cual el tiempo de duración del recubrimiento podría variar y depende del espesor utilizado. Sin embargo, todos los productos que contengan recubrimientos poliméricos deben especificar en sus indicaciones el tiempo de liberación y la temperatura adecuada para su liberación, con excepción de productos con formulación NPK con compuestos secundarios, a estos no se les especifica el tiempo de liberación, puesto que es complicado determinar la vía de liberación de estos elementos (González, 2004). Además, cuando se hacen recubrimientos con materiales poliméricos biodegradables sobre fertilizantes, ocurren una serie de cambios en la reacción de descomposición fotoquímica que aceleran el proceso en el suelo. No obstante, el uso de polímeros o materiales poliméricos con baja solubilidad y poca degradación no presentan características negativas en su uso, por tal motivo, es utilizado como material sintético en la encapsulación (Goertz, 1993).

Por otro lado, en el estudio realizado por Salimi et al. (2021), utilizaron fertilizantes nitrogenados para demostrar su alta solubilidad en agua y a la vez en la superficie del suelo que entra en contacto directamente con la planta, lo que se convierte en un inconveniente que puede tener solución para evitar las pérdidas de nitrógeno, por lo cual idearon métodos capaces de disminuir la solubilidad en el agua de nitrógeno. Por lo cual, el objetivo de ese estudio fue producir fertilizantes de lenta solubilidad, mediante nanocompuestos de polímeros a base de almidón, con el fin de investigar la eficiencia en el crecimiento y nutrición en un cultivo de tomates. En primer

lugar, según [Salimi et al. \(2021\)](#), sintetizaron dos tipos de fertilizante de urea recubiertos con nanocompuesto de polímero a base de almidón reforzado con nanopartículas de biocarbón (A) y polímero prístino sin nanopartículas (B). En el cual, los resultados mostraron que la presencia de nanopartículas aumenta el tiempo de liberación de urea de la capa de recubrimiento, y se prolongó con el aumento de la cantidad nanopartículas de biocarbón, debido a las interacciones presentes entre el polímero y el relleno. De igual forma la tasa de liberación de nitrógeno de la muestra A, a pH= 2, 6 y 10, disminuyó respectivamente 49, 46, 18,52 y 45,13 % a diferencia de lo observado en la muestra B. Además, la aplicación de fertilizantes de lenta solubilidad aumentó la eficiencia del uso de nitrógeno y recuperación aparente del mismo. Así, la eficiencia del uso de nitrógeno en los tratamientos fertilizantes A y B con un uso de 420 kg/ha se incrementó respectivamente 7 - 85 y 14 - 68 % en comparación con el fertilizante de urea.

5.3. - Marañón.

El marañón es un árbol que posee excelentes propiedades medicinales y nutricionales. Desde hace tiempo, la comunidad amazónica ha usado el ácido anacárdico para tratar heridas, hemorragias y hasta problemas de disfunción eréctil ([Perone, 2012](#)). Hoy en día, se ha demostrado que contiene más de 40 % de grasa y más de 20 % en proteínas y carbohidratos solamente en el fruto, el cual está unido a un pseudotallo o nuez, la cual almacena alrededor del 46 % del aceite con respecto a su peso ([Lafont et al., 2011](#)). El contenido de proteína bruta supera el 10 % en masa seca de hojas, además de presentar altos contenidos de fibra bruta que ayudan a la digestión y flora gastrointestinal de humanos y animales. El polvo de hojas y retoños es rico en ácidos grasos saturados, flavonoides, taninos y polifenoles los cuales poseen propiedades antiinflamatorias, antioxidantes y antibacterianas que ayudan en casos de diarreas o cólicos (ver **Figura 5.3**). Además, el contenido mineralógico tiene concentraciones de manganeso de 500 mg kg⁻¹ junto con sodio y potasio ([Martínez et al., 2012](#)). Por estas y otras características es una fruta altamente consumida en toda América y otros continentes, además de la amplia demanda que tiene en la industria por la obtención de productos alimenticios debido a su buen valor nutritivo ([Alejos et al., 2022](#)). Así mismo, es un cultivo muy resistente al ataque de plagas y enfermedades cuando se

encuentra en estado silvestre; a pesar de diversos estudios realizados a este cultivo aún no se han reportado insectos o ácaros que puedan interferir en la reproducción de este. Sin embargo, no está excepto de contraer enfermedades como la antracnosis producida por el hongo *Colletotrichum gloesporioides*, la cual se produce cuando el cultivo se da en zonas húmedas, sin ninguna estación seca. Dicho hongo principalmente se propaga en las hojas nuevas, flores, frutos y manzanas (McLaughlin et al., 2018). También, es una planta que se adaptada a condiciones adversas, pudiendo coexistir con varias especies de plantas y animales, por lo cual es considerada gran potencial para el incremento de los sistemas agroecológicos de la mano con la sostenibilidad ambiental (Orduz y Rodríguez, 2022).

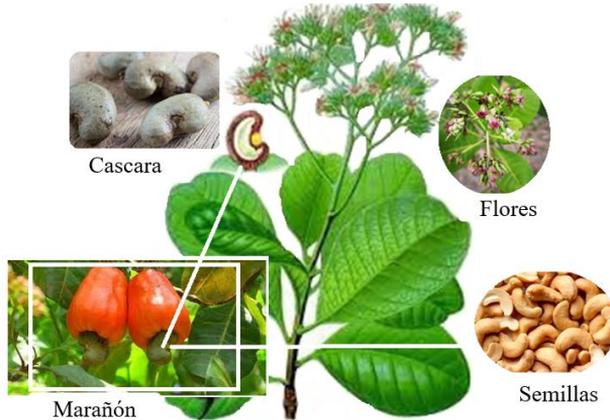


Figura 5.3. Composición de la semilla de marañón.

5.3.1. - Producción agroindustrial.

El marañón, en el campo industrial, está todavía muy limitado a la producción de almendras enteras y saladas, dejando así más alternativas de uso y comercialización, además los subproductos provenientes del fruto del marañón también pueden agregar un valor importante a la industria como lo es el líquido que se extrae de la cáscara que recubre la nuez y la pulpa del fruto (de Sousa et al., 2016). Además, la agroindustria del marañón es diversa e involucra varios campos en sus diversos productos. Sin embargo,

la industrialización se puede dividir en dos segmentos: transformación de la nuez y pulpa (Alejos et al., 2022).

Este procesamiento de separación se realiza generalmente por sistemas mecanizados que manejan las grandes fábricas, aunque también existen unos gremios clasificados como micro, pequeñas producciones caseras, cooperativas y asociaciones de productores que pueden procesar hasta una tonelada/día. Estos gremios representan un 23 % en la producción mundial, es decir, para producir un kilogramo de almendras se necesitan 4,35 kg de frutos secos crudos (Orduz y Rodríguez, 2022). La calidad del producto obtenido es un factor importante en distribución de precios de las almendras enteras, totalmente peladas, con un color blanco o marfil pálido, sin manchas, convirtiéndose en el principal objetivo de la industria transformadora del marañón. Por tal razón, es prioridad incrementar el potencial industrial y su constancia a través de los años, implementando una política para expandir y mejorar el cultivo del marañón y aumentar la oferta de materia prima. Por consiguiente, estas acciones solo aportan resultados a mediano plazo, y una alternativa inmediata a considerar es la importación de marañón para su transformación en industrias. No cabe duda de que los agronegocios son una excelente estrategia para el desarrollo, siendo de gran importancia y son elementos fundamentales para el desarrollo socioeconómico mundial o local (Alejos et al., 2022).

5.3.2. - Producción mundial y nacional.

La mayor producción de marañón se cultiva en países del tercer mundo, incluidos India, Brasil, Mozambique, Tanzania y Kenia son los más representativos. En cuanto al proceso de obtención de las nueces se concentran prácticamente en India y Brasil, estos dos países fueron responsables, respectivamente, del 67,4 y el 27 % de las exportaciones en los mercados mundiales de marañón, es decir, en conjunto exportaron el 94,5 % del volumen negociado en el período (Mattison et al., 2018). Por otro lado, el consumo de este producto se da en países de altos ingresos, de los cuales Estados Unidos (mayor importador y consumidor mundial) y algunos países europeos son los principales consumidores concentrando en conjunto el 78

% del total en 2004, el resto repartido entre Australia, Japón, Canadá, China y Singapur (Jeyavishnu et al., 2021).

En Colombia, el marañón ha ganado reconocimiento y espacio como especie alternativa en algunas regiones del país por lo cual [Orduz y Rodríguez \(2022\)](#), en una de sus investigaciones menciona que hay dos regiones importantes para la producción como son la costa atlántica y la altillanura, específicamente en el departamento del Vichada, donde debería ser considerado implementar diferentes mercados tecnológicos. Además, la producción de este cultivo en Colombia presenta limitantes debido a que solo el 60 % de toda el área cultivada produce 100 kg/ha de nuez porque no realizan un manejo tecnificado a los cultivos, y con un manejo tecnificado se podrían superar 1000 kg/ha. Es así que en Colombia en el departamento del Vichada modifican genéticamente los cultivos y siguen las recomendaciones propuestas por AGROSAVIA para este tipo de cultivo en las condiciones ambientales de esa región y obtienen altos rendimientos ([FAOSTAT, 2022](#)). Según [Van Hoof et al. \(2020\)](#) los cultivos de marañón en Colombia comenzaron a implementarse alrededor de 1963 por medio de las autoridades del Ministerio de Agricultura con el establecimiento de semilleros en los departamentos de Meta, Cauca y Magdalena, las principales fuentes de recursos que proveía las semillas para la siembra eran Fundación y Ciénaga- Magdalena; con el paso de los años al ver el buen rendimiento de estos cultivos el Instituto Colombiano de la Reforma Agraria (INCORA) decide expandir estos cultivos hacia la región de Norte de Santander, siguiendo la técnica de cultivos intercalados y posible expansión hacia Tolima, Huila, Magdalena y Meta.

5.3.2.1. - Procesamiento

El procesamiento de los anacardos consiste en obtener la mayor cantidad posible de la almendra cuando es separada de la cáscara, por ser un producto alimenticio se debe tener en cuenta todas las medidas de higiene necesaria, debido a que es un proceso de extracción manual que podría interferir en su sabor natural para el caso de las empresas de procesamiento a pequeña escala, mientras que, las instalaciones de procesamiento a gran escala se ha convertido en operaciones mecanizadas ([Okoye et al., 2017](#)). No obstante, el

proceso de separación de la almendra de marañón es una actividad de bajo costo sin necesidad de utilizar altas tecnologías, debido a que utilizan mano de obra, por la cual, la rentabilidad de este método de extracción depende de la cantidad de almendras que son extraídas sin romperse o dañarse; a lo largo de los años, este ha sido el método más rentable para solucionar ese inconveniente, ya que la tecnología aún no ha podido brindar una solución oportuna y viable a ese percance comercial (Fitzpatrick, 2011). Por tal razón, la industria brasileña implemento un proceso diferente con máquinas mecanizadas, pero, ese tipo de procesamiento se caracteriza por altos costos operativos, niveles de inversión que no garantizan que las almendras salgan enteras y salarios más altos que en otros países productores de marañón (Pivaa et al., 2009). Por otro lado, en los países africanos, a pesar de contar con la tecnología necesaria para facilitar y acelerar la producción para obtener un rendimiento notable por el equipo de procesamiento, no procesan el marañón a gran escala debido a interferencias con la política laboral que afectaría a los trabajadores (Fitzpatrick, 2011).

5.3.3. - Subproductos del marañón.

Los subproductos más comunes obtenidos del anacardo son el vinagre de la pulpa, mermelada, chutney, encurtidos y una amplia variedad de refrescos, debido a que el jugo de la pulpa de marañón se puede fermentar para producir licor, especialmente en la India es una bebida tradicional conocido como Fneni, puede tener un contenido de alcohol del 40 % v/v (Desai et al., 2012). Sin embargo, el residuo de marañón que queda después de la extracción del jugo es una mezcla nutricional porque tiene altos contenidos de proteína, grasa, fibra cruda y pectina con porcentajes de 4, 8, 9 y 10 % respectivamente. Estas características del residuo de la pulpa la vuelven codiciada por las industrias de alimentos ya que se puede transformar en suplemento de alimentos para animales (Prommajak et al., 2014). Por otro lado, en una investigación realizada por Akinwale (2000), mostró que esos residuos de la pulpa de marañón tienen contenidos de flavonoides, fenoles, compuestos volátiles, antioxidantes, carotenoides y ácido ascórbico, lo cual es favorable para utilizar el anacardo como alimento funcional en formulaciones y suplementos dietéticos.

La cáscara del marañón contiene un aceite negro y viscoso que comenzó a tener importancia mediante un enfoque científico, la llamada química verde. El líquido de la cáscara de marañón es un residuo que no debe desecharse en la naturaleza, ya que terminó convirtiéndose en un motor de curiosidad científica para el descubrimiento de diversas aplicaciones del líquido, en la conversión de larvicida hasta barniz, pasando por el uso en sensores electroquímicos (Irigaray et al., 2020).

El contenido de ese líquido en la cáscara de marañón es alrededor del 25 %, es de color negro (ver **Figura 5.4**), dentro de la composición tienen sustancias como el 2- metil cardol, cardol, cardanol y el ácido anacárdico, este líquido es considerado una de las fuentes más ricas de compuestos orgánicos característicos del petróleo y carbón como son los fenoles que se encargan de proporcionar características específicas en su estructura, como el olor, entre otros. Además, este líquido se puede considerar como una alternativa renovable a los derivados del petróleo, puesto que, se puede utilizar en pinturas anticorrosivas, materiales impermeables y revestimientos de superficies, de tal forma que tiene potencial en la producción de tensioactivos, que son sustancias que se encuentran en los productos de limpieza, como los detergentes. Por tal razón, si se produce a gran escala el líquido de la cáscara de marañón, se podrían obtener grandes cantidades de flavonoides y fenoles con importantes efectos biológicos para la salud humana por sus propiedades antiinflamatorias, antihemorrágicas, antialérgicas, antioxidantes e incluso contra el cáncer (Göncüoğlu y Gökmen, 2017).



Figura 5.4. Líquido de la cáscara de marañón.

En otro estudio realizado por [De paula y Rodrigues \(1995\)](#), se encontró que a partir de marañón también se puede obtener una goma que está compuesta por un heteropolisacárido ácido que es sintetizado en las células epiteliales y es secretado a lo largo de la corteza del anacardo. Sin embargo, investigaciones recientes revelaron que la productividad promedio de goma de marañón de los anacardos pequeños es de aproximadamente 470 gramos por cada árbol, lo que probablemente sea un aproximado de la producción común ([Dimoso, 2020](#)), con un área cultivada de marañón de cerca de 6 millones de ha en el mundo y una estimación de 208 árboles/ha, según estos datos se podrían producir alrededor de 586,56 mil millones toneladas de goma por año ([FAOSTAT, 2022](#)). En la **Tabla 5.5**, se observa los beneficios que brindan los subproductos del marañón como el jugo, la pulpa, almendra y derivados del líquido de la cáscara.

Tabla 5.5. Beneficios de los subproductos del marañón en el bienestar humano.

Beneficio	Descripción	Referencia
Protección cardiovascular	Son bajos en grasa comparados con otros frutos secos con ácidos grasos mono-insaturados y ácidos grasos poliinsaturados, reducen los niveles de colesterol de lipoproteínas de baja densidad y enfermedades coronarias; también disminuyen la presión arterial con la ayuda del Mg presente en ellos.	Mushumbusi et al., 2020
Protección de los nervios	El Mg presente en los anacardos se almacena en la superficie de los huesos, evitando que el Ca entre en las células nerviosas, manteniendo así los vasos sanguíneos y los músculos relajados.	Pail, 2017
Acción antioxidante	El Se, Cu y Mg presentes en los anacardos actúan como cofactores de muchas enzimas, actuando como elementos antioxidantes.	Aremu et al., 2007
Fuente de vitaminas	Son ricos en vitaminas como la riboflavina, ácido pantoténico, tiamina, niacina, etc. Las cuales protegen al cuerpo contra la anemia sideroblástica y la pelagra.	Akinhanmi et al., 2008

5.3.3.1. - Goma de anacardo.

La goma de anacardo es considerada un biopolímero utilizado para producir nanopartículas (NP) implementando diferentes métodos, siendo la nanoprecipitación la más utilizada. Además, presenta ventajas significativas como bajo costo, biocompatibilidad y autoensamblaje. La técnica de obtención de goma de anacardo más utilizada es la extracción de exudado, la cual consiste en hacer pequeños cortes de lado a lado a la planta con inclinación hacia el suelo (Nayak et al., 2019). La goma de anacardo cruda está compuesta por cantidades significativas de sustancias, fenólicas, proteicas y carbohidratos. Además, la goma de marañón presenta altos contenidos de minerales esenciales, propiedades gastroprotectoras, antiinflamatorias y cicatrizantes (Rodríguez et al., 2008). La composición y las propiedades físicoquímicas de la goma pueden variar según la zona de cultivo y la edad del árbol, en la **Tabla 5.6**, se observa la composición estructural de las gomas provenientes de cuatro regiones de Ghana en comparación con el tiempo de vida de los árboles.

Tabla 5.6. Rangos de variación promedio de la composición de la goma de anacardo cruda proveniente de cuatro regiones diferentes de Ghana (Nayak et al., 2019).

Contenido (%)	Árboles jóvenes	Árboles maduros
Fenol	0,21 a 0,35	1,32 a 0,55
Humedad	9,04 a 12,10	11,01 a 13,49
Materia insoluble	1,72 a 3,66	1,48 a 5,08
Cenizas	1,0	0,5 a 1,49
Proteínas	1,36 a 2,08	1,26 a 1,42

Este líquido al ser de origen biológico le permite formar geles, debido a que tiene propiedades similares a los polímeros sintéticos, dichas gomas son útiles y necesarias en diferentes sectores industriales (Yang, 2003). En la industria alimentaria, la goma de anacardo se utiliza como agente espesante, estabilizador de bebidas o emulsionante de salsas (Mothé et al., 2002). En su más reciente investigación, Mothé y Lannes (2015) encontraron que los productos de chocolate contienen goma de anacardo en su composición, debido a sus propiedades térmicas, reológicas y sensoriales. Dependiendo del tipo de industria se le puede dar un enfoque diferente a su utilización y

propiedades, por ejemplo: en la industria farmacéutica se utiliza para suspender, emulsionar, desintegrar y unir las pastillas de los medicamentos con el fin de controlar la liberación y también como agente gelificante. Por otro lado, [Mothé y Silva \(2005\)](#), mostraron los estudios realizados a la goma de anacardo cuando se utiliza para la reducción de la presión arterial de forma espontánea en ratas, en dicho estudio, observaron una reducción de la presión arterial alrededor del 20 % en las ratas que se alimentaron con goma de anacardo. También, presentaron un decrecimiento del 4 % en la masa ventricular y cardíaca de las ratas tratadas con la goma, lo cual indica que la goma de anacardo puede ser productor o generador de las células cardíacas, lo cual es favorable para retardar la hipertrofia. Además, realizaron el mismo estudio en ratas con sarcoma inducido, donde observaron la actividad antitumoral después del uso de la goma, obteniendo una reducción significativa de los tumores ([Mothé y Calazans, 2008](#)). Otra aplicación favorable de la goma de anacardo es la flotación de minerales, ya que se utiliza como un depresor para proceso de flotación de extracción de mármol y granito, la goma se utiliza en estos procesos porque es de origen orgánico y no contamina en comparación con otros depresores de origen sintético ([Mothé y Oliveira, 2002](#)).

5.3.4. - Marañón como fuente de biomateriales.

El líquido de la cáscara de marañón, además de ser una fuente renovable, biodegradable, económica y abundante, es potencialmente rico en compuestos fenólicos y bioactivos, por lo que se convierte en un agente con alta actividad antioxidante y antimicrobiano, especialmente debido al alto contenido de cardanol presente ([Solano et al., 2018](#)). En este contexto, considerando el atractivo ambiental del líquido de marañón como el enfoque principal de este estudio, así como la importancia del empaque, la sostenibilidad, su potencial para prolongar la vida útil de los alimentos perecederos, han buscado la forma de crear películas bioactivas a base de alginato de sodio enriquecido con el líquido de la cáscara de marañón para encontrar un potencial uso en la industria agroalimentaria como posible sustituto de los envases alimentarios no degradables. Un ejemplo de esa investigación, utilizando alginato de sodio con el líquido para crear películas

de recubrimiento es el sometimiento a diferentes temperaturas para obtener una curva de degradación térmica, se puede observar en la **Figura 5.5**.

Las **Figuras 5.5A** y **5.5B**, representan dos eventos: en el primer evento se observan las curvas termogravimétricas relacionadas con la pérdida de humedad con porcentajes de 26,6; 21,3; 16,6 y 16,7 % en las películas con proporciones de 0; 0,5; 1 y 1,5 % de líquido de marañón respectivamente ([Dendena y Corsi, 2014](#)). En el segundo evento se observa la degradación térmica, donde la temperatura inicial fue similar para todas las películas con valores de 184, 183, 183 y 183 °C con relaciones del líquido de marañón de 0; 0,5; 1 y 1,5 %, respectivamente.

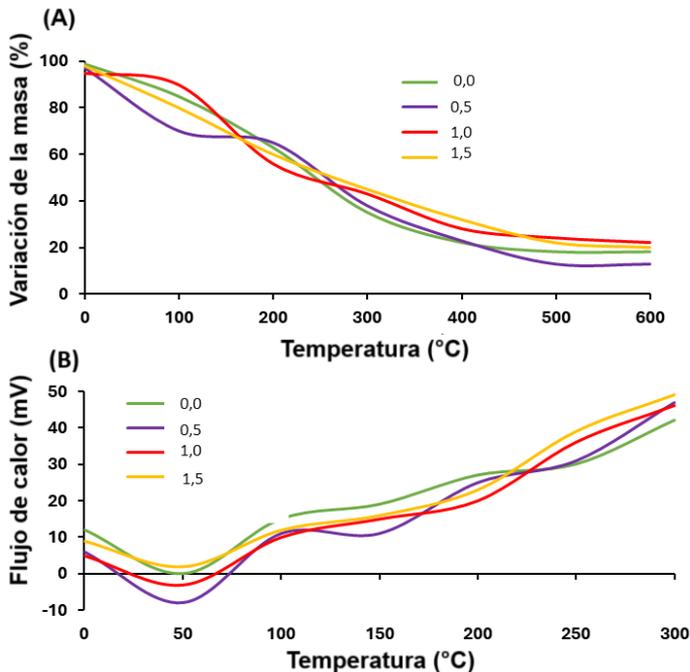


Figura 5.5. **A)** Curvas Termogravimétricas, **B)** Curvas de Calorimetría Diferencial de Barrido de las películas bioactivas obtenidas a partir de la incorporación de líquido de cáscara de anacardo con de alginato de sodio (adaptada de [Dendena y Corsi, 2014](#)).

Por lo cual, las películas con proporciones de 0; 0,5; 1 y 1,5 % presentaron rangos de temperatura de degradación térmica de 129 a 270°C, 124 a 269 °C, 126 a 288 °C y 120 a 294 °C, respectivamente. Se observa que las curvas de Calorimetría Diferencial de Barrido de las películas, en la cual se puede ver el primer pico aproximadamente a los 70 °C, considerado un evento endotérmico relativo a la humedad así como se observa en las curvas termogravimétricas, también se observa el segundo pico que corresponde a un evento exotérmico relativo al inicio de la degradación térmica, con una temperatura de 227 °C para 0 % de líquido de marañón y una temperatura de 212°C para las películas, independientemente de la inclusión del líquido (Deenanath et al., 2012). Por último, las películas con el líquido presentaron un tercer evento, que se debe a la reacción de degradación térmica en el que las inclusiones de 0,5; 1 y 1,5 % obtuvieron valores de 249, 252 y 256 °C, sin embargo.

