Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

Obtención de hidrogeles entrecruzados a partir de goma arábiga

Octubre 2022

Tesis presentada para obtener el grado de:

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Presenta:

Esmeralda Valencia Colores

Director de Tesis:

Dra. María Teresa Zayas Pérez

Contenido

1. Planteamiento del problema 4

2. Justificación 5

3. Hipótesis 6

4. Objetivos 7

4.1 Objetivo General 7

4.2 Objetivos específicos 7

5. Marco Teórico 8

5.1 Polímeros 8

5.2 Clasificación química de los polímeros 8

5.3 Estructura de la cadena polimérica 9

5.3.1 Polímeros lineales, ramificados y reticulados 9

5.4 Clasificación de acuerdo con la estructura química 11

5.5 Copolímeros entrecruzados o reticulados 12

5.6 Clasificación de acuerdo con su origen 12

5.7 Polímeros naturales o biopolímeros 13

5.8 Goma arábiga de acacia 16

5.9 Composición estructural de la goma arábiga. 17

5.10 Hidrogeles o polímeros superabsorbentes 21

5.11 Síntesis de hidrogeles por radiación de microondas 24

6. Desarrollo experimental 27

6.1 Reactivos químicos y equipo de laboratorio 27

6.2 Síntesis de los hidrogeles entrecruzados o reticulados 27

6.3 Purificación de hidrogeles 28

6.4 Determinación de la capacidad de absorción en los hidrogeles reticulados. 28

6.5 Caracterización por viscosimetría y espectroscopia IR. 29

7. Discusión de resultados 31

7.1 Ensayos preliminares de la síntesis de hidrogeles o copolímeros de Goma Arábiga/Poliacrilamida/Agar nutritivo (GA-PAM/AN) reticulados. 31

7.1.1 Tiempo de irradiación 32

7.1.2 Concentraciones de GA/AN 33

7.2 Hidrogeles de GA-PAM/Agar-nutritivo (GA-PAM/AN) y GA-PAM/Agar-coliforme (GA-PAM/AC). 34

7.3 Porcentaje de hidratación (hinchamiento, %H) de los hidrogeles producidos. 37

7.4 Caracterización 44
7.4.1 Determinación del peso molecular de goma arábiga de acacia 44
7.4.2 Caracterización por espectroscopía IR 48
7.4.2.2 Hidrogeles GA-PAM/AN 50
8. Conclusión 51
9. Bibliografía 52

1. Planteamiento del problema

Los hidrogeles son materiales poliméricos entrecruzados en forma de red tridimensional con grupos hidrófilicos unidos a la cadena principal del polímero, son insolubles en agua, blandos, elásticos, una de las propiedades fundamentales de los hidrogeles, es su alta capacidad de absorción de agua y biocompatibilidad. En estado deshidratado (xerogeles) son cristalinos y duros (1).

El estudio de la síntesis, caracterización y propiedades de los hidrogeles naturales se ha multiplicado en las últimas décadas, debido a que los hidrogeles naturales tienen excelentes beneficios en diferentes campos de interés tecnológico, por ejemplo, en ingeniería de tejidos, farmacéuticas, biomédicas. Así mismo, se han utilizado en la agricultura y representa un potencial para el aprovechamiento de agua, administración de medicamentos, materiales dentales, implantes, sistemas poliméricos inyectables, aplicaciones oftálmicas, liberación de drogas y tratamiento de residuos, entre otros (2).

Los hidrogeles pueden ser de origen natural o sintético. En el caso de hidrogeles de origen natural o derivados de polímeros naturales, especialmente los polisacáridos, representan una ventaja por su abundancia y biocompatibilidad, en su mayoría son completamente biodegradables y, por lo tanto, más seguros para el medio ambiente. Sin embargo, al ser capaces de disolverse total o parcialmente en agua, no pueden propiciar una estructura estable del hidrogel (3).

El problema central en este trabajo es, por tanto, generar hidrogeles superabsorbentes estables a partir de polímeros naturales. El sistema comprende el estudio de la síntesis y caracterización hidrogeles con gran capacidad de absorción de agua (superabsorbente) por entrecruzamiento de goma arábiga de acacia, el polisacárido agar y acrilamida mediante un proceso asistido por radiación de microondas, este método de síntesis pude conducir a la producción de hidrogeles superabsorbentes reduciendo significativamente el tiempo de reacción y ofrecer una alternativa de tecnología limpia.

“Antes de haberlo hecho debió pensarse en el desecho”

Gilberto A. Perdomo

2. Justificación

Los materiales poliméricos con ciclos de absorción y liberación controlada de sustancias han sido de gran interés por las aplicaciones que les han sido conferidas en diversos estudios. Los campos de investigación como la medicina, la agricultura, entre otras, han desarrollado materiales con capacidad de absorción de diferentes fluidos y que han permitido innovaciones como suministro de fármacos de liberación paulatina y en zonas específicas, en la agricultura sus propiedades han reconocido que los periodos de riego prolongados no tengan afectaciones sobre los cultivos, pues la intervención de materiales absorbentes evita la perdida de agua en suelos por efectos de escorrentía o la baja capacidad de retención de humedad, así cuando los suelos de cultivo no cuentan con más humedad propia comienza el proceso de liberación por parte de estos materiales, dotando de agua los cultivos en periodos de mayor sequía (4). Otras aplicaciones ambientales suelen estar relacionadas con su uso como absorbentes de metales pesados o colorantes iónicos, contaminantes frecuentes en aguas residuales industriales (5).
Los hidrogeles son de naturaleza polimérica e hidrofílica formados por redes tridimensionales versátiles capaces de aumentar varias veces su volumen en presencia de agua, sin perder su forma, reteniendo cantidades equivalentes a cientos de veces su peso en seco (1). La propiedad más importante que tienen los hidrogeles es la capacidad de retención de agua, en general aquellos a base de poliacrilamida, el cual tiene la propiedad de absorber grandes cantidades de disolvente debido al elevado carácter hidrofílico de este polímero (6).

El nuevo desarrollo de matrices poliméricas ha sugerido materiales inteligentes que son capaces de responder a cambios fisicoquímicos en su entorno, los nuevos métodos de síntesis permiten otorgar, durante su procesamiento características de biocompatibilidad, biodegradabilidad, naturaleza inerte, buenas propiedades mecánicas, y una sustancial modificación de su resistencia a factores ambientales, originando hidrogeles amigables con el ambiente.

“Los hidrogeles de polímeros naturales, especialmente los polisacáridos, han sido muy utilizados en los últimos años debido a sus ventajas únicas. En general, los polisacáridos son inocuos, abundantes y biocompatibles” (3). Los procesos de síntesis de hidrogeles de biopolímeros, asistidos por radiación de microondas han demostrado en diversos campos de aplicación, numerosas ventajas que le confieren gran aceptación como un sustituyente de los procesos convencionales de calentamiento. Muestran mayor capacidad de penetración, son más limpios y de mayor eficiencia, además propician un calentamiento más rápido puesto que las regiones externas e internas de las mezclas son calentadas casi por igual y la temperatura es elevada con rapidez (7).

Los resultados que se obtendrán durante la realización de esta tesis contribuirán a demostrar la utilidad y versatilidad de la tecnología por irradiación de microondas en la síntesis de los biopolímeros naturales, dentro de un enfoque de la tecnología verde. En la mayor parte de los casos las reacciones químicas tienen lugar en unos pocos minutos, con el correspondiente ahorro energético con respecto a los métodos clásicos de calentamiento. Además, en ninguna de las reacciones químicas se emplean disolventes orgánicos, con lo que se minimiza la generación de residuos. Por otro lado, la investigación también pretende evaluar las posibilidades sintéticas de los hidrogeles a partir del biopolímero o polisacárido de goma arábiga de acacia.

3. Hipótesis

Es posible obtener un hidrogel absorbente con una alta capacidad de retención de agua, a partir del biopolímero natural de goma arábiga de acacia entrecruzada, estableciendo así una metodología viable de síntesis mediante un proceso asistido por radiación de microondas.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Sintetizar y caracterizar hidrogeles biopoliméricos absorbentes entrecruzados de goma arábica asistidos por radiación de microondas

4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los reactivos químicos o materia prima para la obtención de hidrogeles

- Sintetizar biopolímeros entrecruzados de goma arábica, agar nutritivo y/o agar coliforme, iniciador, entrecruzante y acrilamida por radiación microondas.

- Caracterizar por espectroscopía IR los hidrogeles reticulados a partir de goma arábica.

- Estudiar el comportamiento de hinchamiento de los hidrogeles obtenidos de goma arábica en función del tiempo

5. Marco Teórico

5.1 Polímeros

Los polímeros son compuestos de media y elevada masa molecular formadas por la unión repetida de una o varias moléculas unidas por enlaces covalentes. Dado el gran tamaño de estas moléculas, reciben los nombres de macromoléculas o polímeros. Las moléculas que se combinan para formar los polímeros se denominan monómeros, y son las unidades mínimas constitutivas en repetición que difieren entre sí a una macromolécula, en la longitud de sus cadenas, en los tipos de enlace que se forman entre las unidades y en su grado de ramificación (8).

Los enlaces más comunes que permiten la unión de sus unidades repetitivas dentro de un polímero son los enlaces covalentes que consiste en compartir dos electrones entre átomos, y determina las fuerzas intramoleculares que implica por lo general distancias cortas y altas energías. “Existen también fuerzas moleculares que son más débiles y se consiguen entre segmentos de cadenas poliméricas que aumentan con la presencia de grupos polares y disminuye al aumentar la distancia entre las moléculas” (9). Para un hidrogel con enlaces de tipo físico “los enlaces covalentes dentro de las cadenas son fuertes y direccionales, pero la unión entre diferentes cadenas es débil puesto que se consigue con puentes de Van der Waals” (10).

El proceso químico mediante el cual se obtiene un polímero se conoce con el nombre de polimerización, proceso de unión entre sí de monómeros y para que pueda generarse un polímero, es necesario que presente dos o más grupos funcionales que puedan reaccionar.

5.2 Clasificación química de los polímeros

La clasificación química de los polímeros se establece basándose en la constitución química de la unidad repetitiva. Atendiendo a esta clasificación, se distinguen dos grupos principales:

• Los heteropolímeros: la cadena principal o esqueleto contiene heteroátomos, es decir, átomos distintos al carbono y al hidrógeno.

• Los homopolímeros: la cadena principal no contiene heteroátomos, es decir, está formada exclusivamente de átomos de carbono e hidrógeno.

De acuerdo con Bucknall y Anderson (11) tres factores clave afectan el comportamiento macroscópico de los polímeros: la composición química, la arquitectura molecular (la forma en que los bloques de construcción del monómero

se unen en la cadena del polímero) y la arquitectura supramolecular (la organización de las cadenas entre sí).

5.3 Estructura de la cadena polimérica

5.3.1 Polímeros lineales, ramificados y reticulados

Según la morfología de la cadena (Figura 1), los polímeros se clasifican en:

- Polímeros lineales: Las cadenas poliméricas pueden presentarse en formas lineales, consistente en una sola cadena principal.
- Polímeros ramificados: Las moléculas polifuncionales producen cadenas ramificadas, donde la cadena principal presenta extensiones largas o cortas.
- Polímeros entrecruzados: se pueden considerar como polímeros ramificados en los que las ramificaciones entrelazan las cadenas unas con otras, de manera que todo el conjunto puede concebirse como una sola macromolécula de tamaño ilimitado.
- Polímeros estrella: son un caso particular de los polímeros ramificados en el que tres o más cadenas emanan de una misma unidad central.

Una molécula clasificada como monómero, debe ser capaz de unirse a dos o más moléculas, es decir, debe tener una funcionalidad ≥ 2. Existen 3 formas de funcionalidad como característica estructural de un monómero dado: 1) doble enlace, 2) apertura de anillo y 3) empleo de moléculas con dos grupos funcionales reactivos (12). La funcionalidad es un factor que determina la conformación estructural en una cadena polimérica, y se presenta como el número de grupos funcionales que tiene una molécula. Esta propiedad permite que las cadenas poliméricas puedan presentarse en formas lineales, consistente a una sola cadena principal a partir de la polimerización de monómeros bifuncionales, es decir, una reacción entre dos moléculas monofuncionales que pueden producir un solo enlace y formar una molécula lineal.

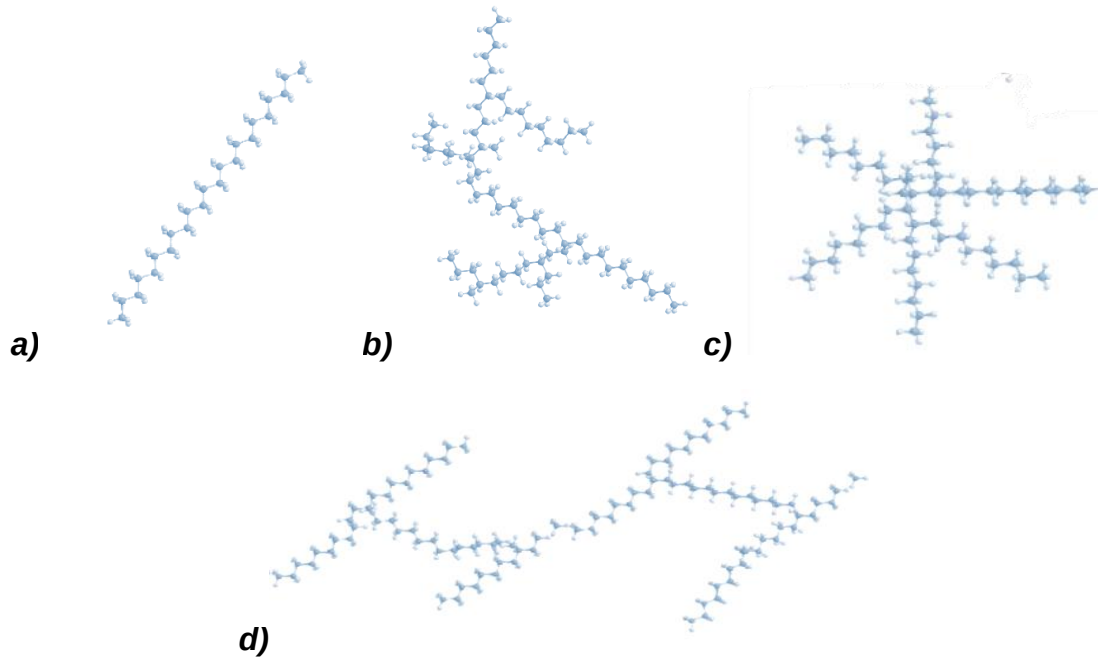


Figura 1. *Clasificación de los polímeros de acuerdo con su estructura. a) Lineal, b) Ramificada, c) Estrella y d) Entrecruzada.*

Las moléculas o monómeros polifuncionales producen cadenas ramificadas donde la cadena principal presenta extensiones o ramificaciones largas o cortas y las cadenas poliméricas se enlazadas unas con otras mediante enlaces cruzados a través de enlaces covalentes. Su clasificación depende de la cantidad de enlaces cruzados por unidad de volumen, que pueden ser polímeros de baja densidad cruzada o polímeros de alta densidad cruzada (9).