5.3.4.1. - Investigaciones relacionadas.

Tanto la celulosa bacteriana como la goma de anacardo son materiales potenciales para formar películas. Sin embargo, ambos presentan limitaciones debido a que la goma de anacardo presenta una viscosidad muy baja, lo que no favorece la formación de películas de a base de celulosa bacteriana (Rodríguez et al., 2008). Además, la goma es altamente soluble en agua, lo que hace que sus películas sean bastante sensibles al contacto con superficies húmedas, degradándose fácilmente. Según lo explicado por Rodríguez et al. (2008), no se utiliza la goma de anacardo como componente solo para la formación de películas, sino en combinación con otros polisacáridos como el almidón y el quitosano. En dicha investigación presentaron la goma de anacardo y la celulosa bacteriana como dos polisacáridos interesantes obtenidos a partir de subproductos de marañón, con diferentes propiedades físicas, que pueden combinarse en diferentes proporciones para ajustar las propiedades para aplicaciones de envasado o recubrimiento de alimentos.

En la **Figura 5.6**, se observan los espectros de espectroscopia infrarroja de los polisacáridos y las películas de celulosa bacteriana y goma de anacardo, los cuales presentaron algunas bandas características en la región

de 3400 cm^{-1} perteneciente al estiramiento O-H, señal en 2900 cm^{-1} para C-H, otra alrededor de $1108 - 1033\text{ cm}^{-1}$ para C-O y una última señal en 1161 cm^{-1} característica para C-O (Panaitescu et al., 2018). Además, las señales en 1056 cm^{-1} de los anillos de piranosa C-O-C, y la señal de 1603 cm^{-1} (carboxilato), lo que confirma la oxidación de celulosa (Zhang et al., 2022).

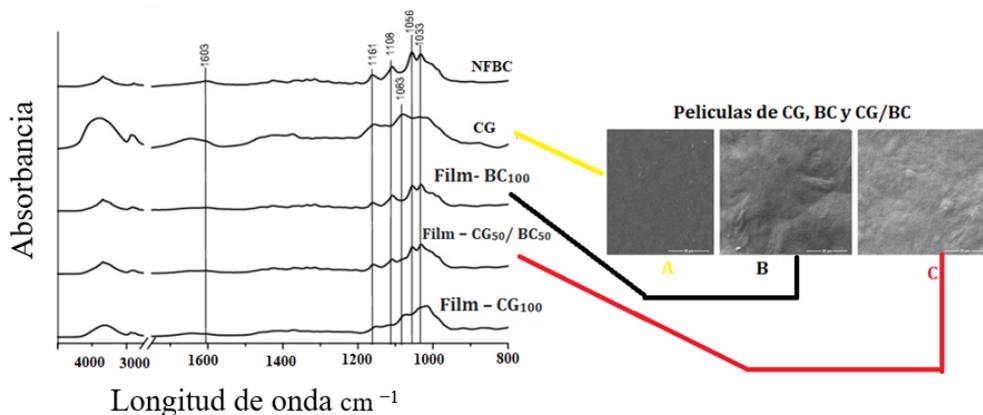


Figura 5.6. Espectros mediante espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) de los polisacáridos y las películas de celulosa bacteriana y goma de anacardo (adaptada de Rodríguez et al., 2008 y Zhang et al., 2022).

También, se observa la banda alrededor de 1083 cm^{-1} en la goma de anacardo y películas, que se atribuye al estiramiento C-O-C, los espectros no presentan evidencias de interacciones significativas entre los componentes de la película. Otro estudio innovador fue el realizado por Mahajan et al. (2022) donde mezclaron quitosano con goma de anacardo (CH/CMCG) para crear microesferas y encapsular el carboximetil con diferentes tasas de liberación del fármaco incorporado en la matriz de goma de anacardo con quitosano goma/quitosano.

En la Figura 5.7, se observa la curva de liberación de las micropartículas preparadas con carboximetil de alta densidad, donde está presentó mayor liberación que las preparadas con baja densidad, ya que prolongaron la liberación del fármaco.

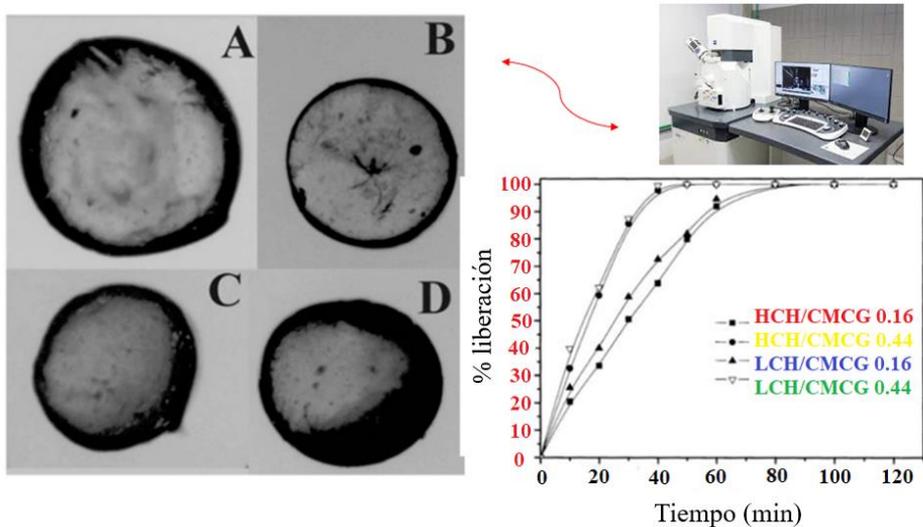


Figura 5.7. Curvas tasa de Liberación del fármaco Vs tiempo y Microscopía óptica de diferentes microsferas de quitosano/carboximetil goma de anacardo (adaptada de Magalhães et al., 2009).

El líquido de la cáscara de marañón tiene muchos componentes que pueden ser separados y estudiados para crear nuevos productos como el propuesto en la investigación por Preethi, (2021), donde aislaron el ácido anacárdico para incorporarlo a la formación de películas con el fin de formar empaques a base de quitosano y así explorar sus propiedades con la incorporación del ácido anacárdico y explotar sus habilidades para conservación de alimentos, lo que les permitió demostrar que las películas con ácido anacárdico incorporado mostraron efectos favorables antioxidantes probados en rodajas de manzana recién cortadas, arrojando mejores resultados las que contenían quitosano solo. Además, presentó actividad antimicrobiana contra patógenos transmitidos por alimentos como *Eschericia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Streptococcus faecalis* y un fuerte comportamiento antioxidante. De igual forma, estas películas tienen excelentes propiedades, lo que abre las puertas a nuevos conocimientos sobre el uso del ácido anacárdico como reemplazo de aditivos sintéticos para alimentos o envases de alimentos (Makwana et al., 2022).

5.4. - Conclusión.

El aprovechamiento de los subproductos de yuca y marañón como materias primas para la producción de biomateriales como hidrogeles o películas biodegradables pueden contribuir a la disminución de la contaminación ambiental y la reducción de residuos no biodegradables. Además, por ser materias primas abundantes y de bajo costo, las convierte en una opción económicamente viable, por lo cual, las modificaciones que se puedan realizar en el subproducto de yuca pueden mejorar las propiedades y ampliar sus aplicaciones en áreas como recubrimientos comestibles, bolsas biodegradables, películas protectoras y sistemas de liberación lenta o controlada en agricultura. Además, el uso de biomateriales a base de almidón de yuca no sólo incrementa los beneficios ecológicos, sino que también abre las oportunidades para el desarrollo económico, especialmente en regiones donde su principal cultivo sea yuca.

Por otro lado, el líquido de la cáscara de marañón, al ser un antioxidante natural, podría ser económicamente viable en el país, debido a que cuenta con muchas regiones con las condiciones agroecológicas necesarias para su producción. Sin embargo, este líquido puede ser aprovechado en la producción de biomateriales ya que, al ser antioxidante natural, le atribuye propiedades favorables para mejorar su biodegradabilidad cuando sean utilizados en el suelo, es decir, es necesario profundizar en las investigaciones sobre este antioxidante.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Sucre, la Universidad de Córdoba, y la Universidad del Valle, así como al Departamento Nacional de Planeación de Colombia, específicamente, al Sistema General de Regalías (SGR) por la financiación recibida a través del proyecto BPIN 2020000100027.

Bibliografía

- Aguilera, M. **2011**. La yuca en la región Caribe colombiana: De cultivo ancestral a agroindustrial.
- Akinhanmi, T.; Atasié, V.; Akintokun, P. **2008**. Chemical composition and physicochemical properties of cashew nut (*Anacardium occidentale*) oil and cashew nut shell liquid. *Journal of Agricultural, Food, and Environmental Sciences*. 2 (1), 1–10.
- Akinwale, T. **2000**. Cashew apple juice: its use in fortifying the nutritional quality of some tropical fruits. *European Food Research and Technology*. 211, 205-207. DOI: 10.1007/s002170050024
- Alejos, R.; Arenas, L.; Ferrer, J.; Castellano, G.; Nuñez, K.; Pérez, E. **2022**. Caracterización físico-química del pseudo-fruto de dos tipos de merey (*Anacardium occidentale* L.) de una plantación en Mara, estado Zulia, Venezuela. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*. 23 (2), 166-180.
- Amazonas, D. **2014**. Influencia del porcentaje de almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y azúcar en la producción de cerveza artesanal de cebada (*Hordeum vulgare*).
- Amutha, R.; Gunasekaran, P. **2001**. Production of ethanol from liquefied cassava starch using co-immobilized cells of *Zymomonas mobilis* and *Saccharomyces diastaticus*. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 92:560-564.
- Andersen, P.; Hudson, S. **2001**. Thermoplastic Starch composition incorporating a particulate filler component. p 44-45.
- Arango, L.; Clímaco, J.; Guevara, E.; Navas, A. **2016**. Corpoica Mapiria Ao1, Corpoica Yopare Ao2, Corpoica Yucao Ao3.: clones de marañón para la al-

tillanura bplana de la Orinoquía colombiana. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria.

Aremu, M.O.; Olonisakin, A.; Bako, D.A.; Madu, P.C. **2006**. Compositional Studies and Physicochemical Characteristics of Cashew Nut (*Anacardium occidentale*) Flour. Pakistan Journal of Nutrition. 5: 328-333. DOI: 10.3923/pjn.2006.328.333

Aristizábal, J.; Sánchez, T.; Mejía, D. **2007**. Guía técnica para la producción y análisis del almidón de Yuca. FAO.

Bernal, W.; Mantilla, J.; Alvarado, W. **2017**. Efecto de la alimentación con harina de yuca (*Manihot sculenta*) y plátano (*Musa paradisiaca*) en crecimiento de gallinas ponedoras Lohmann Brown. Revista de Investigación en Ciencia y Biotecnología Animal. 1(1), 53-59 DOI: 10.25127/ricba.20171.177

Betoret, E.; Calabuig, L.; Barrera, C.; Dalla, M. **2015**. Tecnologías de secado sostenible para el desarrollo de alimentos funcionales y conservación de compuestos bioactivos. DOI: 10.5772/64191

CIAT. **2019**. Qué hacemos: Yuca.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. **2016**.

De Paula, R.; Rodrigues, J. **1995**. Composition and rheological properties of cashew tree gum, the exudate polysaccharide from *Anacardium occidentale* L. Carbohydrate Polymers. 26 (3), 177-181. DOI: 10.1016/0144-8617(95)00006-S

De Sousa, A.; Torequ, I.; Gomes, A.; de Castro, J.; Oliveira, M.; Correia, M.; Lins, H.; Freire, M.; Carvalho, A.; Dantas, J. **2016**. Pharmacological properties of cashew (*Anacardium occidentale*) 15 (35), 1855-1863. DOI: 10.5897/AJB2015.15051

- Deenanath, E.; Iyuke, S.; Rumbold, K. **2012**. The bioethanol Industry in Sub-Saharan Africa: History, Challenges, and Prospects. *Journal BioMed Research International*. 416491. DOI: 10.1155/2012/416491
- Dendena, B.; Corsi, S. **2014**. Cashew, from seeds to market: a review. *Agronomy of sustainable development*. 43, 753-772.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). **2016**. Pérdida y desperdicios de alimentos en Colombia. Estudio de la dirección de seguimiento y evaluación de políticas públicas.
- Desai, V.; Dubey, V.; Vakil, V.; Ranade, V. **2012**. Isolation, identification and screening of the yeast flora from indian cashew apple for sugar and ethanol tolerance. *International Journal of Biotechnology for Wellness Industries*. 1(4), 259.
- Diaz, P.; Lopez, C.; Diaz, P.; Lopez, C. **2021**. Yuca: Pan y carne, una alternativa potencial para hacer frente al hambre oculta. *Acta Biológica Colombiana*. 26(2), 235-246. DOI: 10.15446/abc.v26n2.84569
- Dimoso, N. **2020**. Development of quality dried cashew apple products. *Life sciences and Bio-engineering*. DOI: 10.58694/20.500.12479/1020
- Dos Santos, P.; Lima, D.; Pires, C.; De Castro, V.; Franco, C.; Nascimento, T.; Pires, J.; Sousa, S.; Rocha, J. A.; Silva, D. **2022**. Scientific and technological prospection of cashew gum and angico gum with emphasis on controlled drug delivery systems. *Research, Society and Development*, 11(15), e64111536633.
- FAO. **2006**. Enfoques. El mercado de almidón añade valor a la yuca.
- FAOSTAT - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Production. **2022**.

- Fitzpatrick, J. **2011**. Cashew nut Processing equipment study-summary.
- Gao, S.; Song, W.; Guo, M. **2020**. The integral role of bioproducts in the growing bioeconomy. *Industrial Biotechnology*. 16(1). 13–25. DOI: 10.1089/ind.2019.0033
- Goertz, H. **1993**. Technology Developments in Coated Fertilizers Proceedings. Dahlia Greidinger Memorial International Workshop on Controlled/Slow-Release Fertilizer. Technion-Israel Institute of Technology. pp.7-12.
- Göncüoğlu, T.; Gökmen, V. **2017**. Phenolic compounds in natural and roasted nuts and their skins: a brief review. *Current Opinion in Food Science*. 14, 103-109. DOI: 10.1016/j.cofs.2017.03.001
- González, M.; Rieumont, J.; Rodríguez, C. **2004**. Una Breve Reflexión sobre el uso y desarrollo de los Fertilizantes de Liberación Lenta y Controlada. *Temas de Ciencia y Tecnología*. 24(19).
- González, M.; Rodríguez, M.; Hernández, M.; Rodríguez, C.; Rieumont, J.; Cuesta, Ernesto.; Sardinas, C.; Morales A. **2005**. Obtención de un fertilizante de liberación lenta y controlada enriquecido con diferentes plantas marinas. *Revista Cubana de Química*. XVII (3), 25-31 ISSN: 0258-5995.
- Guerrero, A.; Carvalho, A.; Madrona, B.; Cestari, S.; Scapin, A., & Prado, N. **2015**. Envases alternativos biodegradables y activos con aceites esenciales para productos cárnicos. *Eurocarne*, 238, 45–52.
- Ibarra, R. **2018**. El impulso de las energías renovables en la lucha contra el cambio climático a través de los certificados ambientales en el sector eléctrico mexicano. *Boletín mexicano de derecho comparado*, 51(152), 569-597. DOI: 10.22201/ijj.24484873e.2018.152.12918

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. **1997**. Guía Metodológica para el Ordenamiento Territorial Municipal.
- Irigaray, B.; Callejas, N.; Estradé, D.; Rebellato, C.; Vieitez, I. **2020**. Determinación del contenido de antioxidantes naturales en frutos secos. Revista INNOTECH. 21, 68-88. DOI: 10.26461/21.08
- Jansson, C.; Westerbergh, A.; Zhang, J.; Hu, X. **2009**. Cassava, a potential biofuel crop in (the) People's Republic of China. Applied Energy. S95-S99.
- Jeyavishnu, K.; Thulasidharan, D.; Shereen, T. **2021**. Aumento de ingresos con productos de alto valor agregado de anacardo (*Anacardium occidentale* L.): abordar los desafíos globales. Tecnología de bioprocesos alimentarios. 14, 985-101. DOI: 10.1007/s11947-021-02623-0
- Kong, X.; Corke, H.; Bertoft, E. **2009**. Fine structure characterization of amylopectins from grain amaranth starch. Carbohydrate Research. 344 (13), 1701-1708. DOI: 10.1016/j.carres.2009.05.032
- Korma, A.; Alahmad, K.; Niazi, S.; Ammar, F.; Zaaboul, F.; Zhang, T. **2016**. Almidón modificado químicamente y utilización en productos alimenticios. Revista Internacional de Nutrición y Ciencias de los Alimentos. 5(4):264-272. DOI: 10.11648/j.ijnfs.20160504.15
- Lafont, J.; Páez, M.; Portacio, A. **2011**. Extracción y Caracterización Físicoquímica del Aceite de la Semilla (Almendra) del Marañón (*Anacardium occidentale* L). Información tecnológica. 22(1), 51-58. DOI: 10.4067/S0718-07642011000100007
- Lin, X.; Gao, W.; Li, C.; Yang, C.; Wu, H. **2012**. Carboximetilalmidón de yuca en escamas de tamaño nanométrico como excipiente para dispersiones sólidas. Revista Internacional de Farmacéutica. 423 (2), 435-439. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2011.12.014

- Magalhães, G.; Santos, C.; Silva, D.; Maciel, J.; Feitosa, J.; Paula, H.; De Paula, C. **2009**. Microspheres of chitosan/carboxymethyl cashew gum (CH/CMCG): Effect of chitosan molar and CMCG degree of substitution on the swelling and BSA release. *Carbohydrate polymers*. 77 (2), 217-222. DOI: 10.1016/j.carbpol.2008.12.037
- Mahajan, M.; Gite, V. **2022**. Self-healing polyurethane coatings of eugenol-based polyol incorporated with linseed oil encapsulated cardanol-formaldehyde microcapsules: A sustainable approach. *Progress in Organic Coating*. 162, 106534. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106534
- Maher, G. **1983**. Gelatinación alcalina de almidones. *Almidón-Starke*. 35(7), 226-234.
- Makwana, K.; Ichake, A.; Valodkar, V.; Padmanaban, G.; Badiger, M.; Wadgaonkar, P. **2022**. Cardol: Cashew nut shell liquid (CNSL) - derived starting material for the preparation of partially bio-based epoxy resins. *European Polymer Journal*. 166, 111029. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2022.111029
- Martínez, Y.; Martínez, O.; Escalona, A.; Soto, F.; Valdivié, M. **2012**. Composición química y tamizaje fitoquímico del polvo de hojas y retoños del *Anacardium occidentale* L. (marañón). *Revista Cubana de Plantas Medicinales*. 17(1), 1-10.
- Mathew, P.; Dufresne, A. **2002**. Plasticized waxy Maize starch: Effect of Polyols and Relative Humidity on Material Properties. *Macromolecules*. p 1101-1108.
- Mattison, C.; Cavalcante, J.; Gallão, M.; de Brito, E. **2018**. Effects of industrial cashew nut processing on anacardic acid content and allergen recognition by IgE. *Food Chemistry*. 240, 370-376. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.07.146

- McLaughlin, J.; Balerdi, C.; Crane, J. **2018**. El marañón (*Anacardium occidentale*) en Florida. Instituto de Alimentos y Ciencias Agrícolas.
- Mendoza, G.; Hernandez, G.; Vergara, C. **2019**. Cadena de suministro agroalimentaria de la yuca en el departamento de Sucre. Cekar. DOI: 10.21892/9789585547254.2
- Meza, Y.; Otiniano, A. **2015**. Sustentabilidad de los sistemas de cultivo con yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco. Ecología Aplicada. 14(1), 55-63.
- Ministerio de agricultura y desarrollo rural (MADR). **2019**. Política agropecuaria y desarrollo rural 2018-2022.
- Ministerio de minas y energía. **2010**. El Programa de Biocombustibles en Colombia.
- Mishra, R.; Datt, M.; Pal, K.; Banthia, A. **2008**. Preparation and characterization of amidated pectin based hydrogels for drug delivery system. Journal of Materials Science: Materials in Medicine. 19 (6), 2275-2280. DOI: 10.1007/s10856-007-3310-4
- Mothé, C.; Calazans, G. **2008**. Antitumor Activity of Cashew Gum from *Anacardium Occidentale* L. Agro Food Industry Hi-Tech. 19, p. 50-52.
- Mothé, C.; Carestiato, T.; Águila, M. **2005**. Thermal behavior of the heart of SHR and wistar rats. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 80. 429-433.
- Mothé, C.; Oliveira, F. **2002**. Recuperação dos carbonatos contidos no rejeito da indústria de mármore e granito pelo processo de flotação. En: XXIV Jornada de Iniciação Científica da UFRJ. Rio de Janeiro. XXIV Jornada de Iniciação Científica da UFRJ.