La estructura de los copolímeros es lógicamente mucho más compleja que la de los polímeros, puesto que, al estar formados por más de un monómero, pueden variar en su composición y en la longitud de secuencia de la cadena, lo que condiciona las propiedades finales del copolímero.

Las diferentes estructuras y conformaciones de sus componentes básicos dan a los polímeros un poder que radica en su gran versatilidad, pues permite que las moléculas poliméricas sean hechas a medida. Así ha sido posible el desarrollo de innumerables investigaciones que fundamentan cada nueva función que se atribuye al control que se puede tener sobre las propiedades de los polímeros. Los mecanismos de reacción para el ensamblaje de polímeros se desarrollan a partir de la elección de sus unidades mínimas constitutivas de origen y que juntos a su vez dan forma a las propiedades de los nuevos materiales.

5.4 Clasificación de acuerdo con la estructura química

Los polímeros pueden clasificarse en dos grandes grupos dependiendo de las unidades repetitivas que lo conforman. Entonces, un polímero puede ser:

• Homopolímero: constituido por una única unidad repetitiva.

• Copolímero: constituido por dos o más unidades repetitivas distintas.

En los copolímeros las diferentes unidades repetitivas se pueden organizar de diferentes maneras (Figura 2):

• Copolímeros al azar: también se llaman copolímeros aleatorios. Aquí las unidades monoméricas se distribuyen al azar, y a veces de manera desigual, en la cadena del polímero.

• Copolímeros alternadas: Aquí las unidades monoméricas se distribuyen de forma alterna y regular, con cantidades casi equimolares de cada una en la cadena polimérica.

• Copolímeros en bloque: En lugar de una distribución mixta de unidades monoméricas, una secuencia larga o bloque de un monómero se une a un bloque del segundo monómero.

• Copolímeros injertados: Como su nombre indica, las cadenas laterales de un monómero dado están unidas a la cadena principal del segundo monómero.

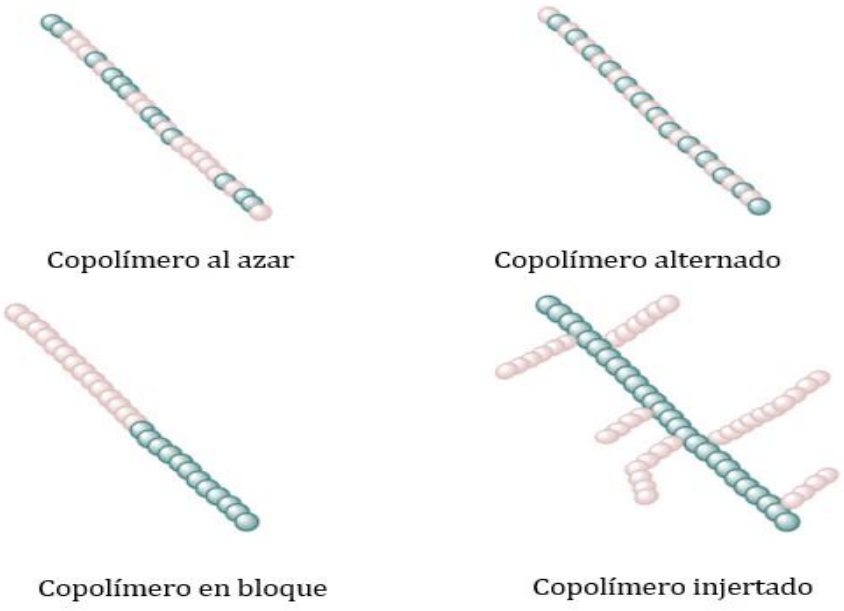


Figura 2. *Clasificación de copolímeros por unidades repetitivas.*

5.5 Copolímeros entrecruzados o reticulados

En una reacción de polimerización que contiene uno o más monómeros con más de dos grupos funcionales formará un polímero o copolímero con estructuras muy ramificadas, para dar lugar a una estructura tridimensional bastante compleja que recibe el nombre de retículo o entrecruzamiento (Figura 3).

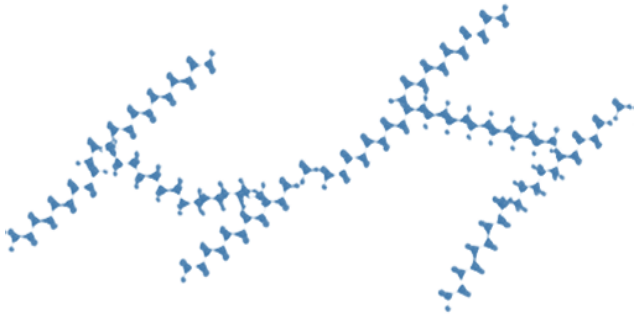


Figura 3. *Estructura esquemática un polímero entrecruzado.*

La obtención los polímeros entrecruzados también pueden formarse a partir de:

1) La unión de cadenas largas de polímeros lineales para dar una estructura de red.

2) La construcción de moléculas multifuncionales de bajo peso molecular para dar estructuras ramificadas de mayor peso molecular y así finalmente generar estructuras continuas reticuladas.

Entre las propiedades que los hace ideales para una gran cantidad de aplicaciones son: excelente estabilidad dimensional, resistencia a los disolventes y en muchos casos alta distorsión térmica o alta temperatura de ablandamiento. Una gran cantidad de los polímeros utilizados en sistemas compuestos y otras aplicaciones son polímeros entrecruzados y la mayor ventaja de los polímeros entrecruzados, es que la síntesis es generalmente simple.

5.6 Clasificación de acuerdo con su origen

Los polímeros de acuerdo con su origen pueden clasificarse en: sintéticos y naturales o biopolímeros

- Polímeros sintéticos son los compuestos orgánicos producidos por medio de la transformación química. Son creados por el hombre a partir de elementos

propios de la naturaleza, su fama se debe a características como la oxidación, ligereza y gracias a que pueden sustituir a la madera, metal o piedra. Sin embargo, muestran gran resistencia a efectos de corrosión, resistencia al agua y a la descomposición bacteriana convierte a los polímeros sintéticos en residuos difíciles de eliminar por actividad microbiana y, consecuentemente, se traduce en un problema ambiental. Incluye la mayoría de los polímeros manufacturados por la industria.

- Polímeros naturales son los que se producen en las reacciones bioquímicas naturales de animales y plantas, tales como las proteínas, carbohidratos y polisacáridos (almidón, glucósidos), entre otros. Las sustancias macromoleculares de origen natural usualmente suelen denominarse biopolímeros

5.7 Polímeros naturales o biopolímeros

En la naturaleza se han encontrado una gran cantidad de sustancias poliméricas que pueden ser sintetizadas por organismo vivos. Las biomoléculas forman parte de las complejas estructuras de los organismos y pueden estar presentes como proteínas, hidratos de carbono, lípidos y ácidos nucleicos. Péptidos, ADN, ARN y polisacáridos como glucógeno en los animales y almidón en las plantas (figura 4), son todos ejemplos de biopolímeros y son complejas estructuras multifuncionales, en los cuales las unidades monoméricas son azúcares, aminoácidos y nucleótidos (13).