- Mothé, G.; Correia, D. **2002**. Caracterização reológica de blendas de gomas de cajueiro e xantana em suco. *Analytica*. 2, 59-64.
- Mothé, G.; Lannes, S. **2015**. Composições alimentícias de chocolate contendo goma de cajueiro, seu processo de preparação e barra, bombom e chocolate em pó formado por chocolate com goma de cajueiro, úteis como alimento funcional e nutraceutico.
- Mushumbusi, C.; Max, R.; Bakari, G.; Mushi, J. **2020**. Cyanide in Cassava Varieties and People's perception on Cyanide Poisoning in Selected Regions of Tanzania. *Journal of Agriculture Studies*. 8 (1), 180-193. DOI: 10.5296/jas.v8i1.15511
- Nafchi, A.; Moradpour, M.; Saeidi, M.; Alias, A. **2013**. Thermoplastic starches. Properties, challenges and prospects. *Biosynthesis, Nutrition, Biomedical*. 65(1-2), 62-72. DOI: 10.1002/star.201200201
- Nayak, A.; Tahir, M.; Sami, F.; Bera, H.; Saquib, M. **2019**. Chapter 11 – Cashew gum in drug delivery applications. *Natural polysaccharides in Drug Delivery and Biomedical Applications*. 263-283. DOI: 10.1016/B978-0-12-817055-7.00011-X
- Ojeda, G.; Arias, A.; Sgroppo, S.; Zaritzky, N. **2021**. Application of composite cassava starch/chitosan edible coating to extend the shelf life of black mulberries. *Journal of food processing and preverasation*. 45(1). DOI: 10.1111/jfpp.15073
- Okoye, I.; Ekweogu, C.; Oruna E. **2017**. Effects of palm bunch potash, trona and their modified cashew gum-corn starch composite on the physicochemical properties of furosemide. *Journal of Pharmacy & Pharmacognosy Research*. 5 (1), 15-28.
- Olomo, V.; Ajibola, O. **2003**. Processing factors affecting the yield and physico-chemical properties of starch from cassava chips and flour. *Starch–Stärke*. 55(10), 476–481. DOI:10.1002/star.200300201

- Orduz, J.; Rodríguez, E. **2022**. Cashew (*Anacardium Occidentale* L.) A crop with productive potential. Technological development and prospects in Colombia. *Agronomia Mesoamericana*. 33(2), 47268. DOI: 10.15517/am.v33i2.47268
- Pacheco, E.; Techeira, N. **2009**. Propiedades químicas y funcionales del almidón nativo y modificado de ñame (*Dioscorea alata*). *Interciencia*, 34(4), 280-285.
- Paiva, J.; Barros, M.; Cavalcanti, J. **2009**. Mejoramiento del anacardo (*Anacardium occidentale* L.): una perspectiva global. En: Jain, SM, Priyadarshan, PM. Mejoramiento de cultivos arbóreos de plantaciones: especies tropicales. Springer, Nueva York, Nueva York. DOI: 10.1007/978-0-387-71201-7_9
- Panaitescu, D.; Vizireanu, S.; Nicolae, C.; Frone, A.; Casarica, A.; Carpen, L.; Dinescu, G. **2018**. Treatment of Nanocellulose by Submerged Liquid Plasma for Surface Functionalization. *Nanomaterials*. 8(7), 467. DOI: 10.3390/nano8070467
- Parra, J. **2020**. Cifras sectoriales: Subsector productivo de la yuca.
- Pail, J.P. **2017**. Indian cashew food. *Integrative Food, Nutrition and Metabolism*. 4(2). DOI: 10.15761/ifnm.1000173
- Peñaranda, O.; Perilla, J.; Algecira, N. **2008**. Revisión de la modificación química del almidón con ácidos orgánicos. *Revista Ingeniería e Investigación*. 28 (3), 47-52.
- Pérez, S.; Bertoft, E. **2010**. The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. *Biosynthesis, Nutrition, Biomedical*. 62, 389–420. DOI: 10.1002/star.201000013

- Perone, A. **2012**. El uso popular del marañón (*Anacardium occidentale* L.) e Tabatinga (Amazonas, Brasil) y su potencial como planta cicatrizante Maestría en estudios amazónicos. Universidad Nacional de Colombia.
- Piyachomkwan, K.; Tanticharoen, M. **2011**. Cassava Industry in Thailand: Prospects. The Journal of the Royal Institute of Thailand. 3, 160-170.
- Preethi, R.; Moses, J.; Anandharamakrishnan, C. **2021**. Development of anacardic acid incorporated biopolymeric film for active packaging applications. Food Packaging and Shelf Life. 28, 100656 DOI: 10.1016/j.fpsl.2021.100656
- Prommajak, T.; Leksawasdi, N.; Rattanapanone, N. **2014**. Biotechnological valorization of cashew apple: a review, Chiang Mai University Journal of Natural Sciences. 13, 159–182. DOI: 10.12982/CMUJNS.2014.0029.
- Rodríguez, L.; Arango, L.; Pulido, N. **2011**. Propuesta de aprovechamiento integral del Marañón: Nuez Pseudofruto y Subproductos.
- Rodríguez, E.; Fernández, A.; Cuvelier, G.; Relkin, P.; Bello, L. **2008**. Starch Retrogradation in Cassava Flour from Cooked Parenchyma. Starch-Stärke. 60 (3-4), 174-180. DOI: 10.1002/star.200700683
- Salimi, M.; Motamedi, E.; Safari, M.; Motesarezadeh, B. **2021**. Synthesis of urea slow-release fertilizer using a novel starch-g-poly(styrene-co-butylacrylate) nanocomposite latex and its impact on a model crop production in greenhouse. Journal of Cleaner Production. 322, 129082. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129082
- Sánchez T.; Salcedo E.; Ceballos H.; Dominique, D. **2009**. Screening of Starch Quality Traits in Cassava (*Manihot esculenta* Crantz). Starch and Starke. 61(1), 12-19. DOI: 10.1002/star.200800058
- Selim, K.; Tsimidou, M.; Biliaderis, C. **2000**. Kinetic studies of degradation of saffron carotenoids encapsulated in amorphous polymer matrices. Food

Chemistry. 71 (2), 199-206. DOI: 10.1016/S0308-8146(00)00156-4

Shaviv, A. **2001**. Improvement of Fertiliser Efficiency Product Processing, Positioning and Application Methods. The International Fertiliser Society, Proceeding. 469.

Sharma, P.; Gaur, V.; Sirohi, R.; Larroche, C.; Kim, S.; Pandey, A. **2020**. Valorization of cashew nut processing residues for industrial applications. Industrial Crops & Products 152, 112550. DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.112550

Shoji, S.; Gandeza, A. **1992**. Controlled Release Fertilizer with Polyolefin Resin Coating.

Shuren, J. **2000**. Producción y uso de almidón modificado y derivados del almidón en China. En El potencial de la yuca en Asia en el siglo XXI: situación actual y necesidades futuras de investigación y desarrollo. Proc. Sexto Taller Regional, celebrado en la ciudad de Ho Chi Minh, Vietnam. 553-563.

Sistema de Información de Gestión y Desempeño de Organizaciones de Cadenas. (SIOC). **2018**.

Solano, A.; Gaitán, S.; Restrepo, P.; Rodríguez, I.; Parada, F. **2018**. Beneficio de la nuez el marañón (*Anacardium occidentale* L.) mediante la producción del LCNM con CO₂ presurizado. Revista Actualidades Biológicas. 27 (1), 59-63. DOI: 10.17533/udea.acbi.331554

Soto, D.; Oliva, H. **2012**. Métodos para preparar hidrogeles químicos y físicos basados en almidón: Una revisión. Revista Latino Americana de Metalurgia y Materiales. 32 (2), 154-175.

Torres, P.; Pérez, A.; Marmolejo, L.; Ordóñez, J.; García, R. **2010**. Una mirada a la agroindustria de extracción de almidón de yuca, desde la estandarización de procesos. Revista EIA. 14, 23-38.

Trujillo, T. **2014**. Obtención De Películas Biodegradables A Partir De Almidón De Yuca (*Manihot Esculenta* Crantz) Doblemente Modificado. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 121.

Tumwesigye, K.; Oliveira, J.; Sousa, M. **2016**. Integrated sustainable process design framework for cassava biobased packaging materials: Critical review of current challenges, emerging trends and prospects. *Trends in Food Science and Technology*. 56, 103-114. DOI: 10.1016/j.tifs.2016.08.001

Tumwesigye, K.; Oliveira, J.; Sousa, M. **2016**. New sustainable approach to reduce cassava borne environmental waste and develop biodegradable materials for food packaging applications. *Food packaging and shelf life*. 7, 8–19. DOI: 10.1016/j.fpsl.2015.12.001

Van Hoof, B.; Gómez, H.; Duque, J.; Méndez, C.; Orduz, J. **2020**. Productive transformation of agribusiness. The experience of MAS Marañón Vichada

Vargas, A.; Pérez, L. **2018**. Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*. 14 (1), 59–72.

Vit, P. *Anacardium occidentale* L. **2003**. *Revista de la Facultad de Farmacia*. 45(1), 77-79.

Westby, A. **2002**. Cassava utilization, storage and small-scale processing. *Cassava: Biology, production and utilization*. 281–300. DOI: 10.1079/9780851995243.0281

Wicaksono, R.; Syamsu, I.; Yuliasih, M. **2013**. Cellulose Nanofibers from Cassava Bagasse: Characterization and Application on Tapioca-Film. *The International Institute for Science, Technology and Education*. 3(13), 79–87.

Yang, J.; Du, Y. **2003**. Chemical modification, characterization and bioactivity of *Chinese lacquer* polysaccharides from lac tree *Rhus vernicifera* against leukopenia induced by cyclophosphamide. *Carbohydrate Polymers*. 52, 405-410.

Zhang, C.; Xue, J.; Yanga, X.; Kea, Y.; Oua, R.; Wanga, Y.; Wanga, Q. **2022**. From plant phenols to novel bio-based polymers. *Progress in Polymer Science*. 125, 101473. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2021.101473

Capítulo 6.

Biopolímeros compuestos de almidón con derivados del líquido de cáscara de nuez del anacardo.

6.1.- Introducción.

Los polímeros son macromoléculas formadas por cierta cantidad de unidades químicas, llamados monómeros, los cuales se repiten a lo largo de toda la cadena por medio de enlaces covalentes. Los polímeros, se clasifican principalmente, en dos grandes grupos: naturales y sintéticos, siendo los primeros aquellos que provienen directamente de los seres vivos y los segundos, son obtenidos de forma artificial por la intervención del hombre. Los polímeros naturales han tomado protagonismo respecto a los sintéticos, puesto que son renovables, biocompatibles, versátiles, no tóxicos, económicos y amigables con el medio ambiente. Dentro de los polímeros naturales, resulta interesante mencionar al almidón porque gracias a todas sus propiedades, ha logrado un alto potencial en el desarrollo de la agroindustria desde el punto de vista económico y ambiental (Dong et al., 2021; Gruber Chiaregato y Faez, 2021; Ibrahim et al., 2019; Motamedi et al., 2019; Salimi et al., 2020; Supare y Mahanwar, 2022b). Además, se sabe que el almidón presenta una alta disponibilidad, ya que puede ser extraído de

Cite as: Á.Á. Arrieta, E.M. Combatt, M. Palencia. 2024. Agroindustria de la yuca y marañón: Enfoque hacia la producción de biomateriales. En: Á.Á. Arrieta, E.M. Combatt, M. Palencia. Materiales poliméricos funcionales basados en productos de la agroindustria: Yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y Marañón (*Anacardium occidentale* L.). MT-Pallantia Publisher s.a.s., Cali - Colombia. pp. 211-269. DOI: 10.34294/b.001.c6.2024.03.

diversas fuentes vegetales como la yuca, ñame, papa, arroz, maíz, aguacate, trigo, avena, entre otros (Araújo et al., 2020; Gruber Chiaregato y Faez, 2021).

En términos estructurales, el almidón está constituido por monómeros de D-glucosa unida por enlaces glucosídicos de tipo α -D-(1→4) y/o α -D-(1→6), en forma de amilosa y amilopectina, siendo la primera mayormente lineal y la segunda ramificada (Araújo et al., 2020; Chen et al., 2018; Qamruzzaman et al., 2022; Sarkar et al., 2021). Ahora bien, el almidón ha logrado convertirse en materia de estudio, principalmente en la formación de hidrogeles, procesos de recubrimientos, procesos de encapsulación de liberación lenta (por sus siglas en inglés, SRF, Slow Release Fertilizer) y/o controlada (CRF, Controlled Release Fertilizer), debido a su estructura, así como propiedades físicas y químicas (Arayaphan et al., 2021; Chen et al., 2020; Gautam et al., 2021; Ghobashy, 2020; Gruber Chiaregato y Faez, 2021; Ibrahim et al., 2019, 2020; Junlapong et al., 2020; Lum et al., 2016; Motamedi et al., 2019; Qiao et al., 2016; Rychter et al., 2016; Salimi et al., 2020; Sarkar et al., 2021; Savitri et al., 2019; Sofyane et al., 2021; Supare y Mahanwar, 2022a; Versino et al., 2019; Vudjung y Saengsuwan, 2018; Wei et al., 2020; Xiao et al., 2017; Zafar et al., 2021).

En los últimos años, la agroindustria ha dejado huellas indeseables en el ambiente, producto de la liberación de una gran variedad de residuos. El término “residuo” no implica necesariamente un desecho no aprovechable, sino algún tipo de material obtenido de manera intencional a partir de un proceso de fabricación, que probablemente pueda ser aprovechado como materia prima para generar nuevos productos. Es importante mencionar que, anteriormente, estos desechos eran considerados un problema tanto para la salud humana y animal, como para el medio ambiente. Sin embargo, actualmente han logrado convertirse en foco de estudio, debido a que pueden aprovecharse de forma productiva en el desarrollo de nuevos biomateriales (Arpit Singh et al., 2022).

En este sentido, residuos agroindustriales como las semillas, pulpas, hojas y cáscaras, son portadores de un amplio espectro de compuestos bioactivos, que pueden ser benéficos para la salud humana y la realización

de desarrollos tecnológicos. Los compuestos fenólicos son un ejemplo clave de tales compuestos, ya que, poseen propiedades antiinflamatorias, antioxidantes, antifúngicas, antibacterianas, entre otras (Nasrollahzadeh et al., 2019; Preethi et al., 2020, 2021; Ramos et al., 2018). Durante el procesamiento del anacardo (*Anacardium occidentale* L.) se obtiene un aceite muy viscoso llamado líquido de cáscara de nuez del anacardo (CNSL, por sus siglas en inglés, *Cashew Nut Shell Liquid*) (Kyei et al., 2020; Philip et al., 2008; Preethi et al., 2021; Remya et al., 2016), el cual puede ser extraído por diferentes métodos tales como: extracción mecánica o con solventes, proceso de aceite caliente, procesos de fluidos supercríticos y destilación al vacío (Nambela et al., 2022; Rwahwire et al., 2018).

El CNSL está constituido principalmente por cuatro compuestos fenólicos: ácido anacárdico ($C_{22}H_{36}O_3$, forma saturada), cardol ($C_{21}H_{36}O_2$, forma saturada), cardanol ($C_{21}H_{36}O$, forma saturada) y 2-metilcardol ($C_{22}H_{38}O_2$, forma saturada); cada uno de ellos posee en su estructura, largas cadenas carbonadas laterales con diferente grado de insaturación unidas al anillo aromático (Araújo Lima et al., 2020; Buono et al., 2018; Hamad y Mubofu, 2015; Kyei et al., 2020; Nambela et al., 2022; Rwahwire et al., 2018).

Por lo tanto, son capaces de generar nuevos productos a partir de un abanico de reacciones químicas como: esterificación, nitración, hidrogenación, sulfonación, halogenación, eterificación y epoxidación (Balgude y Sabnis, 2012, 2014; Ike et al., 2021; Lomonaco et al., 2017; Nambela et al., 2022; Philip et al., 2008; Remya et al., 2016; Saenab et al., 2017). Además, recientemente se ha descubierto que tanto el ácido anacárdico (AA) como el cardanol son protagonistas como agentes de protección para el desarrollo de nanomateriales (Hamad & Mubofu, 2015; Mlowe et al., 2013; S. S. Mlowe et al., 2014). También han sido utilizados en procesos de encapsulación con biopolímeros, de igual manera que el almidón (Anjum et al., 2021; Cavalcante de Araujo et al., 2021; Oliveira et al., 2022; Paiva Filho et al., 2019).

Por lo anterior, el objetivo de este capítulo es proporcionar información y conocimientos sobre la preparación, caracterización y aplicabilidad de biopolímeros compuestos a base de almidón con derivados del líquido de

cáscara de nuez del anacardo, con el fin de concentrar información sustancial acerca del tema en estudio.

6.2.- Almidón.

6.2.1.- Estructura y características.

El almidón es un biopolímero renovable, versátil, disponible y amigable con el medio ambiente, se encuentra en diferentes fuentes vegetales como la yuca, ñame, papa, arroz, maíz, aguacate, trigo, avena, entre otras (Araújo et al., 2020; Gruber Chiaregato y Faez, 2021). A nivel molecular, está formado por dos componentes distintivos, amilosa y amilopectina, que varían su composición porcentual dependiendo de la procedencia de la fuente natural, esto es, la amilosa representa alrededor del 25 - 30 % y la amilopectina contribuye con un 70 - 75 % en masa del almidón. En consecuencia, las propiedades físicas y químicas del biopolímero se ven afectadas (Qamruzzaman et al., 2022; Supare y Mahanwar, 2022b; Zhao et al., 2020).

Adicionalmente, se puede discernir entre los componentes del almidón, ya que la amilosa (región amorfa), es de cadena lineal, constituida de monómeros de D-glucosa unidas entre sí por medio de enlaces glucosídicos del tipo α -D-(1 \rightarrow 4), por su parte, la amilopectina (región cristalina) posee una estructura ramificada con enlaces glucosídicos α -D-(1 \rightarrow 4) y α -D-(1 \rightarrow 6) entre las unidades de D-glucosa, tal como se muestra en la **Figura 6.1** (Chen et al., 2020; de Souza Silva et al., 2020; Gautam et al., 2021; Ghobashy, 2020; Gruber Chiaregato y Faez, 2021; Sarkar et al., 2021).

A partir de la **Figura 6.1**, se observa que tanto la amilosa como la amilopectina contienen en su estructura muchos grupos hidroxilo (-OH), los cuales son los responsables del poder hidrofílico del almidón. Además, estos grupos poseen una alta reactividad ya que pueden oxidarse o reducirse y formar enlaces de hidrógeno.

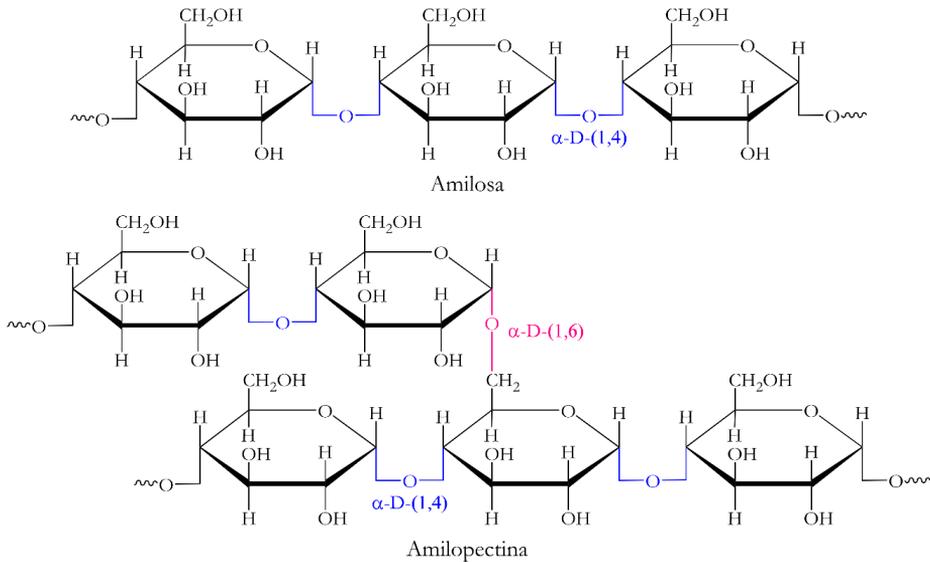


Figura 6.1. Estructura de la amilosa y la amilopectina en el almidón.

6.2.2.- Métodos de extracción.

En un estudio realizado por Torres et al., se utilizó un método convencional de extracción para el almidón presente en la papa. Este proceso consistió en diferentes etapas: Primero pelar, cortar y triturar la papa. Luego se mezcla la pulpa molida con agua en proporción 1:2 (sólido: líquido) por 60 min a 200 rpm, seguido de una filtración con el fin de separar la pulpa del líquido. Posteriormente, se lava la pulpa para eliminar el almidón restante; se enfría el sistema por 24 h, proceso que aísla el almidón, el cual se seca en un horno a 40 °C por 48 h (Torres et al., 2020).

6.2.3.- Técnicas de caracterización aplicadas al almidón.

El almidón obtenido de diversas fuentes naturales puede ser caracterizado por diferentes técnicas espectroscópicas, siendo algunas de ellas la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Una molécula generalmente muestra absorción de energía en la región del

infrarrojo cuando tiene un momento dipolar, el cual puede cambiar al momento de vibrar, y la energía que absorbe depende de la energía de sus enlaces. La energía absorbida por las moléculas se traduce en movimientos, que dan lugar a modos de vibración o rotación característicos para cada tipo de enlace, por lo que puede aprovecharse este hecho para obtener información de la estructura de una muestra (Stuart, 2004).

En la **Figura 6.2** se muestra el espectro FTIR del almidón extraído de la yuca. Con el fin de lograr una mejor interpretación de las principales bandas, resulta conveniente la división de la región del espectro infrarrojo en cuatro regiones fundamentales, esto es, por debajo de 800 cm^{-1} , $1500 - 800\text{ cm}^{-1}$ (huella dactilar), $3000 - 2800\text{ cm}^{-1}$ (tensión del enlace C-H asociado a la hibridación sp^3 , $-\text{CH}_2-$), y $3600-3000\text{ cm}^{-1}$ (estiramiento del enlace O-H).

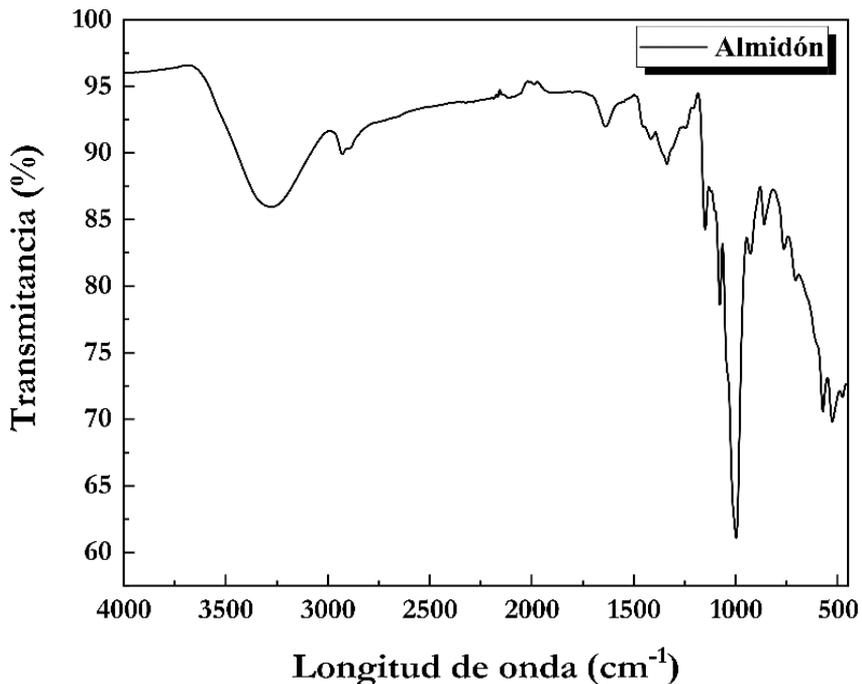


Figura 6.2. Espectro FTIR de almidón extraído de la yuca.

Por tanto, las bandas inferiores a 800 cm^{-1} se asocian a las vibraciones del modo esquelético de la glucopiranososa. La banda localizada a $1100 - 900\text{ cm}^{-1}$ se debe a los estiramientos C–O y C–C, y los modos de flexión C–O–H se evidencian con la presencia a 1086 cm^{-1} . Así mismo, las bandas vibracionales (flexión y deformación) en la región $1265 - 1454\text{ cm}^{-1}$, están relacionadas con los átomos de carbono e hidrógeno (C–H), y el pico a 1338 cm^{-1} se atribuye a los modos de flexión de CH_2 . Por último, la caracterización de las tensiones C–H y O–H se evidencian en la región de $2861 - 2956\text{ cm}^{-1}$ y $3209 - 3388\text{ cm}^{-1}$, respectivamente (Kizil et al., 2002). Estos resultados son similares al almidón obtenido de fuentes naturales en varias partes del mundo (Araújo et al., 2020; de Souza Silva et al., 2020; Gani et al., 2020; Gruber Chiaregato y Faez, 2021; Huey et al., 2019; Junlapong et al., 2020; Li et al., 2020; Oyeyinka et al., 2020; Pérez-Vergara et al., 2020; Qiao et al., 2016; Supare y Mahanwar, 2022b; Wei et al., 2020; Xiao et al., 2017; Zhang et al., 2020).