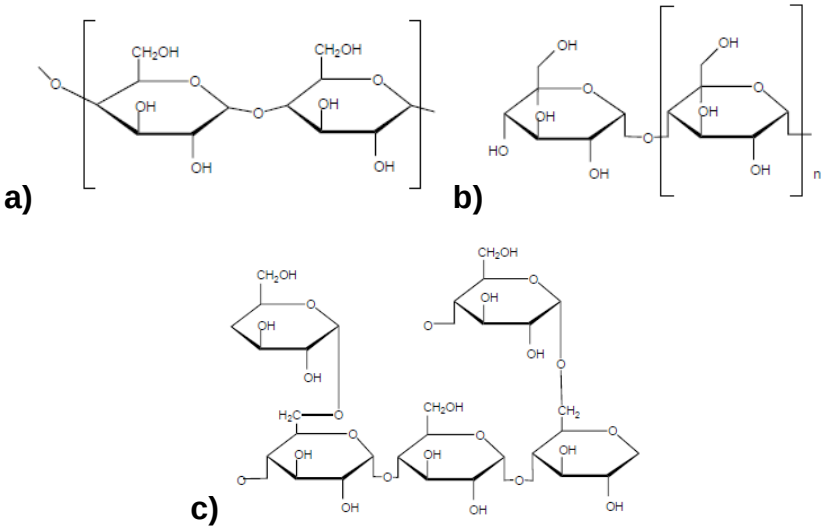


Figura 4. *Estructuras moleculares de polisacáridos.* ***a)*** *Celulosa,* ***b)*** *Almidón,* ***c)*** *Goma de guar.*

Bath (14) refiere que los polímeros naturales o biológicos son cadenas formadas en la naturaleza durante los ciclos biológicos de crecimiento de los microorganismos. Los biopolímeros, materiales poliméricos biodegradables, se descomponen en su totalidad por agentes ambientales permitiendo minimizar el impacto que estos pueden ocasionar al ambiente al término de su vida útil durante procesos de descomposición.

De este último proceso es que dichos materiales pasan a transformar su estructura molecular para convertirse "en sustancias simples o en componentes menores como agua, bióxidos de carbono y biomasa que finalmente se asimilan al medio ambiente" (15). Esencialmente este principio se basa en el entendimiento de que, así como las reacciones de polimerización enzimática son responsables de los procesos de obtención de biomoléculas, estas presentan una contraparte, un proceso de despolimerización por vías enzimáticas.

Los polisacáridos o glúcidos son macromoléculas de elevada masa molecular y estructura compleja formados por monosacáridos unidos entre sí mediante enlaces glucosídicos y constituidos por un mínimo de 10 hasta muchos miles de moléculas y pueden alcanzar masas moleculares de varios millones. Su función en el organismo suele ser estructural o de almacenamiento energético. Algunos de estos polímeros son la celulosa, glucógeno y el almidón los cuales forman parte de los homopolímeros de glucosa, es decir, la unidad que se repite es siempre la misma. En los casos donde la unidad monomérica no es siempre la misma, se obtienen heteropolisacáridos, como el agar-agar, el mucílago, quitosano, así como es el caso de la mayoría de las gomas. Por lo que su diferencia radica entonces en el tipo de unidades monosacáridas que los forman, el tipo de unión química de enlace glucosídico (α o β) entre sus unidades constitutivas, por el largo de la cadena o el grado de ramificación que estas presenten (16). Las propiedades físicas y químicas de los polisacáridos son en cierto modo contrarias a las que exhiben los monosacáridos y oligosacáridos: no cristalizan, no tienen sabor dulce, carecen de poder reductor, y, aunque son sustancias hidrofílicas, pueden presentar dificultades para solubilizar en agua debido a su elevada masa molecular.

La conformación de un polisacárido a menudo es heterogénea, tanto en tamaño como en composición, pero esta característica suele presentarse como una forma alternada de monosacáridos en secuencia repetitiva. Esta conformación dada por sus uniones covalentes y no covalentes pueden ser portadores de múltiples cambios en un medio como agente espesante o estabilizador de emulsiones. "La estructura química de los polisacáridos puede ser tan diversa como su origen, pero en general tienen un gran número de hidroxilos altamente hidrófilos, los cuales poseen la capacidad de hidratarse y formar puentes de hidrogeno. Ellos pueden aportar

capacidad espesante y/o de gelificación e influir en su higroscopicidad y solubilidad" (17).

Los hidratos de carbono contenidos en la mayoría de los tejidos animal y vegetal (proteínas y lípidos que les confieren importantes funciones celulares) son polisacáridos. Los polisacáridos obtenidos por extracción a partir de formas vegetales y microorganismos, las gomas forman estructuras de una compleja variación de azucares, y manifiestan propiedades de tipo coloidal, así como características hidrofílicas o hidrofóbicas. Generalmente su comportamiento se caracteriza por producir soluciones o mezclas viscosas, aún en muy bajas concentraciones y poder producir geles bajo la inducción de condiciones apropiadas.

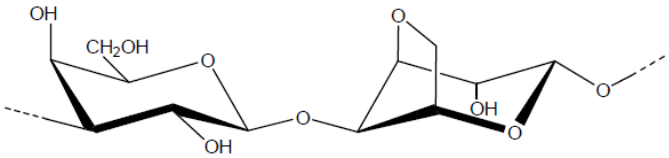
Su naturaleza hidrocoloidal nos permite ver cómo pueden incrementar en gran medida su peso en presencia de agua, relacionado a un proceso de disolución o dispersión fácilmente en agua, pudiendo así incrementar la viscosidad del medio y conducir a una posible gelificación.

La capacidad de retención de agua de una macromolécula comienza al contacto y conduce a la generación de un retículo donde este elemento quede atrapado. "Dicha capacidad depende de factores intrínsecos (tipo de polímero, masa molecular, linealidad, etc.) y de factores extrínsecos (pH, fuerza iónica, temperatura, presencia de ciertos cationes, etc.)" (18).

Esta retención hídrica puede causar la formación de un gel mediante la combinación de una goma con el solvente apropiado. Las macromoléculas actúan entre sí formando una matriz porosa que absorbe y atrapa el agua, dada la fuerte hidratación del polímero. Sin embargo, los geles pueden ser propensos a la perdida de agua paulatina por efecto de sinéresis (extrusión de agua, a través de la superficie del gel), es decir, que, al enfriarse y comenzar el proceso de gelificación, la estructura atómica del gel sufre una reestructuración que deriva de algunas tensiones presentes en su estructura tridimensional, generalmente lo que acompaña al exudado es una fase coloidal que puede impedir que vuelva a su forma inicial (19, 20).

El basto y diverso origen del cual se pueden obtener las macromoléculas no solo hace referencia al medio terrestre, sino también al marítimo. Ficocoloides es un término utilizado para describir a los compuestos coloidales que se obtienen a partir de algas macroscópicas y son formas gomosas de alto peso molecular (21). Conformados principalmente por tres grupos, uno de ellos se refiere a los ficocoloides y pueden encontrarse como: agares, carragenanos y los alginatos.