De igual manera, se han realizado estudios por espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis), con la finalidad de observar experimentalmente las transiciones electrónicas producidas en el almidón. Estas transiciones electrónicas -permitidas y no permitidas- son producto de la absorción de energía realizado por una especie química (moléculas o iones). Dicha absorción permite a los electrones realizar un “salto” del estado o nivel fundamental hacia un estado excitado. Luego, estas absorciones de energía son características -es posible la identificación- para algunos grupos funcionales orgánicos, iones metálicos, así como complejos formados por transferencia de carga. En este último caso se encuentra el almidón, ya que es necesaria la introducción de yodo, el cual reacciona con las unidades de amilosa formando un compuesto coloreado con varias especies cargadas de yodo, cuya longitud de onda es 615 nm (Pesek et al., 2022). Al tener la posición de la longitud de onda máxima de la transición, es posible cuantificar la cantidad del compuesto, mediante la ecuación asociada a la ley de Beer-Lambert, $A = \epsilon \cdot b \cdot c$, Donde A es la absorbancia de la especie química, ϵ es la constante de absorptividad molar, que depende de la sustancia, la longitud de onda, así como condiciones de medición; y c es la concentración. Recientemente, investigadores han reportado el mejoramiento de la

cuantificación del almidón mediante esta técnica, en las cuales se incluye la variación del pH, así como la fuente del almidón (Bahdanovich et al., 2022).

La resonancia magnética nuclear (RMN) es una técnica espectroscópica basada en las transiciones energéticas producto de la absorción de energía por parte de algunos núcleos, las cuales están en el intervalo de la radiofrecuencia. Tales núcleos cumplen la condición de que el momento magnético distinto de cero, si presentan espín nuclear. Luego, la condición de resonancia es que la frecuencia de precesión del núcleo es igual a la frecuencia aplicada, por lo que el núcleo presenta una transición energética de un espín nuclear de menor energía a otro de mayor energía, a un campo magnético aplicado, el cual es constante. Esta absorción de energía da información sobre el ambiente químico alrededor del núcleo estudiado (Mitchell & Costisella, 2004; Nyquist, 2001). Para compuestos orgánicos, los núcleos generalmente estudiados son ^1H y ^{13}C , en la que también se incluyen subtécnicas bidimensionales, tales como COSY, ROESY, entre otras (Balci, 2005; Silverstein et al., 2005). El ambiente químico en la cual se encuentra el núcleo estudiado, generalmente se presentan en las mismas posiciones, por lo que, para compuestos orgánicos, se han registrado tales posiciones (Pretsch et al., 2009). Esta técnica se ha aplicado con la finalidad de caracterizar el almidón obtenido de diferentes fuentes, por ejemplo, mediante resonancia magnética nuclear de carbono 13 (RMN ^{13}C), Qiao y colaboradores tomaron mediciones de RMN ^{13}C al almidón, en la que se evidenciaron las posiciones de los carbonos de la unidad polimérica glucopiranosica (Qiao et al., 2016, 2019). De igual forma, se mostraron los núcleos de hidrógeno del monómero, mediante RMN protónico (Tizzotti et al., 2011; Zhu, 2017).

El estudio de la estructura cristalina se realizó mediante la difracción de rayos X (proveniente del inglés, XRD, X-Ray Diffraction). Esta técnica fisicoquímica se basa en la ley de Bragg, $n\lambda=2d\text{sen}\theta$, donde λ es la longitud de onda, d es la distancia entre cada uno de los planos adyacentes del cristal (espaciado d), λ es el ángulo de Bragg en el que se observa un pico de difracción, y n es un número entero, denominado el orden de la reflexión. Esto significa que la condición de Bragg con varios espaciados d y ángulos 2θ

pueden ser satisfechas por diferentes longitudes de onda de rayos X (energías) (He, 2018). Luego, existen estudios por medio de esta técnica, en la que se ha estudiado las fases del almidón, donde se presentan cuatro tipos de estructura cristalina, en la que la amilopectina es el componente por el cual se observa cristalinidad, ya que presenta una estructura con doble hélice. Asimismo, se observa que la amilosa contribuye en la cristalinidad, en la que está unida a lípidos o ácidos grasos libres, y que genera varios alomorfos: A, B, C y V. En la estructura tipo A, la estructura cristalina es monoclinica, formada por ocho moléculas de agua y seis unidades de glucosa unidas en doble hélice. En el caso de la estructura tipo B, existen gran cantidad de amilopectina, y se forma una estructura hexagonal, conformada por 36 moléculas de agua y seis unidades de glucosa en doble hélice. La estructura tipo C es una combinación de las estructuras tipo A y B, y finalmente la estructura tipo V, donde existe la presencia de lípidos, se da una estructura conformada por una hélice sencilla de seis moléculas de glucosa (Avérous y Halley, 2009).

Por ende, en la literatura se han realizado mediciones con el fin de observar las variaciones estructurales del almidón en función del proceso de extracción, así como modificaciones en su estructura por la inclusión de compuestos químicos en la mejora de sus propiedades. Esto es posible debido a la medición de los difractogramas a bajos valores de la posición 2θ , generalmente $2-50^\circ$, y velocidades de barrido bajas. Con valores posición de los picos de difracción característicos, es posible identificar el tipo de cristalinidad del almidón obtenido (Andrade et al., 2020; Araújo et al., 2020; da Silva et al., 2020; de Souza Silva et al., 2020; Dong et al., 2021; Oyeyinka et al., 2020; Punia et al., 2020; Rodriguez-Garcia et al., 2021; Zhang et al., 2020).

De igual manera, se han realizado análisis a muestras provenientes de almidón mediante espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS). Esta técnica consiste en la medición de la fotoemisión producida por la radiación introducida (rayos X) con la superficie del material, la cual proporciona información sobre los elementos químicos presentes en la muestra: oxidación, átomos enlazantes, orbitales moleculares, entre otras (Watts y Wolstenholme, 2003). Para el almidón, la medición mediante esta técnica ha

mostrado los átomos de carbono formando los enlaces -C-O-, O-C-O-, -C-C- y -C-H- a los valores de energía enlace de 284, 285 y 286 eV, aproximadamente. De igual forma, para los átomos de oxígeno se observan los enlaces debido al enlace con átomos de oxígeno en la estructura, como el pico asociado el enlace glicosídico, a valores de energía de enlace de aproximadamente 530, 531 y 532 eV (Luo et al., 2013; Moreira et al., 2017).

6.3.- Líquido de cáscara de nuez del anacardo.

6.3.1. - Generalidades.

El líquido de cáscara de nuez del anacardo (CNSL) está presente en el anacardo (*Anacardium occidentale* L.), específicamente en el mesocarpio de las cáscaras de ésta, de ahí su respectivo nombre, este aceite alquilfenólico es de apariencia marrón rojiza y posee una alta viscosidad (Kyei et al., 2020; Philip et al., 2008; Preethi et al., 2021; Remya et al., 2016). En los últimos años, el CNSL ha logrado cierto protagonismo como materia prima, debido al contenido de compuestos fenólicos naturales con un alto valor agregado, específicamente, en la producción de biopolímeros (Balgude y Sabnis, 2014; Mwakalesi y Potter, 2021).

Este subproducto renovable constituye alrededor de un tercio (1/3) de la masa total del anacardo y puede ser extraído por diferentes métodos, tales como: extracción mecánica o con solventes, proceso de aceite caliente, procesos de fluidos supercríticos y destilación al vacío (Edoga et al., 2006; Koteich-Khatib et al., 2019; Nambela et al., 2022; Rwahwire et al., 2018; Sharma et al., 2020).

La composición del CNSL se ve afectada por el método de extracción implementado, esto es, cuando se utiliza la extracción con solventes (sin calentamiento), el CNSL es natural (CNSLn) y su composición viene dada por ácido anacárdico, cardol, cardanol y trazas de 2-metilcardol, siendo el primero de ellos el componente mayoritario (Hamad & Mubofu, 2015; Nogueira Maia et al., 2015; Rwahwire et al., 2018; Sharma et al., 2020), como puede observarse en la **Figura 6.3**.

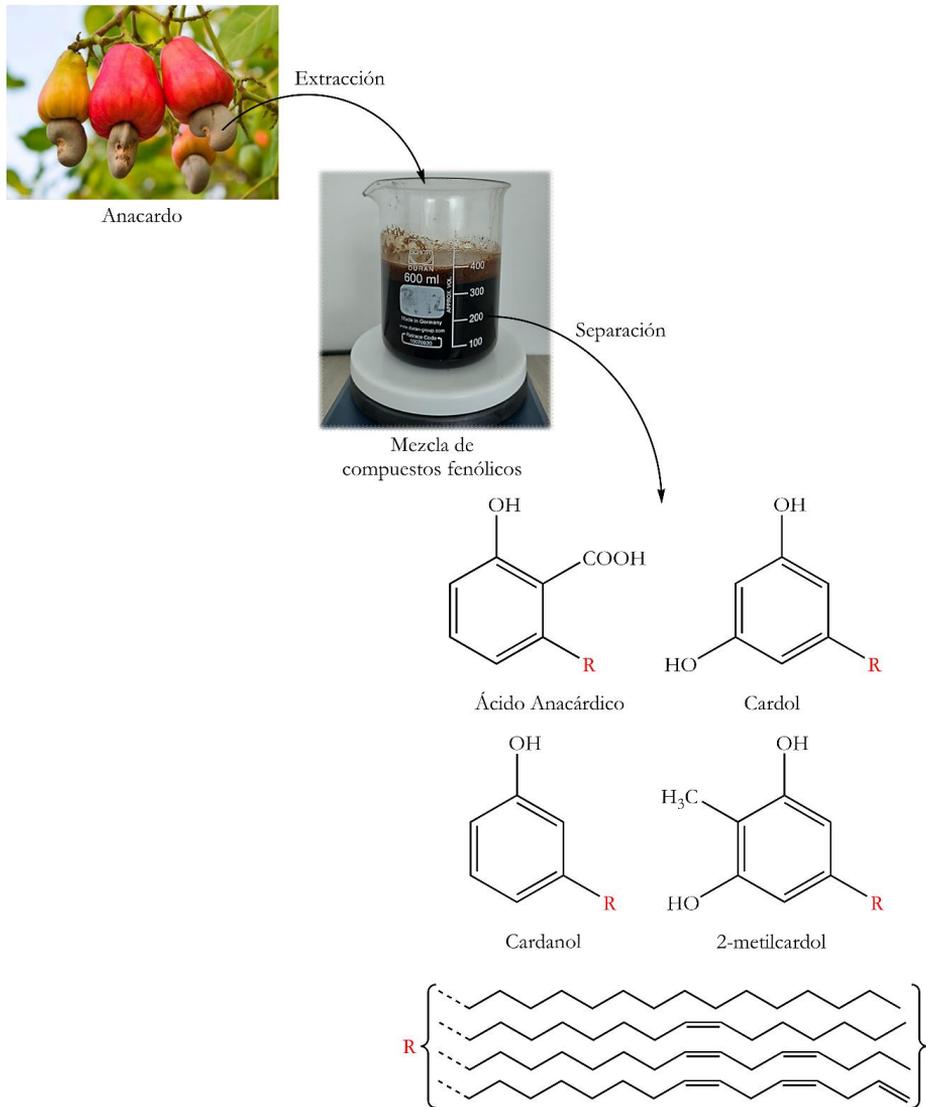


Figura 6.3. Estructura química de los compuestos CNS.

A nivel estructural, la **Figura 6.3** muestra que el ácido anacárdico y el cardanol, son compuestos fenólicos monovalentes (un grupo -OH), en cambio el cardol y 2-metilcardol son divalentes (dos grupos OH). Además, todos estos compuestos fenólicos están meta sustituidos, respecto al grupo fenol, por largas cadenas carbonadas hidrofóbicas, R, que difieren en el grado de saturación, esto es, saturado (C15:0), monoinsaturado (C15:1), diinsaturado (C15:2) y triinsaturado (C15:3) (Araújo Lima et al., 2020; Bueno et al., 2018; Hamad y Mubofu, 2015; Kyei et al., 2020; Morais et al., 2017; Nambela et al., 2022; Rwahwire et al., 2018; Soares Costa Oliveira et al., 2011; Vasconcelos et al., 2021). Ahora, debido al carácter anfipático que presentan, son muy útiles para formar reacciones de polimerización, por medio de mecanismos de adición y condensación. Además, la combinación del anillo aromático y las cadenas laterales alquílicas, ayudan a mantener el equilibrio entre las propiedades de flexibilidad y dureza en los procesos de encapsulamientos (Balgude y Sabnis, 2014).

Sin embargo, cuando se aplica calentamiento, con temperaturas de 180 a 200 °C, el CNSL es técnico (CNSLt) y, su composición química se constituye por cardanol, cardol y trazas de 2-metilcardol, con un alto porcentaje de abundancia para el primero de ellos, ya que el ácido anacárdico sufre una descarboxilación provocando la formación del cardanol (Hamad & Mubofu, 2015; Morais et al., 2017; Soares Costa Oliveira et al., 2011; Vasconcelos et al., 2021). Esta reacción es mostrada en la **Figura 6.4**.

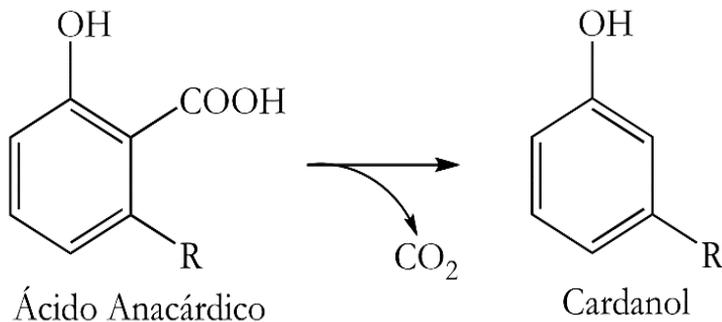


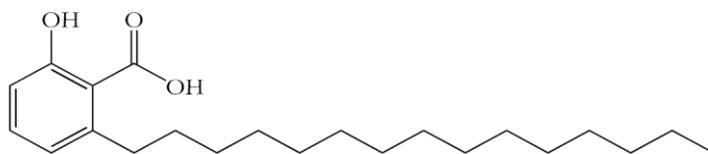
Figura 6.4. Conversión de ácido anacárdico en cardanol mediante descarboxilación.

6.3.2. - Aceites derivados del líquido de cáscara de nuez del anacardo.

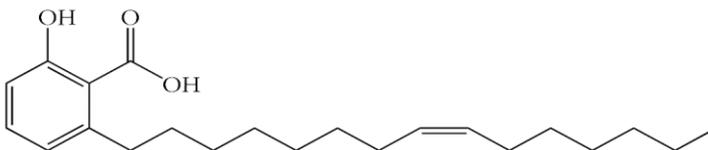
El **ácido anacárdico** (AA) es un líquido marrón rojizo que se encuentra en el CNSL y es el componente fenólico con mayor porcentaje de abundancia, aproximadamente 70 % en masa (Rwahwire et al., 2018). Químicamente, el AA es una mezcla de varios compuestos orgánicos que están estrechamente relacionados. Cada uno consta de un ácido salicílico monosustituido por una cadena alquílica de 15 átomos de carbono (saturada o insaturada), en la posición orto respecto al grupo carboxilo (Oliveira et al., 2022). De esta manera, sus principales componentes son los ácidos 2-hidroxi-6-pentadecilbenzoico, 2-hidroxi-6-(pentadec-8-enil)benzoico, 2-hidroxi-6-(pentadeca-8,11-dienil)benzoico y 2-hidroxi-6-(pentadeca-8,11,14-trienil)benzoico (ver **Figura 6.5**), siendo este último la especie de mayor abundancia; por tal motivo, el AA es llamado ácido 2-hidroxi-6-[(8Z,11Z)-pentadeca-8,11,14-trienil]benzoico (Anjum et al., 2019; Koteich Khatib et al., 2020).

La estructura química de este fitoquímico lo convierte en un buen candidato como material de partida en muchas reacciones químicas para producir una amplia variedad de productos útiles en el campo industrial, como por ejemplo el cardanol descrito por la reacción química mostrada en la **Figura 6.4** (Balgude & Sabnis, 2012; Koteich-Khatib et al., 2019; Nambela et al., 2022; Oliveira et al., 2022; Philip et al., 2007, 2008). Además, se ha utilizado como sintón para la síntesis de productos biológicamente activos (Hamad y Mubofu, 2015).

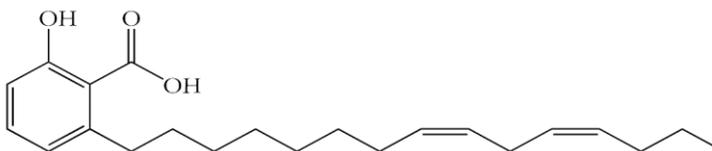
Con respecto a la extracción, Paramashivappa et al. en 2001 desarrollaron un método para extraer el ácido anacárdico a partir del CNSL sin calentamiento (Paramashivappa et al., 2001), debido al proceso de descarboxilación que sufre el AA (ver **Figura 6.4**). Este método consiste en disolver 100 g de CNSL en 600 ml de una solución hidroalcohólica de CH₃OH al 5 % y posteriormente, se adicionan 50 g Ca(OH)₂, en porciones, manteniendo agitación constante, luego, someter lo anterior a 50 °C por 3 h, con agitación constante. Terminada la reacción, se filtra el anacardato de calcio, y se lava con 200 ml de CH₃OH y se seca al vacío a 45-50 °C por 2 h.



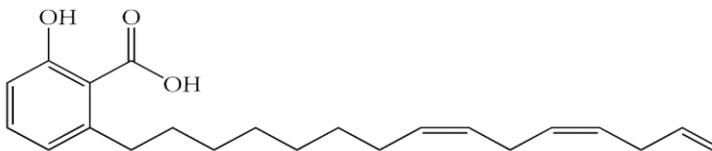
Ácido 2-hidroxi-6-pentadecilbenzoico



Ácido (Z)-2-hidroxi-6-(pentadec-8-en-1-il)benzoico



Ácido 2-hidroxi-6-((8Z,11Z)-pentadeca-8,11-dien-1-il)benzoico



Ácido 2-hidroxi-6-((8Z,11Z)-pentadeca-8,11,14-trien-1-il)benzoico

Figura 6.5. Estructura química de los compuestos derivados del AA.

A continuación, se dispersa el anacardo de calcio seco en 440 ml de agua destilada, seguidamente, se adicionan 60 ml de solución acuosa de HCl 11 M y se agita por 1 h. Se mezcla la solución resultante con acetato de etilo (2 x 150 ml), con el fin de obtener dos fases: orgánica y acuosa. Se lava la fase orgánica con agua destilada (2 x 100 ml), se seca sobre Na₂SO₄ anhidro y se concentra a presión reducida, para obtener finalmente 60 g de ácido anacárdico. Por último, la mezcla de AA se almacena para análisis posteriores (Koteich-Khatib et al., 2019; Paramashivappa et al., 2001; Preethi et al., 2021). Este proceso es esquematizado en la **Figura 6.6**.

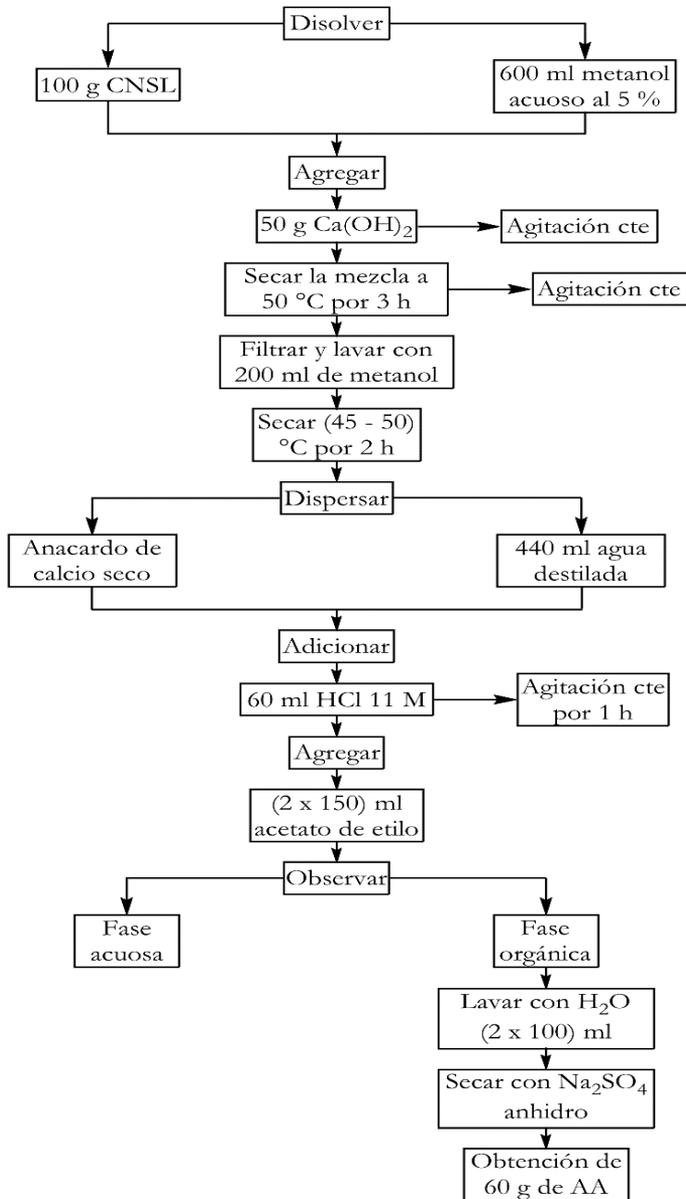


Figura 6.6. Diagrama de flujo de extracción de ácido anacárdico del CNSL.

El ácido anacárdico extraído del CNSL ha sido identificado, caracterizado y cuantificado por diferentes métodos espectroscópicos y analíticos, tales como resonancia magnética nuclear protónica y de carbono 13 (RMN ^1H y RMN ^{13}C , tanto uni- como bidimensionales), espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis), espectroscopía de infrarrojo (FTIR), espectroscopía de rayos X (XRD), análisis elemental, espectrometría de masas (MS), cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC/MS) y cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).

Los resultados mostraron la presencia de este ácido, y se evidenció que mediante las técnicas realizadas, se identificó el compuesto mediante los enlaces presentes, tipo de átomo, así como el ordenamiento de los átomos en la estructura y su pureza (Cheng et al., 2022; Koteich-Khatib et al., 2019, 2020; Morais et al., 2017; Oliveira et al., 2022; Osman et al., 2019; Paiva Filho et al., 2019; Philip et al., 2008; Preethi et al., 2021; Serrão Pinto et al., 2021; Trevisan et al., 2006; Yuliana et al., 2014).

La **Figura 6.7** muestra el espectro FTIR del ácido anacárdico (AA) extraído del CNSL. El espectro FTIR del AA revela la presencia de bandas localizadas a 3015 cm^{-1} y 1259 cm^{-1} (estiramiento O-H), 3008 cm^{-1} (grupo aromático), 2922 cm^{-1} y 910 cm^{-1} (-COOH), 1156 cm^{-1} y 1538 cm^{-1} (carboxilo C-C), 1458 cm^{-1} (tensión C-H) y 1418 cm^{-1} (C=C aromático). Estos resultados son muy similares a los obtenidos en un estudio realizado por Preethi et al., en la que se desarrollaron películas biopoliméricas con ácido anacárdico (AA) incorporado al quitosano (CH) para aplicaciones activas (Preethi et al., 2021).

Por otro lado, Koteich et al. caracterizaron el AA extraído del CNSL mediante espectroscopía RMN protónica y de carbono 13, utilizando un espectrómetro de RMN Bruker Avance DRX 400 MHz, con el fin de elucidar la estructura molecular del AA (Koteich-Khatib et al., 2019). En dicho estudio, los espectros RMN ^1H y ^{13}C revelaron el ambiente químico de los átomos de hidrógeno y carbono en el monómero, mostrando la distribución de estos átomos.