El agar o agar– agar, es un polisacárido que se extrae de determinadas cepas de algas rojas marinas de las familias *Gelidiaceae y Gracilariaceae* y se usa como espesante en muchos productos alimenticios por sus propiedades gelificantes. El agar es un polímero formado por dos tipos de polisacáridos, un disacárido compuesto de β-D-galactosa y 3,6-anhidro-α-L-galactosa. Los geles de agar refinado se usan para hacer cultivos de bacterias o tejidos celulares, y para electroforesis de ácidos desoxirribonucleicos (ADN). La agarobiosa es el disacárido principal del agar, figura 5 (22). "El agar es una sustancia gelatinosa que actúa como un excelente acondicionador del suelo y mejora el rendimiento del cultivo. Sirve como promotor del crecimiento de las plantas y para mejorar la fijación y la modulación del nitrógeno" (23). Aunado a dichas características es un compuesto que no presenta características tóxicas y es resistente a la licuefacción, lo que ha permitido generar un amplio repertorio de usos en industrias como son la alimenticia, la farmacéutica, entre muchas otras.



β-D-galactosa 3,6-anhidro-α-L-galactopiranosa

Figura 5. *Estructura de Agar-Agar.*

5.8 Goma arábiga de acacia

La manera tan extraordinaria en que la naturaleza dota de estructuras moleculares químicas tan complejas como son los polímeros es realmente inigualable, surgen de múltiples formas, por distintos medios y de diversas fuentes. La goma arábiga (GA), un exudado gomoso de un árbol africano que se obtiene de los tallos y ramas principalmente de las especies *Acacia Senegal* y *Acacia Seyal (figura 6)*, brota por efectos de estrés o estímulos del entorno exterior, es una sustancia pegajosa y gomosa que se seca por exposición al aire y calor del sol para formar nódulos duros. La composición química y calidad de la goma arábiga puede variar significativamente a partir del origen geográfico, la edad de los árboles, condiciones climáticas y ambientales del suelo, e incluso el lugar de exudación del árbol (24).

Figura 6. *Goma arábiga (GA), un exudado gomoso de un árbol de las especies Acacia Senegal y Acacia Seyal*

Hoy en día, la goma arábiga se emplea para diversos fines industriales. Se utiliza, por ejemplo, como agente floculante en cerámica, como adhesivo en la industria cosmética, como aditivo para procesos de microencapsulación o por sus propiedades emulsionantes en litografía o productos alimenticios. También es comúnmente utilizada en la industria farmacéutica como agente en suspensión para drogas insolubles y recientemente, la goma arábiga también se ha utilizado en la estabilización de nanotubos de carbono individuales (25, 26). En la industria alimentaria la goma se utiliza por sus excelentes características emulsionantes y ha sido estudiada por la FDA (Administración de Alimentos y Medicamentos, por sus siglas en inglés) con pruebas toxicológicas, teratológicas y mutagénicas y ha sido clasificado como un aditivo GRAS (Aditivo Alimentario Generalmente Reconocido Como Seguro) (27). Otras aplicaciones principales en la industria alimentaria están relacionadas como: estabilizador, espesante, floculante, agente en suspensión, gelificación y emulsificante. Pero su uso se ha extendido en una amplia gama de campos como la biotecnología y minería (24).

5.9 Composición estructural de la goma arábiga.

La goma arábiga forma parte de los grupos obtenidos como exudados del árbol de la especie *Acacia* que diferencian su constitución con la presencia de arabinogalactanos, proteoglicanos que contienen arabinosa y galactosa como sustituyentes polisacáridos en un componente proteico. Constituyente propio de exudados gomosos de árboles y distribuido ampliamente en los tejidos vegetales.

Diversos estudios se han realizado para poder establecer la composición estructural de la goma arábiga, dos fracciones se han reportado que pueden variar entre autores: una, integrada por polisacáridos que constituyen entre un 70-95% de la goma y la segunda una fracción rica en proteína de alto peso molecular que se reporta entre 1-2%. La fracción polisacárido contiene carbohidratos como galactosa, ramnosa, ácido glucurónico y arabinosa.

La estructura consta de una cadena principal de unidades β-d-galactopiranosa con enlaces 1,3. Además al ser altamente ramificada, estas cadenas laterales pueden presentar de dos a cinco unidades de los mismos enlaces de la cadena principal pero que se unen a ella mediante enlaces 1,6 y presentan una terminación de residuos de ácido glucurónico. Adicionalmente pueden hallarse en su estructura algunos átomos sobre la cadena principal de galactosa, como son calcio, magnesio y potasio (26,28-32).

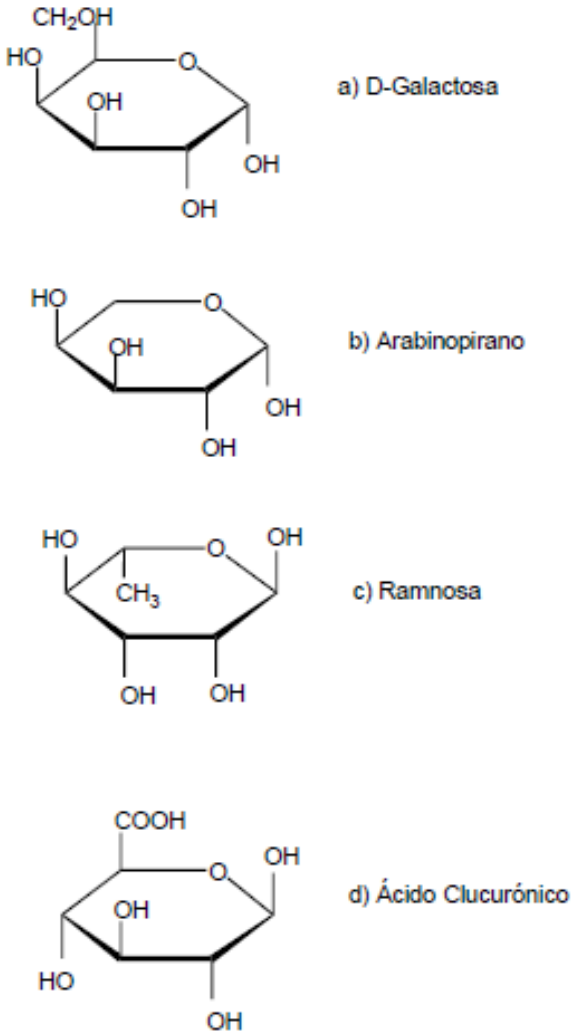


Figura 7. *Principales unidades de azúcar en la goma arábiga.*

“A medida que el árbol crece en el Sudán, la masa molecular de la goma arábiga exudada aumenta de ~ 250,000 (a los 5 años) a ~ 450,000 (después de 15 años) y la cantidad de proteína y la fracción de AGP de alta masa molecular también aumenta con la edad del árbol” (33).

También se ha reportado que la goma arábiga es rica en elementos esenciales y oligoelementos como aluminio, fósforo, magnesio, cobre, zinc y hierro (34). En algunas otras investigaciones, la goma arábiga fue clasificada químicamente como una mezcla compleja variable de arabinogalactano, monosacárido y glicoproteína (33). Algunos otros investigadores también declararon que, dependiendo de la fuente de GA, la porción de glucano de GA incluía más L-arabinosa, lo cual es relativo a la D-galactosa.

Los componentes químicos y nutricionales de la GA se muestran en la Tabla 1 (35). La goma arábiga incluye aminoácidos esenciales y no esenciales en cantidades variables, como se presenta en la Tabla 2 (35).

La composición estructural de la goma arábiga se ha estudiado intensamente desde la década de 1960 y a la fecha todavía se necesita una mejor comprensión de su estructura y propiedades de este producto natural.

Tabla 1. Componentes químicos y bioquímicos y contenido de energía

Componentes de goma arábiga y contenido energético	**Porcentaje (%)**
Materia seca	87
Proteína cruda	2.5
Arabinosa	25
Lactosa	14
Ramnosa	14
Metoxy	2.5
Ácido metilglucoronico	1.5
Cenizas	3.6
Fenilos	4.4
Materia energética	3000 (Kcal/kg alimenticio)

Shao-Ping Nie y col. (36), llevaron a cabo de metilación de la goma arabiga y análisis de GC-MS y propusieron que la goma arábiga (Acacia Senegal) es un polisacárido altamente ramificado con un esqueleto compuesto por residuos de 1,3-unido a galactopiranosil (Galp) sustituidos en las posiciones O-2, O-6 o O-4. Los residuos de azúcares terminales son el 59.5% de los azúcares totales. Los residuos de →2,3,6-β-D-Galp1→,→3,4-Galp1→,→3,4,6-Galp1→ y las sustituciones en las posiciones O-2 y O-4 no se habían identificado en estudios previos.

Tabla 2. Composición de aminoácidos de goma Arábiga (mg/kg)

Aminoácido	Ibrahim y col. (2013)	Gashua (2016)
Alanina	31	30
Arginina	7.0	21
Cisteína	1.0	1.5
Glutamato	36	73
Glicina	49	50
Histidina	51	124
Hidroxiprolina	274	453
Isoleucina	14	24
Leucina	75	139
Lisina	26	51
Prolina	72	114
Serina	123	217

5.10 Hidrogeles o polímeros superabsorbentes

Los hidrogeles son materiales poliméricos hidrófilos de estructura tridimensional reticulada y que se caracterizan por su gran capacidad hidro-absorbente, reteniendo y cediendo grandes cantidades de agua sin disolverse (37). Son blandos, elásticos e incrementan su volumen al hincharse en presencia de agua, mientras que en su forma deshidratada son cristalinos y suelen denominarse como xerogel (3).
Pueden ser de origen natural o sintético, los hidrogeles de polímeros naturales son los más estudiados dada su abundancia en la naturaleza.

Como señala Bath (14) los polímeros naturales o biológicos son cadenas formadas en la naturaleza durante los ciclos biológicos de crecimiento de los microorganismos. Los biopolímeros que son materiales poliméricos biodegradables se descomponen en su totalidad por agentes ambientales, permitiendo minimizar el impacto que estos pueden ocasionar al ambiente al término de su vida útil durante procesos de descomposición.

De este último proceso es que dichos materiales pasan a transformar su estructura molecular para convertirse “en sustancias simples o en componentes menores como agua, dióxidos de carbono y biomasa que finalmente se asimilan al medio ambiente” (15).

Sin embargo, los biopolímeros se disuelven total o parcialmente en agua, por lo que no pueden formar hidrogeles estables. Mazumder y col (38) asocian 3 factores que definen la estabilidad en una matriz de liberación controlada: mediante la naturaleza polimérica que engloban sus cadenas, el mecanismo y la organización obtenidos del ensamblaje de red y la escala de longitud de esta, que se asocian a las condiciones de síntesis bajo las cuales se ejecuta su formación (39).

La naturaleza hidrófila de los hidrogeles se debe a la presencia de grupos como hidroxilo (-OH), carboxilo (-COOH), amida ($-CONH_2$) y sulfónico ($-SO_3H$), a lo largo de las cadenas poliméricas unidos a la cadena principal, mientras que su resistencia a la disolución surge de las reticulaciones entre las cadenas principales de la red. Las fuerzas intermoleculares de cohesión impiden la desintegración del compuesto (1).

Gulrez, y col. (2) relaciona que “los grupos hidrofílicos polares son los primeros que se hidratan al entrar en contacto con el agua, lo que conduce a una unión primaria de agua. Como resultado, la red se hincha y expone los grupos hidrófobos que también son capaces de interactuar con las moléculas de agua, conduciendo a la formación de agua unida hidrofóbicamente, también llamada agua de unión secundaria”. Lo anterior corresponde al fluido que se encuentra ligado en su totalidad por interacción entre grupos funcionales de la estructura química de red de

las moléculas de agua como medio de reacción. Así mismo enfatizan que “el agua absorbida adicional se llama "agua libre" o "agua a granel", y se supone que llena el espacio entre las cadenas de red y/o el centro de poros, macroporos o huecos más grandes”.

“La capacidad de absorción de agua, determinada por el estado de equilibrio hinchado, se debe al balance que ocurre entre las fuerzas osmóticas, debidas al agua que entra en la red, y las fuerzas que ejercen las cadenas poliméricas en oposición a esa expansión” (40).

Dicha capacidad está determinada como el índice de hinchamiento y definida como una medida de la cantidad de fluido que puede absorber un hidrogel, y para aquellos con una base biodegradable el ciclo de absorción-liberación puede durar de 2 a 3 años, momento en el cual puede iniciar su degradación (4, 41).

Los hidrogeles pueden absorber desde 10 a 20% (un límite inferior arbitrario) hasta miles de veces su peso seco en agua. Cuando el contenido de agua excede de 100% se denominan hidrogeles superabsorbentes (3, 41, 42).

“El primer hidrogel superabsorbente de almidón hidrolizado con poliacrilonitrilo lo desarrolló el Departamento de Agricultura de Estados Unidos a finales de la década de los setenta. Desde entonces numerosos hidrogeles se han sintetizado con miras a incrementar la capacidad de absorción de agua” (43).

Pero la finalidad de investigaciones en desarrollo no solo se basa en conseguir materiales capaces de captar una mayor cantidad de agua, sino también en un enfoque de sostenibilidad. Las poliacrilamidas son muy populares entre los materiales empleados para la obtención de matrices poliméricas superabsorbentes, sin embargo, Chalker-Scott (citado en (44), p.8) afirma que a pesar de que la forma polimerizada de la acrilamida no es tóxica, después de cinco años el hidrogel se habrá descompuesto, de tal modo que los productos libres despolimerizados de manera natural, dejan grupos acrilatos de potasio y acrilamida en el medio, que es una neurotóxina letal y un cancerígeno que puede penetrar al organismo a través de la piel y por inhalación (44, 45).

Por tanto, surge la necesidad de encontrar materiales biodegradable provenientes de materias primas de origen natural y de fuentes renovables, que puedan traducirse en una alternativa más amigables con el medio ambiente.

Los materiales naturales o biológicos útiles en el ensamblaje de matrices poliméricas de liberación controlada muestran ventajas (en su gran mayoría) tales como degradabilidad (cuyos productos de degradación generalmente pueden considerarse seguros), nula toxicidad, su proceso de renovación natural y un bajo costo, y cuyas características son inherentes de su fuente de obtención. “Los

polímeros naturales más estudiados para la síntesis de hidrogel son los carbohidratos como ácido hialurónico, quitina/quitosano, derivados de celulosa solubles en agua, dextrano, almidón, alginato, fibrina, entre otros. También se pueden usar otras macromoléculas biológicas, con proteínas como la gelatina, el colágeno y el fibrinógeno siendo las más utilizadas" (46).

Como desventaja los polímeros de esta naturaleza limitan el diseño de los productos obtenidos. Una característica que se puede presentar comúnmente en los materiales de esta índole es la variación de lote que se genera dadas las diversas fuentes de extracción de los polímeros, las mezclas complejas son características en su extracción y generan particularidades en cada producto donde sus propiedades se vuelven de gran especificidad y por tanto sus aplicaciones también. En algunos casos, aunque no se reportan como un problema generalizado, se exhiben limitaciones en la cantidad de grupos funcionales que puedan ser susceptibles de reacciones de reticulación, traduciéndose esta deficiencia en propiedades mecánicas relativamente débiles (46).