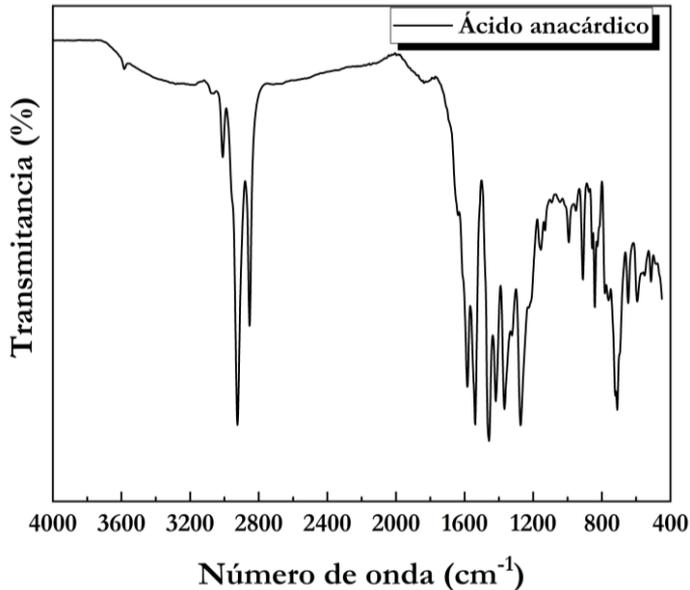
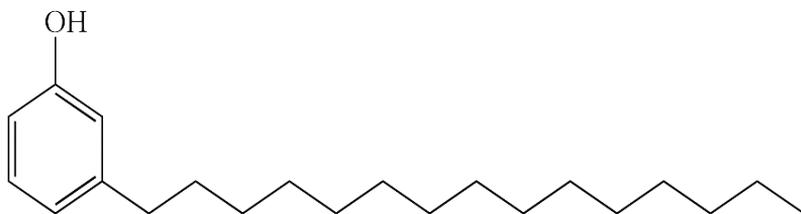


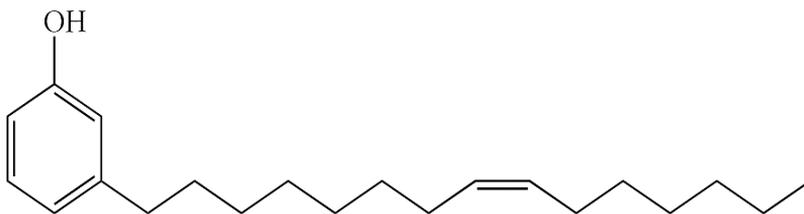
Figura 6.7. Espectro FTIR de ácido anacárdico extraído del líquido de cáscara de nuez del anacardo.

El *cardanol* (CA), es el principal compuesto monofenólico del CNSL, con un 60 a 65 % de su masa. Al igual que el ácido anacárdico, el cardanol es una mezcla de compuestos tensoactivos, ya que posee dos partes: una cabeza ligeramente polar que contiene un heteroátomo como el oxígeno, el cual está presente en el grupo fenoxi, y una cola no polar de tipo alquilo, la cual varía el grado de saturación (Chatterjee et al., 2017; Lyu y Ishida, 2019; Ribeiro Oliveira et al., 2019), como se muestra en la **Figura 6.8**.

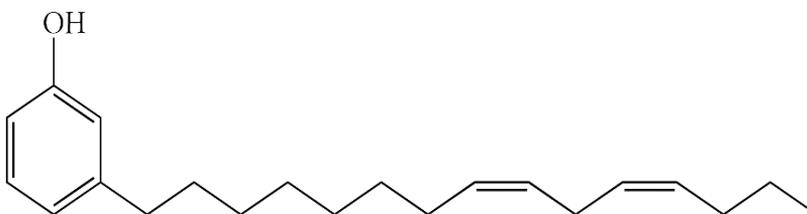
Esta dualidad funcional, la cual es mostrada en la **Figura 6.9**, permite que el cardanol pueda experimentar varias reacciones químicas como sulfonación, esterificación, nitración, eterificación, epoxidación y halogenación, con el fin de crear nuevos derivados anfílicos y tensoactivos que puedan ser aprovechados para futuras aplicaciones (Balgude y Sabnis, 2014; Kyei et al., 2020; Lomonaco et al., 2017).



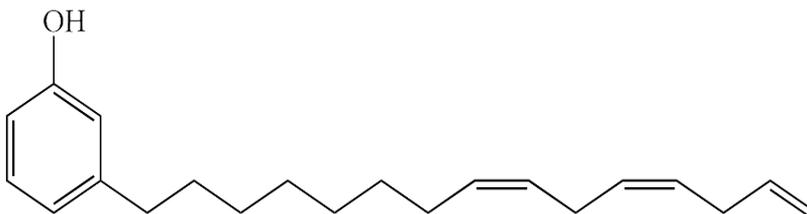
3-pentadecilfenol



(Z)-3-(pentadec-8-en-1-il)fenol



3-((8Z,11Z)-pentadeca-8,11-dien-1-il)fenol



3-((8Z,11Z)-pentadeca-8,11,14-trien-1-il)fenol

Figura 6.8. Estructura química de los compuestos derivados del cardanol.

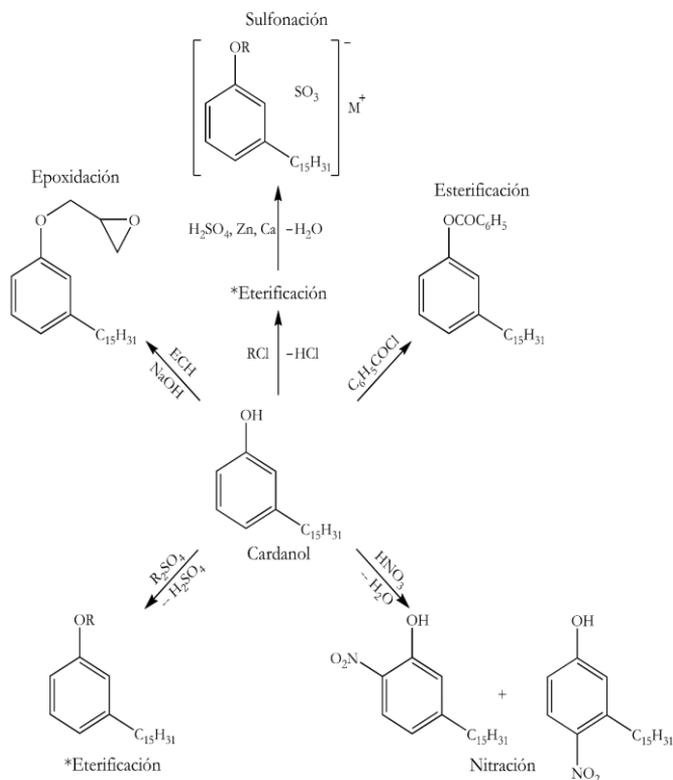


Figura 6.9. Algunas reacciones químicas del cardanol como precursor de otros productos.

Phani Kumar y colaboradores en 2002, desarrollaron un método muy eficiente para aislar cardanol del CNSLt, el cual consiste en disolver 100 g de CNSLt en 320 ml de CH_3OH y a continuación, agregar 200 ml de NH_4OH al 25 %, manteniendo agitación constante por 15 min. A la solución anterior, adicionar hexano (4 x 200 ml) para obtener dos fases: orgánica y acuosa, a continuación, lavar la capa orgánica con 100 ml de HCl al 5 % seguido de 100 ml de agua destilada. Posteriormente, agregar 10 g de carbón activado, agitar por 10 min y filtrar a través de 15 g de Celita. Por último, secar el filtrado sobre Na_2SO_4 anhidro y concentrar para obtener 65 g de cardanol puro (Phani Kumar et al., 2002), como puede observarse en la **Figura 6.10**.

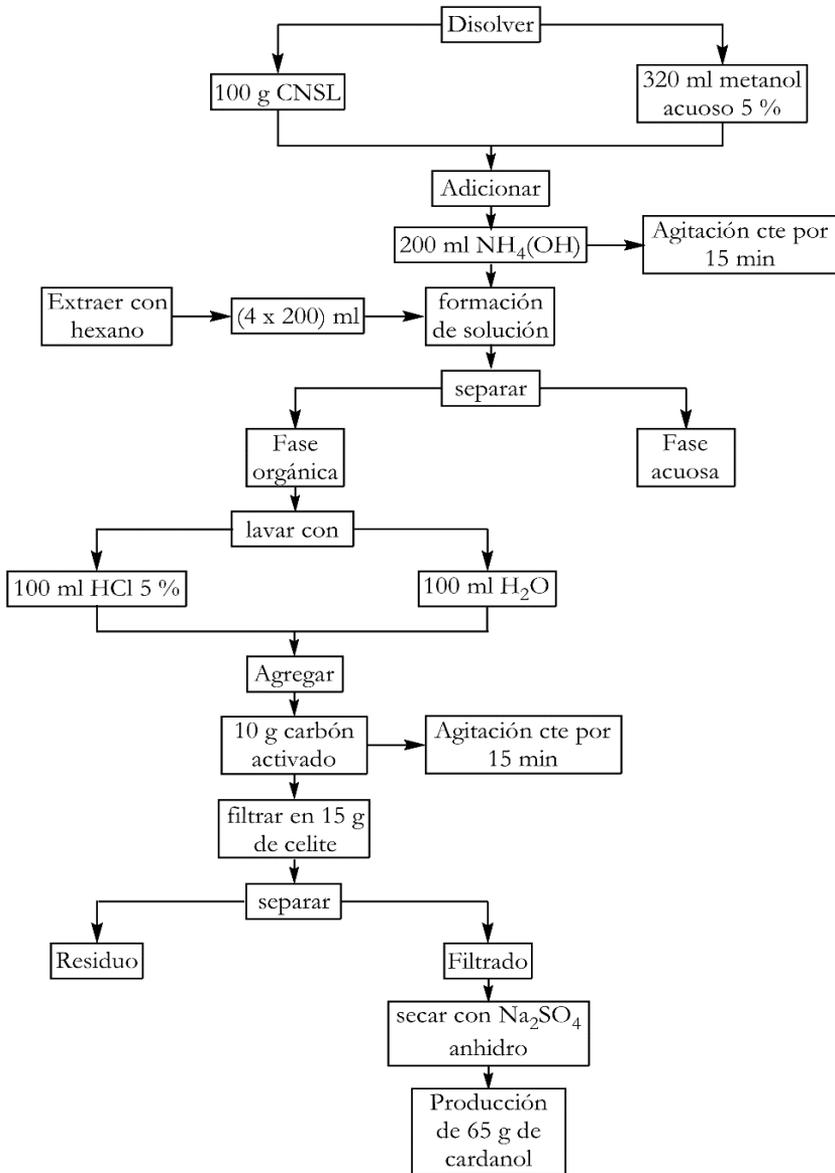


Figura 6.10. Diagrama de flujo de extracción de cardanol de CNSL.

El cardanol extraído del CNSL puede ser caracterizado por diferentes técnicas que involucran tanto métodos espectroscópicos como analíticos, siendo alguna de ellas la espectroscopía resonancia magnética nuclear protónica y de carbono 13 (RMN ^1H y RMN ^{13}C), espectrometría de masas y cromatografía líquida de alta resolución (Lee et al., 2018; Mele et al., 2019; Mishra et al., 2018; Natarajan y Murugavel, 2017; Paramashivappa et al., 2001; Phani Kumar et al., 2002). La **Figura 6.11** muestra el espectro FTIR del cardanol extraído del CNSL. En dicho espectro se evidencian las bandas características del cardanol, esto es, una banda de estiramiento correspondiente al grupo OH en 3012 cm^{-1} y 1267 cm^{-1} , dos picos bien pronunciados en 2865 cm^{-1} y 2925 cm^{-1} (estiramiento C-H), la banda pronunciada en 1596 cm^{-1} se atribuye a la tensión C=C presente en el anillo aromático (Lee et al., 2018; Yuliana et al., 2014).

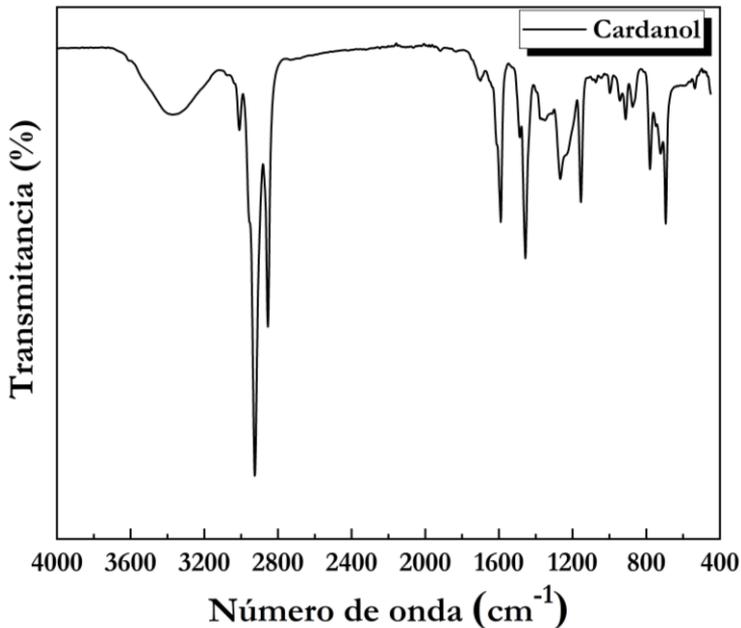


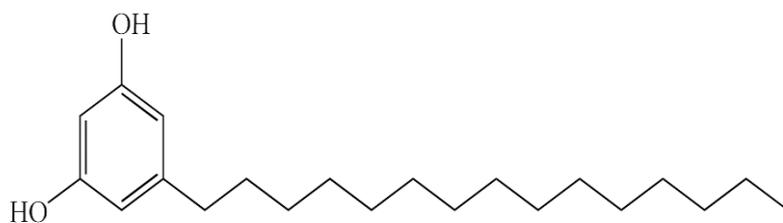
Figura 6.11. Espectro FTIR del cardanol extraído del líquido de cáscara de nuez del anacardo.

El cardol es un compuesto fenólico que se encuentra presente en el CNSL_n con un porcentaje de abundancia del 18 % en masa. A diferencia del AA y cardanol, la estructura química del cardol presenta dos grupos hidroxilos (-OH) en las posiciones 1 y 3 del anillo aromático, los cuales proporcionan un alto grado de hidrofiliidad y reactividad a dicho compuesto. Además, el cardol es un resorcinol meta sustituido por largas cadenas alquílicas hidrofóbicas R, que difieren en el grado de saturación (Araújo Lima et al., 2020; Buono et al., 2018; Hamad y Mubofu, 2015; Kyei et al., 2020; Morais et al., 2017; Nambela et al., 2022; Rwahwire et al., 2018; Soares Costa Oliveira et al., 2011), como se esquematiza en la **Figura 6.12**.

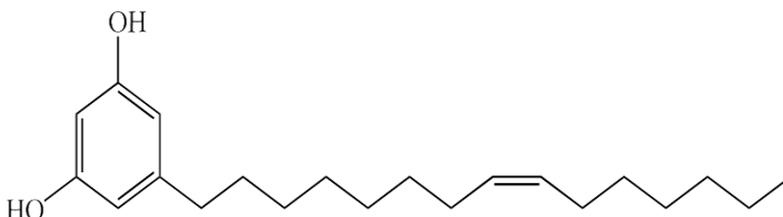
Debido a su carácter anfipático, puede ser de gran utilidad para dar lugar a reacciones de polimerización, por medio de mecanismos de adición y condensación. Así mismo, a una variabilidad de reacciones químicas, tales como eterificación, esterificación, hidrogenación, sulfonación, nitración y epoxidación, con la finalidad de generar productos con valor agregado (Balgude y Sabnis, 2014; Nambela et al., 2022).

Paramashivappa et al., describieron un método muy eficiente para el aislamiento del cardol del CNSL_t, el cual consistió en la disolución de 100 g de CNSL_t en 320 ml de CH₃OH, seguido de 200 ml NH₄OH al 25 % y posteriormente sometido a agitación por 15 min. Luego, se extrae la solución metanólica de amoníaco con acetato de etilo/hexano (4:1) (2 x 200 ml), con la finalidad de obtener dos fases: orgánica y acuosa. A continuación, se lava la capa orgánica con 100 ml de solución acuosa de HCl al 5 % v/v y luego con 100 ml de agua destilada. Luego, el material obtenido se seca sobre Na₂SO₄ anhidro y se concentra. Con este método se obtienen 20 g de cardol puro (Phani Kumar et al., 2002).

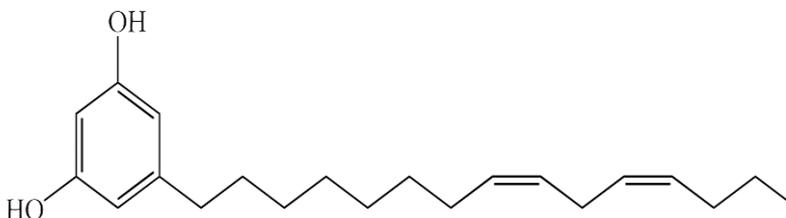
El cardol extraído del CNSL puede ser caracterizado por diferentes técnicas que involucran tanto métodos espectroscópicos como analíticos, tales como RMN ¹H y ¹³C, MS y HPLC, identificando el compuesto químico (Yuliana et al., 2014). De igual forma, este compuesto extraído del CNSL se ha caracterizado por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).



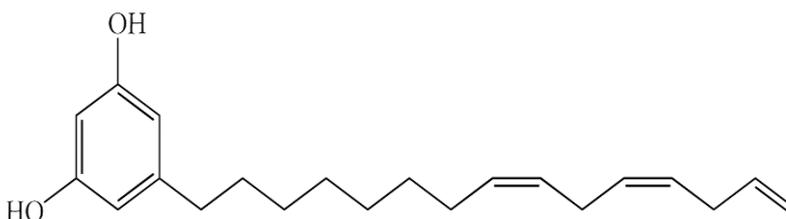
5-pentadecilbenceno-1,3-diol



(Z)-5-(pentadec-8-en-1-il)benceno-1,3-diol



5-((8Z,11Z)-pentadeca-8,11-dien-1-il)benceno-1,3-diol



5-((8Z,11Z)-pentadeca-8,11,14-trien-1-il)benceno-1,3-diol

Figura 6.12. Estructura química de los compuestos derivados del cardol.

La **Figura 6.13** muestra el espectro FTIR del cardol extraído del CNSL, el cual evidencia los picos característicos de tal compuesto, por ejemplo, las bandas a 3012 cm^{-1} y 1274 cm^{-1} se atribuyen al modo vibracional del enlace O-H, los picos bien pronunciados en 2854 cm^{-1} y 2928 cm^{-1} se deben al estiramiento C-H alquílicos y aromáticos, respectivamente. Así mismo, las tensiones a 1156 cm^{-1} y 1581 cm^{-1} son atribuidas al enlace C-C, las bandas a 1456 cm^{-1} y 1375 cm^{-1} se deben al modo vibracional de los enlaces C-H y C=C presentes en el anillo aromático, respectivamente (Yuliana et al., 2014).

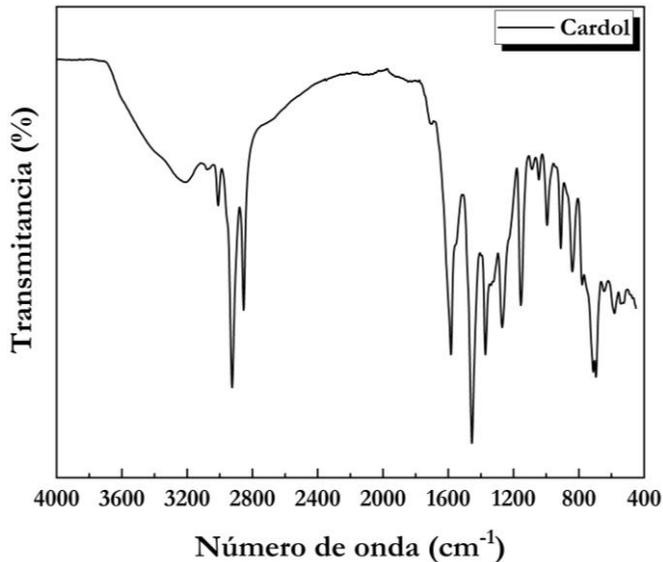


Figura 6.13. Espectro FTIR del cardol extraído del líquido de cáscara de nuez del anacardo.

6.4. - Biopolímeros compuestos de almidón con derivados del líquido de cáscara de nuez del anacardo.

La conservación del medio ambiente ha sido tema de mucho interés a causa del agotamiento y efectos nocivos de las sustancias petroquímica en la formación de polímeros. Por esta razón, la comunidad científica está

encaminada en la búsqueda de sustancias benignas con el medio ambiente, puesto que la química convencional representa una amenaza para la sostenibilidad ambiental y salud humana. Dentro de las posibilidades para mitigar tal impacto, se encuentran las sustancias verdes, las cuales son renovables, biodegradables, versátiles, no tóxicas, ecológicas, económicas y amigables con el medio ambiente. Estas propiedades hacen que dichos compuestos sean los nuevos protagonistas para satisfacer la creciente demanda mundial (Islam et al., 2022). En este sentido, múltiples investigaciones han utilizado estos compuestos en la creación de nuevos biomateriales, siendo el almidón, uno de los materiales promisorios en la búsqueda de nuevos usos y aplicaciones (Espinoza Orellana y Beltrán, 2019; Giroto et al., 2020; Gruber Chiaregato y Faez, 2021; Gungula et al., 2021; León, et al., 2019; León, et al., 2019; Pimsen et al., 2021; Sarkar et al., 2021; Zafar et al., 2021). El almidón es un polisacárido natural que ha logrado convertirse en objeto de estudio para la obtención de biopolímeros gracias a sus propiedades. Por otro lado, resulta conveniente mencionar que, en la formación de los nuevos compuestos biopoliméricos, la estructura molecular del almidón se ve afectada por procesos físicos o químicos, dando lugar a compuestos con nuevas propiedades que pueden ser aprovechados en diferentes campos (García-Guzmán et al., 2022; Tarique et al., 2022).

Otras sustancias que han participado en temas de producción de compuestos biopoliméricos son los compuestos fenólicos derivados del CNSL, esto es, ácido anacárdico, cardol y cardanol, principalmente. El auge de estas sustancias se debe primordialmente a sus propiedades antiinflamatorias, antifúngicas, antioxidantes, antibacterianas y alta reactividad química, debido a los grupos funcionales que poseen (Nasrollahzadeh et al., 2019; Preethi et al., 2020, 2021; Ramos et al., 2018). En relación con lo anterior, se ha venido trabajando en la obtención de materiales compuestos basados en almidón y sustancias derivadas del líquido de cáscara de nuez del anacardo.

6.4.1 - Síntesis de biopolímeros de almidón y sustancias derivadas de CNSL.

Uno de los procesos de síntesis consiste en la mezcla de almidón con diferentes sustancias derivadas de CNSL y agentes plastificantes o

entrecruzantes. A continuación, se presenta de manera resumida, una de las metodologías utilizadas: el diseño experimental con la cual se llevó a cabo la síntesis de biopolímeros a base de almidón con derivados del líquido de cáscara de nuez del anacardo, el cual se muestra en la **Tabla 6.1**.

Tabla 6.1. Diseño factorial 3x3 para la síntesis de biopolímeros a base de almidón con derivados del CNSL. Los niveles son la cantidad del derivado de CNSL y pH.

Ensayo	Derivado del CNSL (g)	pH	LiClO ₄ (g)	Gly (g)	Glu (g)	PEG (g)
1	0.0	3.0	1.5	1.0	2.0	1.0
2	0.5	3.0	1.5	1.0	2.0	1.0
3	1.0	3.0	1.5	1.0	2.0	1.0
4	2.0	3.0	1.5	1.0	2.0	1.0
5	0.0	5.0	1.5	1.0	2.0	1.0
6	0.5	5.0	1.5	1.0	2.0	1.0
7	1.0	5.0	1.5	1.0	2.0	1.0
8	2.0	5.0	1.5	1.0	2.0	1.0
9	0.0	7.0	1.5	1.0	2.0	1.0
10	0.5	7.0	1.5	1.0	2.0	1.0
11	1.0	7.0	1.5	1.0	2.0	1.0
12	2.0	7.0	1.5	1.0	2.0	1.0
13	0.0	9.0	1.5	1.0	2.0	1.0
14	0.5	9.0	1.5	1.0	2.0	1.0
15	1.0	9.0	1.5	1.0	2.0	1.0
16	2.0	9.0	1.5	1.0	2.0	1.0
17	0.0	10.0	1.5	1.0	2.0	1.0
18	0.5	10.0	1.5	1.0	2.0	1.0
19	1.0	10.0	1.5	1.0	2.0	1.0
20	2.0	10.0	1.5	1.0	2.0	1.0
21	0.0	12.0	1.5	1.0	2.0	1.0
22	0.5	12.0	1.5	1.0	2.0	1.0
23	1.0	12.0	1.5	1.0	2.0	1.0
24	2.0	12.0	1.5	1.0	2.0	1.0

Este diseño experimental consistió en mezclar 3.0 g de almidón con 100 ml de agua a tres niveles de pH: ácido (3.0 y 5.0), neutro (7.0) y alcalino (9.0,

10.0 y 12.0), manteniendo agitación constante a 1500 rpm., hasta disolver el almidón completamente. La mezcla anterior fue calentada a 70 °C (proceso de gelatinización) manteniendo agitación constante a 1500 rpm, por 15 minutos, seguidamente se deja enfriar a temperatura ambiente. Luego, se adicionaron los siguientes plastificantes: glicerol (Gly, 1.0 g), polietilenglicol (PEG, 1.0 g) y glutaraldehído (Glu, 2.0 g). Además, se agregó LiClO₄ (1.5 g) y el derivado del CNSL (0.0, 0.5, 1.0 y 2.0 g), posteriormente se aumentó la temperatura a 70 °C y se agitó a 1500 rpm, por 15 min. Pasado este tiempo, las mezclas se depositaron en recipientes antiadherentes y se secan en una estufa a 70 °C por 48 horas (Arrieta et al., 2021). En la **Figura 6.14** se muestran algunos de los biopolímeros elaborados a base de almidón con derivados del líquido de cáscara de nuez del anacardo, comparados con el biopolímero de almidón, sintetizados a pH = 7.0. En el caso del biopolímero de almidón (ver **Figura 6.14A**), la biopelícula es transparente, y homogénea. Cuando se compara el biopolímero de almidón con el biopolímero producido con ácido anacárdico, la coloración rojiza muestra la incorporación de éste en el almidón, como se observa en la **Figura 6.14B**. Asimismo, se evidencia rugosidad, producto de la inclusión de este componente extraído del CNSL. La **Figura 6.14C** muestra la comparación del almidón con el cardanol, el cambio de coloración mostró la inclusión de este compuesto en la estructura del biopolímero de almidón, debido a la coloración café de éste. Estas coloraciones mostradas también se corresponden con los biopolímeros elaborados, en el orden registrado en la **Tabla 6.1**.

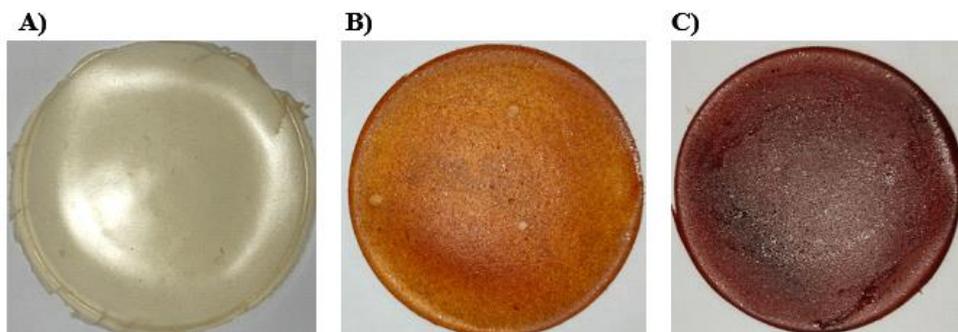


Figura 6.14. Biopolímeros elaborados. A) almidón, B) almidón + ácido anacárdico, C) almidón + cardanol. Elaboradas a pH 7.0 y con 1.0 g de derivado de CNSL.

6.4.2. – Caracterización.

Para llevar a cabo la caracterización se realizaron mediciones por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR). En la **Figura 6.15** se muestra el espectro FTIR de los biopolímeros de almidón y almidón + ácido anacárdico, producidos a pH 3.0. En esta se observan las bandas características, las cuales están presentes tanto en el almidón como en el ácido anacárdico; esto es, las vibraciones de los enlaces C–H (alifáticos) y O–H, se evidencian en la región de 2855 - 2930 cm^{-1} y 3209 - 3388 cm^{-1} , respectivamente. Así mismo, las señales a 3005 cm^{-1} (estiramientos C–H aromático), 2922 cm^{-1} y 929 cm^{-1} (vibración del grupo –COOH del AA), 1646 cm^{-1} (tensión C=C del anillo bencénico) y los modos de flexión C–O–H se evidencia por la banda a 1079 cm^{-1} (Kizil et al., 2002; Preethi et al., 2021). Los espectros FTIR a diferentes cantidades de ácido y valores de pH (ver **Tabla 6.1**) no muestran desplazamientos significativos de los enlaces presentes, en comparación al almidón, y el ancho de las bandas también es similar, ya que tienen grupos funcionales comunes. Por lo anterior, se comprueba la presencia de los grupos funcionales del AA en los diferentes biopolímeros sintetizados.

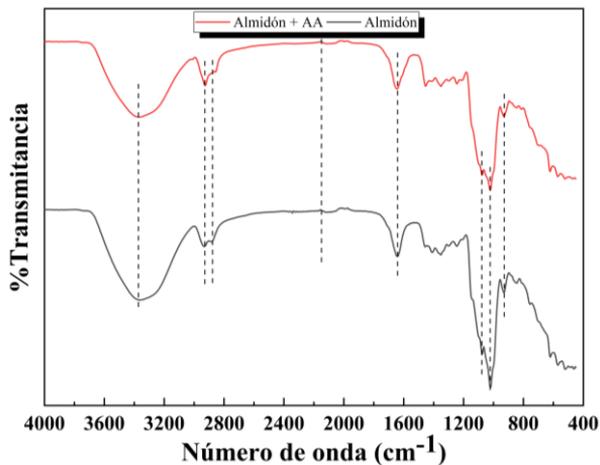


Figura 6.15. Espectro FTIR para los biopolímeros de almidón y almidón + ácido anacárdico (pH 3.0 y 2.0 g de AA). Las líneas punteadas son una guía a la vista.

Por otro lado, en la **Figura 6.16** se muestran el espectro FTIR del biopolímero elaborado con almidón y cardanol a pH 7.0, el cual se compara con el biopolímero de almidón preparado a las mismas condiciones. A partir de estos se observan las bandas asociadas al almidón y cardanol, esto es, las vibraciones de los enlaces O–H y C–H (alifáticos) se evidencian en la región de 3294 - 3409 cm^{-1} y 2882 - 2940 cm^{-1} , respectivamente. Así mismo, las bandas a 1645 cm^{-1} (tensión C=C del anillo bencénico) y los modos de flexión C–O–H se evidencia en la banda a 1081 cm^{-1} (Kizil et al., 2002; Lee et al., 2018; Yuliana et al., 2014). Por lo anterior, se comprueba la presencia de los grupos funcionales del cardanol en los diferentes biopolímeros sintetizados. No se evidencia un cambio significativo en la forma de las bandas con el incremento de la cantidad de cardanol, teniendo en cuenta el diseño experimental (ver **Tabla 6.1**). De igual forma, el ancho de las bandas es evidencia del solapamiento de éstas, por los grupos funcionales que son comunes entre el almidón y el cardanol. Asimismo, se realizó el espectro FTIR para el almidón de yuca con el extracto de la nuez del anacardo (ver **Figura 6.17**), para realizar una comparación con los biopolímeros sintetizados.

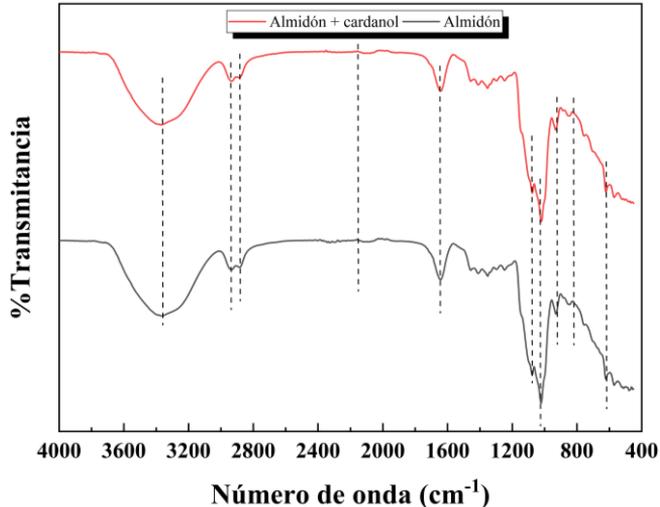


Figura 6.16. Espectro FTIR para los biopolímeros de almidón y almidón + ácido anacárdico (pH 7.0 y 2.0 g de cardanol). Las líneas punteadas son una guía a la vista.

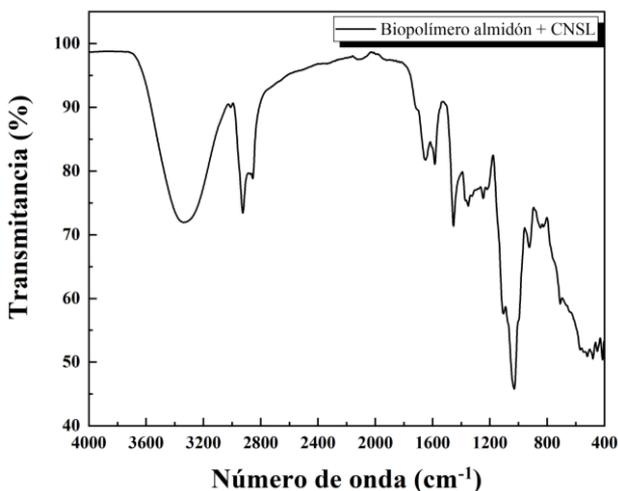


Figura 6.17. Espectro infrarrojo para el biopolímero producido a base de almidón y el extracto CNSL.

El espectro muestra las bandas características a los enlaces químicos asociados tanto al almidón como al CNSL: -OH, -CH₂-, -C-OH, -COO-, y anillo aromático. Cabe anotar que las bandas están solapadas, ya que presentan enlaces comunes. De igual forma, estas bandas aparecen en los biopolímeros de almidón con ácido anacárdico y cardanol (ver **Figura 6.15**) y cardanol (ver **Figura 6.16**).

Por otra parte, se han realizado estudios de las propiedades térmicas, mediante la técnica de DSC-TGA (del inglés *Differential Scanning Calorimetry - ThermoGravimetric Analysis*, calorimetría diferencial de barrido - análisis termogravimétrico). En la calorimetría diferencial de barrido, se determinan los cambios en una muestra debido a la acción del calor, en la que se dan transiciones asociadas al intercambio de energía, como lo son los procesos endotérmicos o exotérmicos. Tales procesos están ligados a reacciones químicas tales como deshidrataciones, oxidaciones, reducciones, cristalizaciones, entre otros (Elkordy, 2013; Höhne et al., 2003). En el caso del TGA, se cuantifica la pérdida o ganancia de masa de un material, producto de diversas reacciones, como deshidrataciones, degradaciones, producto de

la acción de la temperatura. A partir de las mediciones de TGA, se puede estudiar a profundidad los cambios de masa producidos, mediante la derivación del termograma, lo cual se denomina DTA (*Differential Thermic Analysis*, análisis térmico diferencial) (Menczel y Bruce Prime, 2009). Aplicando DTA, es posible maximizar las señales obtenidas en el termograma.

En la **Figura 6.18** se muestra el análisis térmico realizado al biopolímero elaborado con almidón de yuca y cardol, a un valor de pH de 12.0. El análisis térmico diferencial exhibe 4 procesos: 100, 180, 300 y 440 °C aproximadamente. El primer proceso puede corresponder a moléculas de agua adsorbidas, o reactivos de bajo punto de ebullición (Saraiva Rodrigues et al., 2020), como el glutaraldehído (p. eb. 101 °C). El segundo proceso puede asociarse a la descomposición de compuestos orgánicos remanentes, el tercer proceso se asocia a la descomposición térmica del almidón, mientras que la última señal observada se debe a la degradación de los gránulos del almidón. Mediante DSC, se establece que, para este biopolímero, los procesos son endotérmicos.

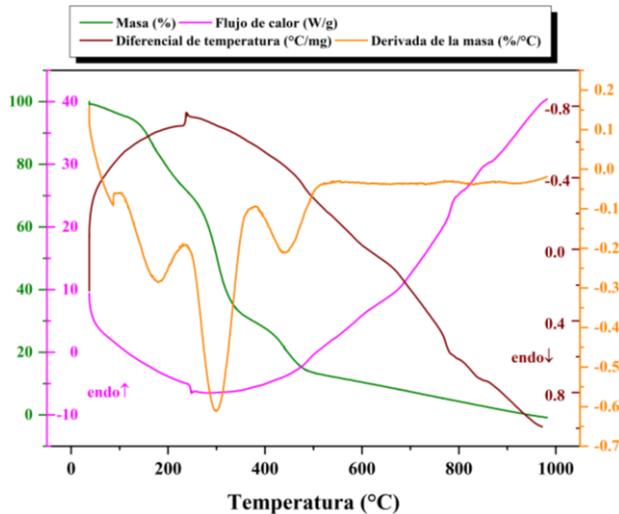


Figura 6.18. DSC-TGA-DTA para la muestra de biopolímero de almidón de yuca con extracto de cardol a pH 12.0.

En un experimento adicional, se elaboró un biopolímero con almidón y cardol, realizando una variación en el pH a un valor de 13.0, con la finalidad de observar los cambios producidos en el biopolímero por la acción de la concentración de iones hidróxido (OH^-). La medición de DSC-TGA, mostrada en la **Figura 6.19**, revela los siguientes procesos: 100 °C, 200 °C, 290 °C, 430 °C, y 780 °C. El proceso a 100 °C corresponde a la eliminación de moléculas de agua, la señal a 200 °C se asocia a la degradación de compuestos orgánicos presentes en el biopolímero, como ácidos grasos, entre otros; la señal a 290 °C evidencia la ruptura del polímero de almidón, la degradación granular del almidón aparece en 430 °C, aproximadamente, y el proceso de pirólisis es observado, a este valor de temperatura. Cabe destacar que este último proceso es endotérmico. Asimismo, al realizar la comparación con el termograma del biopolímero sintetizado a pH 12.0 (ver **Figura 6.18**), este último proceso, observado a 780 °C, no se observa. Este hecho puede corresponder al efecto de la variación sistemática del pH en el biopolímero.

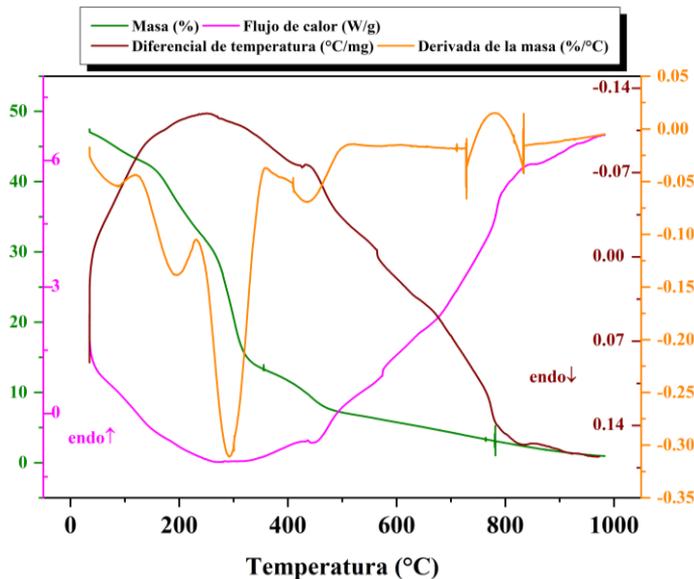


Figura 6.19. DSC-TGA-DTA para la muestra de biopolímero de almidón de yuca con extracto de cardol a pH 13.0.

Se realizó un experimento realizado como comparación, la **Figura 6.20** muestra las mediciones de DSC-TGA para el biopolímero de almidón de yuca, al cual se le agregó extracto de CNSL. Los siguientes valores de temperatura, provienen de dos procesos, las cuales se obtuvieron del análisis térmico diferencial: 277 y 433 °C. El primer proceso (277 °C) está asociado a la descomposición térmica del almidón. El segundo proceso, el cual se produce a 433 °C, corresponde a la degradación de los cristales de almidón (Saraiva Rodrigues et al., 2020). Con respecto a la parte de DSC, tanto el proceso de descomposición como de degradación de los cristales de almidón son endotérmicos. Al comparar con los biopolímeros de cardol (ver **Figuras 6.18** y **6.19**), el termograma para el biopolímero de almidón + CNSL solo muestra los procesos debidos a la ruptura de los enlaces asociados al almidón y la degradación de sus cristales. Por lo tanto, puede considerarse la importancia del uso de los compuestos químicos extraídos del derivado del extracto de la nuez del anacardo, así como el pH, para la elaboración de los biopolímeros, en la elucidación de los procesos térmicos generados.

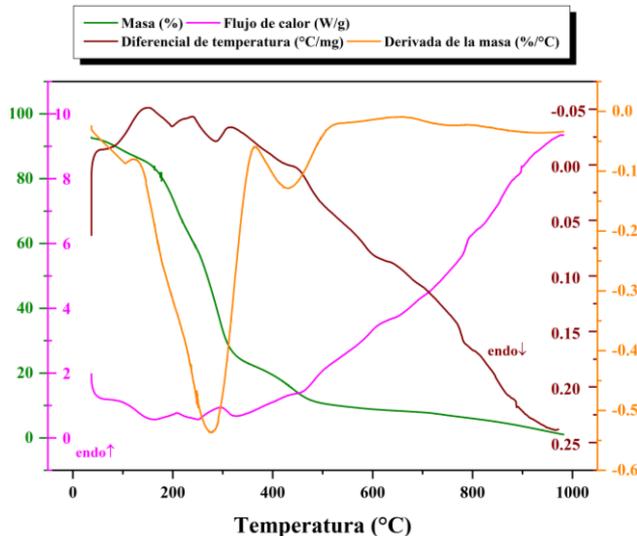


Figura 6.20. DSC-TGA-DTA para la muestra de biopolímero de almidón de yuca con extracto de CNSL.

De igual forma, mediciones por técnicas electroquímicas de caracterización, como la voltametría cíclica (VC) se ha aplicado a los materiales biopoliméricos producidos. Esta técnica se basa en el estudio de la variación de una diferencia de potencial aplicada en el tiempo, y se monitorea la corriente. Su finalidad es el estudio del mecanismo de reacción producido por reacciones redox, así como la medida de la estabilidad de las especies químicas, resultantes de la transferencia electrónica (Gosser Jr, 1993).

La **Figura 6.21** muestra la voltametría cíclica para el biopolímero de almidón. Se observan tres picos en la región anódica, y tres picos en la región catódica, proveniente del proceso de oxidación/reducción de las unidades de glucosa presentes en el almidón (Hernandez-Jaimes et al., 2015).

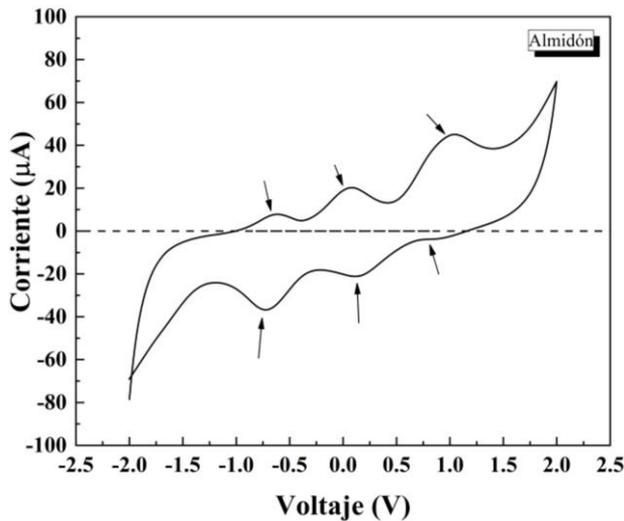


Figura 6.21. Voltametría cíclica aplicada al biopolímero producido de almidón de yuca.

La **Figura 6.22** muestra las voltametrías cíclicas para los biopolímeros de almidón con extracto de cardol, elaborados variando el pH, a valores de 3.0, 7.0 y 11.0. La presencia de los tres picos asociados al proceso de

oxidación/reducción de la glucosa presente en el almidón se vuelve más definido a cuando se incrementan valores de pH. El voltagrama que mejor exhibe las señales al proceso descrito anterior es el biopolímero de almidón y cardol, a un pH de 7.0. Por último, al realizar la comparación entre el biopolímero de almidón (ver **Figura 6.21**) y el biopolímero de almidón + CNSL, como es mostrado en la **Figura 6.22**, de igual forma se muestran los tres picos anódicos y catódicos asociados al proceso de óxido/reducción de las moléculas de glucosa.

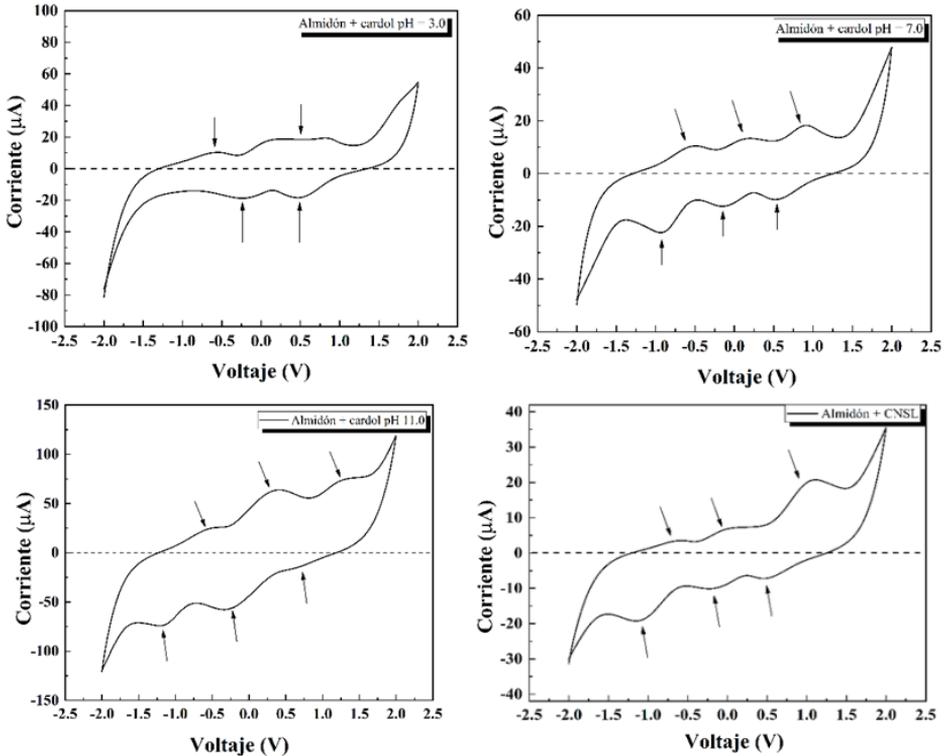


Figura 6.22. Voltametría cíclica aplicada a los biopolímeros producidos de cardol, teniendo en cuenta la variación de pH. **A)** 3.0, **B)** 7.0, **C)** 11.0, y **D)** producido con extracto de CNSL.