Los homo o copolímeros hidrofílicos se pueden entrecruzar, química o físicamente. De este último "los enlaces covalentes dentro de las cadenas son fuertes y direccionales, pero la unión entre diferentes cadenas es débil puesto que se consigue con puentes de Van der Waals" (10).

Para obtener hidrogeles, a partir de polímeros naturales, se debe considerar el uso de reticuladores, injertos para un proceso de entrecruzamiento químico. Lo anterior supone el injerto de monómero en la cadena principal de los polímeros o el uso de un agente de reticulación para unir dos cadenas de polímero.

La reticulación química puede otorgar las formas de unión necesarias que pueden estar ausentes en un polímero natural, manteniendo su degradabilidad y confiriendo estabilidad, como permanencia estructural y posibilidades de ajuste a los tiempos de degradación del producto final (7). Además, permite sintetizar hidrogeles entrecruzados a partir de la unión de monómeros o polímeros mediante el uso de reticuladores o entrecruzantes. El uso de reticuladores químicos para este mecanismo de síntesis implica la inserción de moléculas que puedan originar la reticulación entre cadenas poliméricas como se puede ver en la Figura 8.

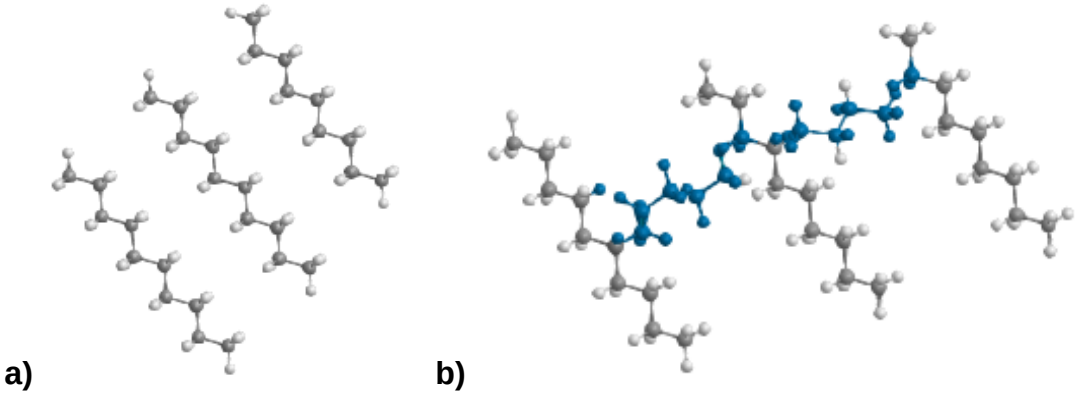


***Figura 8**. a) Cadenas poliméricas b) Polímero entrecruzado.*

Los métodos químicos y físicos de preparación para obtener hidrogeles superabsorbentes comprenden: la técnica de reticulación física que incluye la tecnología del ciclo de congelación/descongelación y la reticulación de enlaces de hidrógeno. En los últimos años han surgido nuevas técnicas como la tecnología de contacto de interfaz y la fotopolimerización in situ. En el caso de los métodos químicos incluyen polimerización en solución acuosa, polimerización en suspensión de fase inversa y métodos de irradiación de microondas.

5.11 Síntesis de hidrogeles por radiación de microondas

La síntesis de hidrogeles asistida por microondas es una alternativa novedosa, un método conveniente y económico debido a la puesta en juego de mecanismos de calentamiento diferentes a los convencionales que permiten, a la vez que se mejore la microestructura de los polímeros sinterizados, un importante ahorro de tiempo y energía. “La principal ventaja que presenta es la reducción de los tiempos de síntesis, ya que en muchos casos la velocidad de la reacción puede llegar a aumentar de 2 a 3 órdenes de magnitud, con respecto al calentamiento convencional” (47). Lo anterior también se traduce en una mejora significativa en el rendimiento y la reducción de reacciones secundarias, obteniendo así productos más puros con una mejora en la calidad y las propiedades de los materiales procesados.

Aunque la mayoría de las mejoras se les atribuyen a los efectos térmicos producidos por la aplicación de microondas, algunos de ellos no se pueden reproducir por calentamiento convencional, por lo que son considerados efectos no térmicos. Dichos efectos específicos a menudo son asociados al calentamiento dieléctrico, la energía de microondas puede acoplarse directamente con el material a nivel

molecular a través de la rotación de dipolos y la conducción iónica. Las moléculas polares se orientan siguiendo la polarización de campo eléctrico, rotan y vibran, llevando a la fricción y colisión de moléculas que se traduce en un aumento de temperatura (48).

La aplicación de esta tecnología produce un perfil inverso de temperaturas, la radiación de microondas calienta directamente la mezcla de reacción, mientras que con el método convencional la transferencia de calor se produce desde un cuerpo de mayor temperatura. Aunado a la particularidad en el mecanismo de calentamiento, se presentan otras características propias del uso de las microondas como es el sobrecalentamiento de los disolventes a presión atmosférica, o el calentamiento selectivo de algunos compuestos que absorben en mayor medida la radiación (49). La aplicación de las microondas como alternativa para sustituir un método de calentamiento convencional estará entonces limitada por los materiales a utilizar, puesto que no todos poseen partículas (dipolos, iones, electrones libres, etc.) capaces de interaccionar con las microondas (47).

La aplicación de las microondas bajo un enfoque de polimerización emergente, en comparación con los enfoques tradicionales, muestra una capacidad de penetración más fuerte, pero moderada en comparación con otras radiaciones, que dependerá también de la medida en que el material es visible a las microondas (7, 47).

Dadas las singularidades que ha mostrado esta tecnología, se ha establecido como un método muy conveniente para la producción de hidrogeles de manera más eficiente. Las diferencias entre los métodos de polimerización convencionales y por microondas se enumeran en la Tabla 3 (7).

Tabla 3. Comparación de tres métodos químicos de polimerización

Método de polimerización	**Características**
Polimerización en solución acuosa	Fácil control, menor costo y estable; productos en forma de masa
Polimerización en suspensión de fase inversa	Complejos, mayores costos e inestables; productos en partículas
Polimerización por radiación microondas	Calentamiento rápido, alta eficiencia y producto puros; productos en forma de masa

Se han realizado diferentes estudios en la obtención de hidrogeles superabsorbentes a partir de polisacáridos a fin de generar propuestas de síntesis innovadoras para los nuevos enfoques de aplicación. “Los materiales poliméricos

sintetizados por vías convencionales pierden ventaja por su baja resistencia a la tracción y ruptura cuando incrementa la capacidad de absorción” (40).

Giachi y col. (50) reportaron un hidrogel sintetizado por microondas que poseía un hinchamiento más rápido y cinética de contracción en comparación con los hidrogeles superabsorbentes preparados por métodos convencionales. Jobanovic y col. (51) investigaron la influencia de la síntesis de microondas en la cinética de polimerización y revelaron que la velocidad de polimerización aumentó significativamente en comparación con el método de calentamiento normal. Dedujeron que esto se podría deber a una disminución de la energía de activación y al aumento de la energía inherente del reticulador. Más adelante, Pandey y col. (52) sintetizaron hidrogeles de celulosa bacteriana (BC)/acrilamida (Am) utilizando el método de irradiación de microondas y el producto mostró propiedades no citotóxicas y hemocompatibles. Además, se realizó un estudio comparativo entre la congelación, la irradiación de microondas y una combinación de ambos métodos (53).