6.4.3. – Aplicación en procesos de encapsulamiento.

Los polímeros biodegradables y no biodegradables han desencadenado, en los últimos años, un interés científico en temas de encapsulamiento, principalmente en sistemas de liberación lenta (SRF) (Gruber Chiaregato y Faez, 2021; Gungula et al., 2021; Sarkar et al., 2021; Zafar et al., 2021), ya que por motivos de baja estabilidad térmica y alta solubilidad de los fertilizantes, estos no son aprovechados al máximo por las plantas, debido a procesos de desnitrificación, lixiviación, inmovilización, volatilización y escorrentías superficiales. Esto provoca tanto ineficiencia del producto como pérdidas económicas, así mismo, un daño colateral al medio ambiente y, por ende, a la salud humana (Abd El-Aziz et al., 2022; Rozo et al., 2019; Sim et al., 2021).

La encapsulación de fertilizantes ha resultado ser, indudablemente, un proceso eficiente, puesto que evita la pérdida del producto químico y modera la degradación por hidrólisis, fotólisis y descomposición microbiana (Olad et al., 2018). La literatura reporta diversos estudios, donde son protagonistas los polímeros biodegradables (por ser amigables con el ambiente), siendo uno de ellos el almidón (Espinoza Orellana y Beltrán, 2019; Giroto et al., 2020; Gruber Chiaregato y Faez, 2021; Gungula et al., 2021; León, Soto, Antúnez, et al., 2019; León, et al., 2019; Pimsen et al., 2021; Sarkar et al., 2021; Zafar et al., 2021).

Un estudio donde el uso de un polímero elaborado a base de almidón, urea y melamina, como sistema de liberación lenta, se realizó en 2020. Como resultado, encontraron que la melamina mejora el carácter plastificante del almidón, y su interacción con urea mejora la flexibilidad y aumenta la cantidad de nitrógeno en el producto final. Además, por espectroscopía Raman y RMN, se demuestra la compatibilidad entre los componentes que integran el material sintetizado. Cabe mencionar que, la melamina ayuda en la modificación del carácter cristalino del almidón e incrementa el volumen libre entre las cadenas de este (Giroto et al., 2020).

Se realizó un estudio sobre la liberación lenta de manganeso, cobre, y hierro, mediante la formación de microesferas con almidón, utilizando la técnica *spray drying*, para la liberación lenta de dichos micronutrientes. En

este estudio se encontró que tal liberación ocurrió en dos etapas, siendo del 55 % para el Mn, 70 % para el Cu y 91 % para el Fe, con una cinética fundamentada en el modelo Peppas-Sahlin, en la que se modela la cinética de liberación teniendo en cuenta procesos de difusión (Serra et al., 2006). Además, la liberación se observó más lenta cuando tuvo lugar el hinchamiento por relajación de la cadena polimérica. De esta investigación se concluye que las microesferas elaboradas presentan el potencial de mitigar la pérdida de micronutrientes y abrir nuevas tendencias de investigación sobre los mismos (Gruber Chiaregato y Faez, 2021).

Otra investigación realizada, en este caso, sobre la elaboración de películas biodegradables basadas en almidón, alcohol polivinílico (PVA) y bentonita, utilizando polimerización por reticulación de radicales libres, para la producción viable del fosfato diamónico encapsulado. Este estudio reveló que la densidad e índice de cristalinidad relativa de las películas aumentaron con el contenido de bentonita, lo cual refleja el fortalecimiento de la estructura polimérica. Además, por FTIR y microscopía electrónica de transmisión se comprobó la compatibilidad de los componentes en la película. Por último, se encontró que los polímeros, los cuales contienen agua, almidón, butanol, alcohol polivinílico, formaldehído, persulfato de amonio, y cuya cantidad de bentonita variaron, siendo la muestra que contiene 2,0 g de bentonita (CPSB-10) y 3,0 g de esta arcilla (CPSB-15), mostraron que son las más idóneas para encapsular el DAP, puesto que siguen los criterios de los SRF (Sarkar et al., 2021).

Para el encapsulamiento de urea, Zafar y colaboradores, utilizaron almidón, alcohol polivinílico, ácido acrílico, ácido cítrico y ácido maleico, utilizando un recubridor/granulador de lecho fluidizado. Los fertilizantes de urea sintetizados fueron analizados por FTIR, SEM, XRD, resistencia física y tasas de liberación del fertilizante. Los resultados revelaron que los polímeros USP-A2 (contiene urea, almidón, alcohol polivinílico, y ácido acrílico al 2 %) y USP-C2 (urea, almidón, alcohol polivinílico, y ácido cítrico al 2%), son las muestras de urea con mejor recubrimiento, puesto que mostraron una barrera física más dura. Además, la tasa de liberación de urea fue del 70.10 y 50.74 %, respectivamente, lo cual refleja resultados satisfactorios a la hora de ser aplicados en las plantas (Zafar et al., 2021).

Recientemente, por microscopía electrónica de barrido (SEM, *Scanning Electron Microscopy*) se estudió el proceso de encapsulamiento de la urea el biopolímero de almidón de yuca y que contiene CNSL, como se muestra en la **Figura 6.23**. Esta técnica de caracterización se basa en la detección de electrones que se desprenden de la superficie por la acción de un haz de electrones que bombardean la superficie y alto vacío; producto de esta interacción, se liberan electrones retrodispersados (estudio de la variación del número atómico de los elementos químicos presentes en la muestra), rayos X (composición química elemental), y los electrones secundarios, para la topografía de la muestra. Su medición resulta una imagen 3D a una magnificación entre 10 y 10000X (Goldstein et al., 2003).

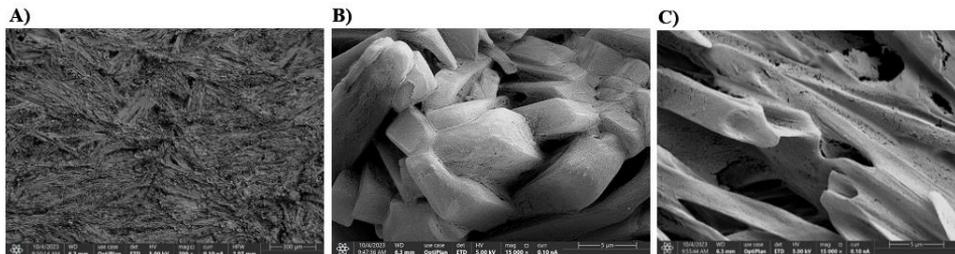


Figura 6.23. Micrografías SEM para el biopolímero de almidón de yuca + extracto CNSL, el cual contiene urea encapsulada, en distintas zonas de la muestra. **A)** profundidad de 300 μm , **B)** profundidad de 5 μm , **C)** profundidad de 5 μm medida en una zona diferente de la muestra.

A una profundidad de 300 μm (ver **Figura 23A**), se evidencia la rugosidad del biopolímero debido a la inclusión tanto del extracto CNSL, como la urea. Al incrementar la profundidad hasta 5 μm , como se muestra en la **Figura 23B**, las partículas de urea estarían cubiertas por el biopolímero compuesto por almidón y extracto de nuez del anacardo. Al realizar la misma medición desde otra zona del biopolímero, **Figura 23C**, se observa tanto la rugosidad, como grietas en el biopolímero, lo cual puede relacionarse con la inclusión de la urea, y su interacción con el almidón y el extracto CNSL en el biopolímero.

6.5. - Conclusión.

Los biopolímeros constituyen una alternativa promisorio para abordar de manera sostenible la necesidad de emplear materiales poliméricos versátiles y multifuncionales. Entre este tipo de materiales, el almidón emerge como una de las estructuras de mayor interés, a causa de las múltiples rutas de modificación química que permite su estructura hidroxilada, grupos funcionales que también se encuentran en los compuestos fenólicos presentes en el líquido de la cáscara de nuez del anacardo. En ese sentido, la asociación de estas sustancias de interés permite la síntesis de biopolímeros basados en almidón con derivados del líquido de cáscara de nuez del anacardo, los cuales son biomateriales con un promisorio empleo en aplicaciones agrícolas orientadas a mediar la liberación controlada de agroquímicos, a través de estrategias de encapsulamiento.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Sucre, la Universidad de Córdoba, y la Universidad del Valle, así como al Departamento Nacional de Planeación de Colombia, específicamente, al Sistema General de Regalías (SGR) por la financiación recibida a través del proyecto BPIN 2020000100027.

Bibliografía

- Abd El-Aziz, M.E.; Salama, D.M.; Morsi, S.M.M.; Youssef, A.M.; El-Sakhawy, M. **2022**. Development of polymer composites and encapsulation technology for slow-release fertilizers. *Reviews in Chemical Engineering*. 38(5), 603–616. DOI: 10.1515/revce-2020-0044
- Andrade, I.H.P.; Otoni, C.G.; Amorim, T.S.; Camilloto, G.P.; Cruz, R.S. **2020**. Ultrasound-assisted extraction of starch nanoparticles from breadfruit (*Artocarpus altilis* (Parkinson) Fosberg). *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 586, 124277. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.124277
- Anjum, M.M.; Patel, K.K.; Dehari, D.; Pandey, N.; Tilak, R.; Agrawal, A.K.; Singh, S. **2021**. Anacardic acid encapsulated solid lipid nanoparticles for *Staphylococcus aureus* biofilm therapy: chitosan and DNase coating improves antimicrobial activity. *Drug Delivery and Translational Research*. 11(1), 305–317. DOI: 10.1007/s13346-020-00795-4
- Anjum, M.M.; Patel, K.K.; Pandey, N.; Tilak, R.; Agrawal, A.K.; Singh, S. **2019**. Development of Anacardic Acid/hydroxypropyl- β -cyclodextrin inclusion complex with enhanced solubility and antimicrobial activity. *Journal of Molecular Liquids*. 296, 112085. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.112085
- Araújo Lima, R.; Ximenes de Souza, S.L.; Aragão Lima, L.; Ximenes Batista, A.L.; Cavalcante de Araújo, J.T.; Oliveira Sousa, F.F.; Marques Lima Rolim, J.P.; Pinheiro Gomes Bandeira, T.D.J. **2020**. Antimicrobial effect of anacardic acid-loaded zein nanoparticles loaded on *Streptococcus mutans* biofilms. *Brazilian Journal of Microbiology*. 51(4), 1623–1630. DOI: 10.1007/s42770-020-00320-2
- Araújo, R.G.; Rodríguez-Jasso, R.M.; Ruiz, H.A.; Govea-Salas, M.; Rosas-Flores, W.; Aguilar-González, M.A.; Pintado, M.E.; Lopez-Badillo, C.; Luevanos, C.; Aguilar, C.N. **2020**. Hydrothermal-microwave processing for starch ex-

traction from Mexican avocado seeds: Operational conditions and characterization. *Processes*. 8(7), 759. DOI: 10.3390/pr8070759

Arayaphan, J.; Maijan, P.; Boonsuk, P.; Chantarak, S. **2021**. Synthesis of photodegradable cassava starch-based double network hydrogel with high mechanical stability for effective removal of methylene blue. *International Journal of Biological Macromolecules*. 168, 875–886. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.11.166

Arpit Singh, T.; Sharma, M.; Sharma, M.; Dutt Sharma, G.; Kumar Passari, A.; Bhasin, S. **2022**. Valorization of agro-industrial residues for production of commercial biorefinery products. *Fuel*. 322, 124284. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124284

Arrieta, A.; Mendoza, J.; Barrera, I. **2021**. Thermal and Electrochemical Properties of Solid Biopolymer Electrolytes from Starch of Different Botanical Origin. *Periódico Tchê Química*. 18(38), 137–148. DOI: 10.52571/ptq.v18.n38.2021.10_arrieta_pgs_137_148.pdf

Avérous, L.; Halley, P.J. **2009**. Biocomposites based on plasticized starch. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 3, 329–343.

Bahdanovich, P.; Axelrod, K.; Khlystov, A.Y.; Samburova, V. **2022**. Optimized Spectrophotometry Method for Starch Quantification. *Analytica*. 3(4), 394–405. DOI: 10.3390/analytica3040027

Balci, M. **2005**. Basic ^1H - and ^{13}C -NMR spectroscopy. Elsevier.

Balgude, D., Sabnis, A. **2012**. Sol-gel derived hybrid coatings as an environment friendly surface treatment for corrosion protection of metals and their alloys. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 64(1), 124–134. DOI: 10.1007/s10971-012-2838-z

Balgude, D.; Sabnis, A.S. **2014**. CNSL: An environment friendly alternative for the modern coating industry. *Journal of Coatings Technology and Research*. 11(2), 169–183. DOI: 10.1007/s11998-013-9521-3

- Buono, P.; Duval, A.; Avérous, L.; Habibi, Y. **2018**. Clicking Biobased Polyphenols: A Sustainable Platform for Aromatic Polymeric Materials. *ChemSusChem*. 11(15), 2472–2491. DOI: 10.1002/cssc.201800595
- Cavalcante de Araujo, J.T.; Martin-Pastor, M.; Pérez, L.; Pinazo, A.; Oliveira de Sousa, F.F. **2021**. Development of anacardic acid-loaded zein nanoparticles: Physical chemical characterization, stability and antimicrobial improvement. *Journal of Molecular Liquids*. 332, 115808. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.115808
- Chatterjee, S.; Dhanurdhar; Rokhum, L. **2017**. Extraction of a cardanol based liquid bio-fuel from waste natural resource and decarboxylation using a silver-based catalyst. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 72, 560–564. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.035
- Chen, J.; Wang, Y.; Liu, J.; Xu, X. **2020**. Preparation, characterization, physicochemical property and potential application of porous starch: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 148, 1169–1181. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.02.055
- Chen, S., Yang, M., Ba, C., Yu, S., Jiang, Y., Zou, H., Zhang, Y. **2018**. Preparation and characterization of slow-release fertilizer encapsulated by biochar-based waterborne copolymers. *Science of the Total Environment*. 615, 431–437. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.209
- Cheng, H.N.; Furtado, R.F.; Biswas, A.; Alves, C.; Prieto, C.; Lagaron, J.M. **2022**. Chemical Modifications and Applications of Cashew Byproducts - A Selective Review. *ACS Food Science and Technology*. DOI: 10.1021/acsfoodscitech.2c00168
- da Silva, L.R.; Piler de Carvalho, C.W.; Velasco, J.I.; Fakhouri, F.M. **2020**. Extraction and characterization of starches from pigmented rice. *International Journal of Biological Macromolecules*. 156, 485–493. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.04.034

de Souza Silva, G.M.; Martins Veloso, C.; Soares Santos, L.; Alves de Melo Neto, B.; Ilhéu Fontan, R. da C.; Ferreira Bonomo, R.C. **2020**. Extraction and characterization of native starch obtained from the inhambu tuber. *Journal of Food Science and Technology*. 57(5), 1830–1839. DOI: 10.1007/s13197-019-04216-4

Dong, G.; Mu, Z.; Liu, D.; Shang, L.; Zhang, W.; Gao, Y.; Zhao, M.; Zhang, X.; Chen, S.; Wei, M. **2021**. Starch phosphate carbamate hydrogel based slow-release urea formulation with good water retentivity. *International Journal of Biological Macromolecules*. 190, 189–197. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2021.08.234

Edoga, M.O.; Fadipe, L.; Edoga, R.N. **2006**. Extraction of Polyphenols from Cashew Nut Shell. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*. 9(9), 107–112.

Elkordy, A. **2013**. Applications of Calorimetry in a Wide Context - Differential Scanning Calorimetry, Isothermal Titration Calorimetry and Microcalorimetry. *Intech*. DOI: 10.5772/2898

Espinoza Orellana, S.; Beltrán, J.R. **2019**. Materiales compuestos de almidón/alcohol polivinílico para la liberación controlada de urea. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 6(1), 7–15.

Gani, A.; Ashwar, B.A.; Akhter, G.; Gani, A.; Shah, A. **2020**. Resistant starch from five Himalayan rice cultivars and Horse chestnut: Extraction method optimization and characterization. 1–9. DOI: 10.1038/s41598-020-60770-4

García-Guzmán, L.; Cabrera-Barjas, G.; Soria-Hernández, C.G.; Castaño, J.; Guadarrama-Lezama, A.Y.; Rodríguez Llamazares, S. **2022**. Progress in Starch-Based Materials for Food Packaging Applications. *Polysaccharides*. 3(1), 136–177. DOI: 10.3390/polysaccharides3010007

Gautam, N.; Garg, S.; Yadav, S. **2021**. Underutilized finger millet crop for starch extraction, characterization, and utilization in the development of

flexible thin film. *Journal of Food Science and Technology*. 58(11), 4411–4419. DOI: 10.1007/s13197-020-04926-0

Ghobashy, M.M. **2020**. The application of natural polymer-based hydrogels for agriculture. En: Y. Chen, *Hydrogels Based on Natural Polymers*. Elsevier Inc. DOI: 10.1016/B978-0-12-816421-1.00013-6

Giroto, A.S.; Garcia, R.H.S.; Colnago, L.A.; Klamczynski, A.; Glenn, G.M.; Ribeiro, C. **2020**. International Journal of Biological Macromolecules Role of urea and melamine as synergic co-plasticizers for starch composites for fertilizer application. *International Journal of Biological Macromolecules*. 144, 143–150. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.12.094

Goldstein, J.I.; Newbury, D.E.; Echlin, P.; Joy, D.C.; Lyman, C.E.; Lifshin, E.; Sawyer, L.; Michael, J.R. **2003**. *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. Kluwer Academic/Plenum Publishers.

Gosser Jr, D.K. **1993**. *Cyclic voltammetry. Simulation and analysis of reaction mechanisms*. VCH.

Gruber Chiaregato, C.; Faez, R. **2021**. Micronutrients encapsulation by starch as an enhanced efficiency fertilizer. *Carbohydrate Polymers*. 271, 118419. DOI: 10.1016/j.carbpol.2021.118419

Gungula, D.T.; Andrew, F.P.; Joseph, J.; Kareem, S.A.; Barminas, J.T.; Adebayo, E.F.; Saddiq, A.M.; Tame, V.T.; Dere, I.; Ahinda, W.J.; Ator, R. **2021**. Formulation and characterization of water retention and slow-release urea fertilizer based on *Borassus aethiopum* starch and *Maesopsis eminii* hydrogels. *Results in Materials*, 12, 100223. DOI: 10.1016/j.rinma.2021.100223

Hamad, F.B.; Mubofu, E.B. **2015**. Potential biological applications of bio-based anacardic acids and their derivatives. *International Journal of Molecular Sciences*. 16(4), 8569–8590. DOI: 10.3390/ijms16048569

- Hernandez-Jaimes, C.; Lobato-Calleros, C.; Sosa, E.; Bello-Pérez, L.A.; Vernon-Carter, E.J.; Alvarez-Ramirez, J. **2015**. Electrochemical characterization of gelatinized starch dispersions: Voltammetry and electrochemical impedance spectroscopy on platinum surface. *Carbohydrate Polymers*. 124, 8–16. DOI: 10.1016/j.carbpol.2015.02.002
- Höhne, G.W.H.; Hemminger, W.F.; Flammersheim, H.J. **2003**. *Differential Scanning Calorimetry*. Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-06710-9
- Huey, C.E.; Yahya, W.Z.N.; Mansor, N. **2019**. Allicin incorporation as urease inhibitor in a chitosan/starch based biopolymer for fertilizer application. *Materials Today: Proceedings*, 16, 2187–2196. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.06.109
- Ibrahim, K.A.; Naz, M.Y.; Shukrullah, S.; Sulaiman, S.A.; Ghaffar, A. **2020**. Nitrogen Pollution Impact and Remediation through Low Cost Starch Based Biodegradable polymers. *Scientific Reports*, 1–10. DOI: 10.1038/s41598-020-62793-3
- Ibrahim, K.A.; Naz, M.Y.; Shukrullah, S.; Sulaiman, S.A.; Ghaffar, A.; Abdelsalam, N.M. **2019**. Controlling Nitrogen Pollution via Encapsulation of Urea Fertilizer in Cross-linked Corn Starch. *14*(4), 7775–7789.
- Ike, D.C.; Ibezim-Ezeani, M.U.; Akaranta, O. **2021**. Cashew nutshell liquid and its derivatives in oil field applications: an update. *Green Chemistry Letters and Reviews*. 14(4), 618–631. DOI: 10.1080/17518253.2021.1991485
- Islam, M.Z.; Sarker, M.E.; Rahman, M.M.; Islam, M.R.; Ahmed, A.T.M.F.; Mahmud, M.S.; Syduzzaman, M. **2022**. Green composites from natural fibers and biopolymers: A review on processing, properties, and applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 41(13–14), 526–557. DOI: 10.1177/07316844211058708
- Junlapon, K.; Maijan, P.; Chaibundit, C.; Chantarak, S. **2020**. Effective adsorption of methylene blue by biodegradable superabsorbent cassava

starch-based hydrogel. *International Journal of Biological Macromolecules*. 158, 258–264. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.04.247

Kizil, R.; Irudayaraj, J.; Seetharaman, K. **2002**. Characterization of irradiated starches by using FT-Raman and FTIR spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 50(14), 3912–3918. DOI: 10.1021/jf011652z

Koteich-Khatib, S.; Vivas, J.; Bahsas, A.; Rosales-Oballos, Y.; Bullón, J. **2019**. Caracterización por RMN y actividad antibacteriana de los componentes del aceite de la semilla de merrey (*Anacardium occidentale* L.). *Avances En Química*, 14(1), 31–40.

Koteich Khatib, S.; Bullón, J.; Vivas, J.; Bahsas, A.; Rosales-Oballos, Y.; Marquez, R.; Forgiarini, A.; Salager, J.L. **2020**. Synthesis, Characterization, Evaluation of Interfacial Properties and Antibacterial Activities of Dicarboxylate Anacardic Acid Derivatives from Cashew Nut Shell Liquid of *Anacardium occidentale* L. *Journal of Surfactants and Detergents*. 23(3), 503–512. DOI: 10.1002/jsde.12384

Kyei, S.K.; Darko, G.; Akaranta, O. **2020**. Chemistry and application of emerging ecofriendly antifouling paints: a review. *Journal of Coatings Technology and Research*. 17(2), 315–332. DOI: 10.1007/s11998-019-00294-3

Lee, S.; Park, M.S.; Shin, J.; Kim, Y.W. **2018**. Effect of the individual and combined use of cardanol-based plasticizers and epoxidized soybean oil on the properties of PVC. *Polymer Degradation and Stability*. 147, 1–11. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2017.11.002

León, O.; Soto, D.; Antúnez, A.; Fernández, R.; González, J.; Piña, C.; Muñoz-Bonilla, A.; Fernandez-García, M. **2019**. Hydrogels based on oxidized starches from different botanical sources for release of fertilizers. *International Journal of Biological Macromolecules*. 136, 813–822. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.06.131

León, O.; Soto, D.; González, J.; Piña, C.; Muñoz-Bonilla, A.; Fernandez-García, M. **2019**. Environmentally Friendly Fertilizers Based on Starch Superabsorbents. *Materials*. 12(21), 3493. DOI: 10.3390/ma12213493

Lomonaco, D.; Mele, G.; Mazzeto, S. **2017**. Cashew Nutshell Liquid (CNSL): From an Agro-industrial Waste to a Sustainable Alternative to Petrochemical Resources. En: P. Anilkumar, *Cashew Nut Shell Liquid: A Goldfield for Functional Materials*. Springer International Publishing AG. DOI: 10.1007/978-3-319-47455-7

Lum, Y.H.; Shaaban, A.; Mohamad, N.; Dimin, F. **2016**. Slow release of urea encapsulated by starch PVA matrix. *Key Engineering Materials*, 707(M), 28–31. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.707.28

Luo, Z.; Cheng, W.; Chen, H.; Fu, X.; Peng, X.; Luo, F.; Nie, L. **2013**. Preparation and properties of enzyme-modified cassava starch-zinc complexes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 61(19), 4631–4638. DOI: 10.1021/jf4016015

Lyu, Y.; Ishida, H. **2019**. Natural-sourced benzoxazine resins, homopolymers, blends and composites: A review of their synthesis, manufacturing and applications. *Progress in Polymer Science*. 99, 101168. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2019.101168

Mele, G.; Bloise, E.; Cosentino, F.; Lomonaco, D.; Avelino, F.; Marcianò, T.; Massaro, C.; Mazzetto, S.E.; Tammaro, L.; Scalone, A.G.; Schioppa, M.; Terzi,

R. **2019**. Influence of Cardanol Oil on the Properties of Poly(lactic acid) Films Produced by Melt Extrusion. *ACS Omega*. 4(1), 718–726. DOI: 10.1021/acsomega.8b02880

Menczel, J.D.; Bruce Prime, R. **2009**. Thermal analysis of polymers. *Fundamentals and applications*. Wiley.

Mishra, V.; Desai, J.; Patel, K.I. **2018**. (UV/Oxidative) dual curing polyurethane dispersion from cardanol based polyol: Synthesis and characterization.

- Industrial Crops and Products. 111, 165–178. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.10.015
- Mitchell, T.N.; Costisella, B. **2004**. NMR-from spectra to structures: an experimental approach. Springer.
- Mlowe, S.; Nejo, A.A.; Pullabhotla, V.S.R.R.; Mubofu, E.B.; Ngassapa, F.N.; O'Brien, P.; Revaprasadu, N. **2013**. Lead chalcogenides stabilized by anacardic acid. Materials Science in Semiconductor Processing. 16(2), 263–268. DOI: 10.1016/j.mssp.2012.10.017
- Mlowe, S.S.; Pullabhotla, R.R.; Mubofu, E.E.; Ngassapa, F.F.; Revaprasadu, N.N. **2014**. Low temperature synthesis of anacardic-acid-capped cadmium chalcogenide nanoparticles. International Nano Letters. 4(2), 4–9. DOI: 10.1007/s40089-014-0106-7
- Morais, S.M.; Silva, K.A.; Araujo, H.; Vieira, I.G.P.; Alves, D.R.; Fontenelle, R.O.S.; Silva, A.M.S. **2017**. Anacardic acid constituents from cashew nut shell liquid: NMR characterization and the effect of unsaturation on its biological activities. Pharmaceuticals. 10(1), 1–10. DOI: 10.3390/ph10010031
- Moreira, G.F.; Peçanha, E.R.; Monte, M.B.M.; Leal Filho, L.S.; Stavale, F. **2017**. XPS study on the mechanism of starch-hematite surface chemical complexation. Minerals Engineering. 110, 96–103. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.04.014
- Motamedi, E.; Motesharezedeh, B.; Shirinfekr, A.; Mahmood Samar, S. **2019**. Synthesis and swelling behavior of environmentally friendly starch-based superabsorbent hydrogels reinforced with natural char nano/micro particles. Biochemical Pharmacology. 8(1), 103583. DOI: 10.1016/j.jece.2019.103583
- Mwakalesi, A.J.; Potter, I.D. **2021**. Targeting of cationic organic pesticide residues using polymer inclusion membranes containing anacardic acid from cashew nut shell liquid as a green carrier. Journal of Water Process Engineering. 43, 102222. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102222

- Nambela, L.; Haule, L.V.; Mgani, Q.A. **2022**. Anacardic acid isolated from cashew nut shells liquid: A potential precursor for the synthesis of anthraquinone dyes. *Cleaner Chemical Engineering*. 3, 100056. DOI: 10.1016/j.clce.2022.100056
- Nasrollahzadeh, M.; Mohammad Sajadi, S.; Sajjadi, M.; Issaabadi, Z. **2019**. Applications of Nanotechnology in Daily Life. En: S. Ahmed & W. Ali, *Green Nanomaterials. Processing, Properties, and Applications*. Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/B978-0-12-813586-0.00004-3
- Natarajan, M.; Murugavel, S.C. **2017**. Thermal stability and thermal degradation kinetics of bio-based epoxy resins derived from cardanol by thermogravimetric analysis. *Polymer Bulletin*. 74(8), 3319–3340. DOI: 10.1007/s00289-016-1885-y
- Nogueira Maia, F.J.; Paulino Ribeiro, F.W.; Gomes Rangel, J.H.; Lomonaco, D.; Tavares Luna, F.M.; de Lima-Neto, P.; Nunes Correia, A.; Mazzetto, S.E. **2015**. Evaluation of antioxidant action by electrochemical and accelerated oxidation experiments of phenolic compounds derived from cashew nut shell liquid. *Industrial Crops and Products*, 67, 281–286. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.01.034
- Nyquist, R.A. **2001**. *Interpreting Infrared, Raman, and Nuclear Magnetic Resonance Spectra*. Elsevier.
- Olad, A.; Zebhi, H.; Salari, D.; Mirmohseni, A.; Reyhani Tabar, A. **2018**. Slow-release NPK fertilizer encapsulated by carboxymethyl cellulose-based nanocomposite with the function of water retention in soil. *Materials Science and Engineering C*. 90, 333–340. DOI: 10.1016/j.msec.2018.04.083
- Oliveira, S. do N.; Uchoa, A.F.J.; Moreira, D.R.; Petzhold, C.L.; Weiss, C.K.; Landfester, K.; Ricardo, N.M. **2022**. Design, Synthesis, and Evaluation of Dual Release from Anacardic Acid-Based Polyurea Nanocapsules. *SSRN Electronic Journal*. DOI: 10.2139/ssrn.4056839

- Osman, S.M.; Abdel-Megied, A.M.; Zain Eldain, M.H.; Haleema, S.; Gopinath, C.; Sumalekshmy, S.A.; Aboul-Enein, H.Y. **2019**. A highly sensitive GC–MS method for simultaneous determination of anacardic acids in cashew (*Anacardium occidentale*) nut shell oil in the presence of other phenolic lipid derivatives. *Biomedical Chromatography*. 33(11). DOI: 10.1002/bmc.4659
- Oyeyinka, S.A.; Salako, M.O.; Akintayo, O.A.; Adeloje, A.A.; Nidoni, U.; Dudu, O.E.; Diarra, S.S. **2020**. Structural, functional, and pasting properties of starch from refrigerated cassava root. *Journal of Food Processing and Preservation*. 44(6), 1–9. DOI: 10.1111/jfpp.14476
- Paiva Filho, J.C.; de Moraes, S.M.; Nogueira Sobrinho, A.C.; Soares Cavalcante, G.; Alves da Silva, N.; Monteiro Da Silva Abreu, F.O. **2019**. Design of chitosan-alginate core-shell nanoparticles loaded with anacardic acid and cardol for drug delivery. *Polimeros*. 29(4), 1–10. DOI: 10.1590/0104-1428.08118
- Paramashivappa, R.; Phani Kumar, P.; Vithayathil, P.J.; Srinivasa Rao, A. **2001**. Novel method for isolation of major phenolic constituents from cashew (*Anacardium occidentale* L.) Nut shell liquid. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 49(5), 2548–2551. DOI: 10.1021/jf001222j
- Pérez-vergara, L.D.; Cifuentes, M.T.; Franco, A.P.; Pérez-cervera, C.E., Andrade-pizarro, R.D. **2020**. Development and characterization of edible films based on native cassava starch, beeswax, and propolis. *NFS Journal*. 21, 39–49. DOI: 10.1016/j.nfs.2020.09.002
- Pesek, S.; Lehene, M.; Brânzanic, A.M.V.; Silaghi-Dumitrescu, R. **2022**. On the Origin of the Blue Color in The Iodine/Iodide/Starch Supramolecular Complex. *Molecules*. 27(24), 8974. DOI: 10.3390/molecules27248974
- Phani Kumar, P.; Paramashivappa, R.; Vithayathil, P.J.; Rao, P.V.S.; Rao, A.S. **2002**. Process for Isolation of Cardanol from Technical Cashew (*Anacardium occidentale* L.) Nut Shell Liquid. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 50(16), 4705–4708. DOI: 10.1021/jf020224w

- Philip, J.Y.N.; Buchweishaija, J.; Mkyula, L.L.; Ye, L. **2007**. Preparation of molecularly imprinted polymers using anacardic acid monomers derived from cashew nut shell liquid. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 55(22), 8870–8876. DOI: 10.1021/jf0718289
- Philip, J.Y.N.; Da Cruz Francisco, J.; Dey, E.S.; Buchweishaija, J.; Mkyula, L.L.; Ye, L. **2008**. Isolation of anacardic acid from natural cashew nut shell liquid (CNSL) using supercritical carbon dioxide. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 56(20), 9350–9354. DOI: 10.1021/jf801532a
- Pimsen, R.; Porrawatkul, P.; Nuengmatcha, P.; Ramasoot, S.; Chanthai, S. **2021**. Efficiency enhancement of slow release of fertilizer using nanozeolite–chitosan/sago starch-based biopolymer composite. *Journal of Coatings Technology and Research*. DOI: 10.1007/s11998-021-00495-9
- Preethi, R.; Leena, M.M.; Moses, J.A.; Anandharamakrishnan, C. **2020**. Biopolymer Nanocomposites and Its Application in Food Processing. En: S. Ahmed & W. Ali, *Green Nanomaterials. Processing, Properties, and Applications*. Springer. DOI: 10.1007/978-981-15-3560-4_1
- Preethi, R.; Moses, J.A.; Anandharamakrishnan, C. **2021**. Development of anacardic acid incorporated biopolymeric film for active packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*. 28, 100656. DOI: 10.1016/j.fpsl.2021.100656
- Pretsch, E.; Bühlmann, P.; Badertscher, M. **2009**. Structure determination of organic compounds. *Tables of spectral data*. Springer.
- Punia, S.; Sandhu, K.S.; Dhull, S.B.; Siroha, A.K.; Purewal, S.S.; Kaur, M.; Kidwai, M.K. **2020**. Oat starch: Physico-chemical, morphological, rheological characteristics and its applications - A review. *International Journal of Biological Macromolecules* 154, 493–498. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.03.083

- Qamruzzaman, M.; Ahmed, F.; Mondal, M.I.H. **2022**. An Overview on Starch-Based Sustainable Hydrogels: Potential Applications and Aspects. *Journal of Polymers and the Environment*. 30(1), 19–50. DOI: 10.1007/s10924-021-02180-9
- Qiao, D.; Liu, H.; Yu, L.; Bao, X.; Simon, G.P.; Petinakis, E.; Chen, L. **2016**. Preparation and characterization of slow-release fertilizer encapsulated by starch-based superabsorbent polymer. *Carbohydrate Polymers*. 147, 146–154. DOI: 10.1016/j.carbpol.2016.04.010
- Qiao, D.; Tu, W.; Wang, Z.; Yu, L.; Zhang, B.; Bao, X.; Jiang, F.; Lin, Q. **2019**. Influence of crosslinker amount on the microstructure and properties of starch-based superabsorbent polymers by one-step preparation at high starch concentration. *International Journal of Biological Macromolecules*. 129, 679–685. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.02.019
- Ramos, E.H.; Nomen, R.; Sempere, J. **2018**. Recovery of Anacardic Acids from Cashew Nut Shell Liquid with Ion-Exchange Resins. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 57(49), 16903–16908. DOI: 10.1021/acs.iecr.8b04192
- Remya, V. R.; Patil, D.; Abitha, V. K.; Rane, A.V.; Mishra, R.K. **2016**. Biobased materials for polyurethane dispersions. *Chemistry International*. 2(3), 158–167.
- Ribeiro Oliveira, J.; Viana Kotzebue, L.R.; Mazzetto, S.E.; Lomonaco, D. **2019**. Towards bio-based high-performance polybenzoxazines: Agro-wastes as starting materials for BPA-free thermosets via efficient microwave-assisted synthesis. *European Polymer Journal*. 116, 534–544. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2019.04.014
- Rodriguez-Garcia, M.E.; Hernandez-Landaverde, M.A.; Delgado, J.M.; Ramirez-Gutierrez, C.F.; Ramirez-Cardona, M.; Millan-Malo, B.M.; Londoño-Restrepo, S.M. **2021**. Crystalline structures of the main components of starch. *Current Opinion in Food Science*. 37, 107–111. DOI: 10.1016/j.cofs.2020.10.002

- Rozo, G.; Bohorques, L.; Santamaría, J. **2019**. Controlled release fertilizer encapsulated by a κ -carrageenan hydrogel. *Polímeros*. 29(3), 2–8. DOI: 10.1590/0104-1428.02719
- Rwahwire, S.; Tomkova, B.; Prince Periyasamy, A.; Madhukar Kale, B. **2018**. Green thermoset reinforced biocomposites. En: G. Koronis & A. Silva, *Green Composites for Automotive Applications*. Woodhead Publishing - Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-08-102177-4.00003-3
- Rychter, P.; Kot, M.; Bajer, K.; Rogacz, D.; Šišková, A.; Kapuśniak, J. **2016**. Utilization of starch films plasticized with urea as fertilizer for improvement of plant growth. *Carbohydrate Polymers*. 137, 127–138. DOI: 10.1016/j.carbpol.2015.10.051
- Saenab, A.; Wiryawan, K.G.; Retnani, Y.; Wina, E. **2017**. Anacardic acid isolated from cashew nut shell (*Anacardium occidentale*) affects methane and other products in the rumen fermentation. *Media Peternakan*. 40(2), 94–100. DOI: 10.5398/medpet.2017.40.2.94
- Salimi, M.; Motamedi, E.; Motesharezede, B.; Mirseyed, H. **2020**. Journal of Environmental Chemical Engineering Starch-g-poly (acrylic acid-co-acrylamide) composites reinforced with natural char nanoparticles toward environmentally benign slow-release urea fertilizers. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 8(3), 103765. DOI: 10.1016/j.jece.2020.103765
- Saraiva Rodrigues, S.C.; Silva, A.S.; Carvalho, L.H.; Alves, T.S., Barbosa, R. **2020**. Morphological, structural, thermal properties of a native starch obtained from babassu mesocarp for food packaging application. *Journal of Materials Research and Technology*. 9(6), 15670–15678. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.11.030
- Sarkar, A.; Biswas, D.R.; Datta, S.C.; Dwivedi, B.S.; Bhattacharyya, R.; Kumar, R.; Bandyopadhyay, K.K.; Saha, M.; Chawla, G.; Saha, J.K.; Patra, A.K. **2021**. Preparation of novel biodegradable starch/poly(vinyl alcohol)/bentonite

grafted polymeric films for fertilizer encapsulation. *Carbohydrate Polymers*. 259, 117679. DOI: 10.1016/j.carbpol.2021.117679

Savitri, E.; Purwanto, E.; Kodrat, A.N.; Yonathan, E. **2019**. Controlled release fertilizer based on starch chitosan encapsulation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 703(1), 012019. DOI: 10.1088/1757-899X/703/1/012019

Serra, L.; Doménech, J.; Peppas, N.A. **2006**. Drug transport mechanisms and release kinetics from molecularly designed poly(acrylic acid-g-ethylene glycol) hydrogels. *Biomaterials*. 27(31), 5440–5451. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2006.06.011

Serrão Pinto, E.J.; Cavalcante de Araujo, J.T.; dos Anjos Ferreira, R.M.; Picanço Souto, R.N.; Aragão Lima, L.; de Barros Silva, P.G.; Garcia, M.T.; de la Fuente, A., Oliveira de Sousa, F.F. **2021**. Larvicidal activity, aquatic and in vivo toxicity of anacardic acid loaded-zein nanoparticles. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 63, 102513. DOI: 10.1016/j.jddst.2021.102513

Sharma, P.; Gaur, V.K.; Sirohi, R.; Larroche, C.; Kim, S.H.; Pandey, A. **2020**. Valorization of cashew nut processing residues for industrial applications. *Industrial Crops and Products*. 152, 112550. DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.112550

Silverstein, R.; Webster, F.X.; Kiemle, D.J. **2005**. *Spectrometric identification of organic compounds*. John Wiley & Sons, Inc.

Sim, D.H.H.; Tan, I.A.W.; Lim, L.L.P.; Hameed, B.H. **2021**. Encapsulated biochar-based sustained release fertilizer for precision agriculture: A review. *Journal of Cleaner Production*. 303, 127018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127018

Soares Costa Oliveira, M.; de Morais, S.M.; Varela Magalhães, D.; Pereira Batista, W.; Pinto Vieira, Í.G.; Aragão Craveiro, A.; Silva Alencar de Maneses, J.E.; Fontenelle Urano Carvalho, A.; Gomes de Lima, G.P. **2011**.

Antioxidant, larvicidal and antiacetylcholinesterase activities of cashew nut shell liquid constituents. *Acta Tropica*. 117(3), 165–170. DOI: 10.1016/j.actatropica.2010.08.003

Sofyane, A.; Ablouh, E.; Lahcini, M.; Elmeziane, A.; Khoulood, M.; Kaddami, H.; Raihane, M. **2021**. Slow-release fertilizers based on starch acetate/glycerol/polyvinyl alcohol biocomposites for sustained nutrient release. *Materials Today: Proceedings*. 36(1), 74–81. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.319

Stuart, B. **2004**. *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons.

Supare, K.; Mahanwar, P. **2022a**. Starch-Chitosan Hydrogels for the Controlled-Release of Herbicide in Agricultural Applications: A Study on the Effect of the Concentration of Raw Materials and Crosslinkers. *Journal of Polymers and the Environment*. 30(6), 2448–2461. DOI: 10.1007/s10924-022-02379-4

Supare, K.; Mahanwar, P.A. **2022b**. Starch-derived superabsorbent polymers in agriculture applications: an overview. *Polymer Bulletin*. 79(8), 5795–5824. DOI: 10.1007/s00289-021-03842-3

Tarique, J.; Sapuan, S.M.; Khalina, A.; Ilyas, R.A.; Zainudin, E.S. **2022**. Thermal, flammability, and antimicrobial properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) fiber reinforced arrowroot starch biopolymer composites for food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*. 213, 1–10. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2022.05.104

Tizzotti, M. J.; Sweedman, M. C.; Tang, D.; Schaefer, C.; Gilbert, R.G. **2011**. New ¹H NMR procedure for the characterization of native and modified food-grade starches. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 59(13), 6913–6919. DOI: 10.1021/jf201209z

Torres, M.D.; Fradinho, P.; Rodríguez, P.; Falqu, E.; Santos, V.; Domínguez, H. **2020**. Biorefinery concept for discarded potatoes: Recovery of starch and

bioactive compounds. 275, 109886. DOI:
10.1016/j.jfoodeng.2019.109886

Trevisan, M.T.S.; Pfundstein, B.; Haubner, R.; Würtele, G.; Spiegelhalter, B.; Bartsch, H.; Owen, R.W. **2006**. Characterization of alkyl phenols in cashew (*Anacardium occidentale*) products and assay of their antioxidant capacity. *Food and Chemical Toxicology*. 44(2), 188–197. DOI: 10.1016/j.fct.2005.06.012

Vasconcelos, L.; de Souza, M.; de Oliveira, J.; Filho, E. S.; Silva, A.; Mazzetto, S.E.; Pereira, E.S.; Oliveira, R.L.; Bezerra, L. **2021**. Elaboration and characterization of bioactive films obtained from the incorporation of cashew nut shell liquid into a matrix of sodium alginate. *Antioxidants*. 10(9). DOI: 10.3390/antiox10091378

Versino, F.; Urriza, M.; García, M.A. **2019**. Eco-compatible cassava starch films for fertilizer controlled-release. *International Journal of Biological Macromolecules*. 134, 302–307. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.05.037

Vudjung, C.; Saengsuwan, S. **2018**. Biodegradable IPN Hydrogels Based on Pre-vulcanized Natural Rubber and Cassava Starch as Coating Membrane for Environment-Friendly Slow-Release Urea Fertilizer. *Journal of Polymers and the Environment*. 26(9), 3967–3980. DOI: 10.1007/s10924-018-1274-8

Watts, J.F.; Wolstenholme, J. **2003**. *An Introduction to Surface Analysis by XPS and AES*. John Wiley & Sons, Ltd.

Wei, X.; Bao, X.; Yu, L.; Liu, H.; Lu, K.; Chen, L.; Bai, L.; Zhou, X.; Li, Z.; Li, W. **2020**. Correlation Between Gel Strength of Starch-Based Hydrogel and Slow Release Behavior of Its Embedded Urea. *Journal of Polymers and the Environment*. 28(3), 863–870. DOI: 10.1007/s10924-020-01653-7

Xiao, X.; Yu, L.; Xie, F.; Bao, X.; Liu, H.; Ji, Z.; Chen, L. **2017**. One-step method to prepare starch-based superabsorbent polymer for slow release of

fertilizer. *Chemical Engineering Journal*, 309, 607–616. DOI: 10.1016/j.cej.2016.10.101

Yuliana, M.; Nguyen-Thi, B.T.; Faika, S.; Huynh, L.H.; Soetaredjo, F.E.; Ju, Y.H. **2014**. Separation and purification of cardol, cardanol and anacardic acid from cashew (*Anacardium occidentale* L.) nut-shell liquid using a simple two-step column chromatography. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 45(5), 2187–2193. DOI: 10.1016/j.jtice.2014.07.012

Zafar, N.; Niazi, M.B.K.; Sher, F.; Khalid, U.; Jahan, Z.; Shah, G.A.; Zia, M. **2021**. Starch and polyvinyl alcohol encapsulated biodegradable nanocomposites for environment friendly slow release of urea fertilizer. *Chemical Engineering Journal Advances*. 7, 100123. DOI: 10.1016/j.cej.2021.100123

Zhang, W.; Mu, Z.; Dong, G.; Wei, L.; Bai, L.; Fu, M.; Zhao, X.; Han, S.; Wang, S. **2020**. Esterification modified starch by phosphates and urea via alcohol solvothermal route for its potential utilization for urea slow-releasing. *International Journal of Biological Macromolecules*. 163, 2448–2456. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.09.186

Zhao, Y.; Tan, X.; Wu, G.; Gilbert, R.G. **2020**. Using Molecular Fine Structure to Identify Optimal Methods of Extracting Starch. *Starch – Stärke*. 72(5–6), 1900214. DOI: 10.1002/star.201900214

Zhu, F. **2017**. NMR spectroscopy of starch systems. *Food Hydrocolloids*, 63, 611–624. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2016.10.015