Feng y col. (54) también prepararon hidrogeles superabsorbentes a base de celulosa usando harina de semilla de lino bajo irradiación de microondas. Eligieron persulfato de potasio y N,N’-metilenbisarilamida (NMBA) como iniciador y reticulante, respectivamente.

Por otra parte, Wan y col. (55) colocaron un copolímero de metacrilato de metilo y celulosa de bambú bajo irradiación de microondas usando nitrato de amonio cérico como reticulante. Se estimó el efecto de la potencia de microondas, el tiempo de exposición a microondas y la concentración de iniciador sobre las reacciones de copolimerización de injerto y se obtuvieron las condiciones óptimas de 160 W de potencia del microondas y el tiempo de exposición de 9 min. Encontraron que la capacidad de absorción de humedad de los copolímeros injertados disminuyó significativamente con el aumento del porcentaje de injerto.

Hasija y col. (23) prepararon hidrogeles biodegradables o copolímeros injertados a partir de goma arábiga/agar/ácido acrílico, utilizando irradiación de microondas para obtener el máximo porcentaje de hinchamiento. El producto sintetizado fue caracterizado mediante técnicas de espectroscopía infrarroja por transformación de Fourier (FTIR), difracción de rayos X (XRD) y técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM). Se evaluaron los efectos del tratamiento de hidrogel en la capacidad de retención de agua de ocho muestras de suelo diferentes recolectadas de varias regiones de Punjab. El hidrogel sintetizado mostró un gran potencial como material acondicionador del suelo para ser utilizado con fines agrícolas.

6. Desarrollo experimental

6.1 Reactivos químicos y equipo de laboratorio

La goma arábiga de acacia (GA, figura 9), el agar para coliformes (AC), el monómero de acrilamida (C_3H_5NO), N,N'-metilenbisacrilamida ($C_7H_{10}N_2O_2$) y persulfato de potasio ($K_2S_2O_8$), fueron reactivos químicos de calidad analítica y adquiridos por Sigma-Aldrich. El agar nutritivo también de calidad analítica fue proporcionado por BD Bioxon.

Se utilizó un equipo de radiación de microondas con las siguientes especificaciones: 120 V, 60Hz y 1100 W (JES1036PWH), marca General Electric. Se empleo un baño termostático que garantizó la estabilidad de la temperatura durante las pruebas de viscosimetría. Además, una parrilla de calentamiento con agitación magnética marca Thermo Scientific, modelo SP131325 y una balanza analítica marca OHAUS modelo AdventurerTM para evaluar la capacidad de hinchamiento.

***Figura 9**. Goma arábiga*

6.2 Síntesis de los hidrogeles entrecruzados o reticulados

La primera etapa consistió en sintetizar hidrogeles entrecruzados de goma arábiga empleando dos tipos de agar: agar nutritivo y agar para coliformes. La goma arábiga (GA), el agar nutritivo (AN) y/o coliformes (AC) como bases poliméricas naturales, acrilamida (AM) como monómero sintético, persulfato de potasio ($K_2S_2O_8$) como iniciador polimérico y N,N-metilenbisacrilamida (MBA, $C_7H_{10}N_2O_2$), como entrecruzante.

Los hidrogeles basados en goma arábiga se prepararon de la siguiente manera: se pesaron 0.5 g de goma arábiga y 0.5 g agar (nutritivo o coliformes) se solubilizaron en agua desionizada. A la mezcla de reacción se le adiciono 0.043 mol/L de persulfato de potasio como iniciador, 0.010 mol/L de N,N-metilenbisacrilamida como entrecruzante, posteriormente se agregó paulatinamente 0.144 mol/L de monómero acrilamida disuelto en agua, en un total de 25 mL de agua desionizada, bajo agitación magnética constante. La mezcla homogénea se sometió a reacción en un equipo de radiación de microondas durante un tiempo constante de 40 s hasta la formación de los hidrogeles, a continuación, se mantuvo en reposo por 10 minutos para permitir el enfriamiento del hidrogel obtenido.

6.3 Purificación de hidrogeles

El producto resultante o hidrogel se colocó en agua desionizada durante 24 h, cambiándola periódicamente para remover posibles restos de monómero y homopolímero remanente. Finalmente, las muestras de hidrogel se dejaron secar en un horno de aire caliente a 60 °C por aproximadamente 48 h. Cada muestra fue pesada, diariamente, hasta que no se observó cambio en el peso y alcanzar el estado de xerogel.
La reacción de entrecruzamiento se optimizó con respecto a algunas variables de reacción como es el tiempo de reacción, concentración de goma arábiga/agar y de monómero acrilamida, para obtener un hidrogel con un porcentaje óptimo de retención de agua (23).

6.4 Determinación de la capacidad de absorción en los hidrogeles reticulados.

La segunda etapa consistió en determinar la capacidad de absorción de agua desionizada. Se utilizó un método gravimétrico, midiendo la retención o absorción de agua por parte del hidrogel seco en intervalos de tiempo definidos. Se pesaron 100 mg de xerogel y se sumergió en 50 mL de agua desionizada, a un tiempo determinado, se eliminó la mayor cantidad de agua adherida a la superficie, se pesó y se devolvió nuevamente al recipiente. Este procedimiento se efectúo hasta que no fue significativa la variación en el peso entre lapsos de medición. Los tiempos de hidratación fueron de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 60, 90 y 120 min. Todas las medidas se realizaron a temperatura ambiente (25°C). El procedimiento descrito se llevó a cabo por duplicado y los valores reportados son los promedios de ambas mediciones (4).

Cuando se absorbe un líquido se manifiesta por un incremento visible en el volumen del gel, por lo que se dice de un hinchamiento del gel. El porcentaje de hinchamiento o hidratación (%H) se calculó según la siguiente ecuación (1).

(1)

$$\%H = \left(\frac{masa\ húmeda - masa\ seca}{masa\ seca} \right) X\ 100$$

La capacidad de hinchamiento q_t se calcula a partir de la masa de polímero al tiempo t (m_t) y la masa de polímero seco inicial (m_0), según la ecuación 2 (4):

Capacidad de hinchamiento (2)

$$q_t = \frac{m_t - m_0}{m_0}$$

6.5 Caracterización por viscosimetría y espectroscopia IR.

6.5.1 Caracterización por viscosimetría

La siguiente etapa consistió en las pruebas de viscosimetría a 25º C de la goma arábiga (GA). En este estudio para la determinación de masa molecular promedio, mediante viscosimetría capilar, se empleó un viscosímetro Ubbelöhde con una precisión de ± 0.2%; 0.01 centistoke seg^{-1} (Figura 10). Para las determinaciones de viscosimetría se utilizó un baño termostático con un sistema de circulación de agua, para garantizar la estabilidad de la temperatura en cada proceso de medición. Se empleo agua desionizada como “blanco” y disoluciones de goma arábiga de diferente concentración.

***Figura 10**. Viscosímetro Ubbelöhde capilar de vidrio*

El procedimiento radicó en preparar tres diluciones de goma arábiga con concentraciones conocidas de 1, 3 y 5 g/dL para medir la viscosidad a partir de 13 mL de muestra de cada disolución. Para cada concentración de las disoluciones se realizaron 10 repeticiones en el viscosímetro de Ubbelöhde (56).

La viscosimetría se basa en la medición del tiempo de flujo que tarda un volumen determinado de fluido a través de un tubo capilar por efecto de la gravedad. A partir de este tipo de ensayos, se extraen parámetros para la determinación de la viscosidad intrínseca. En el caso de disoluciones, es frecuente medir la viscosidad de la disolución en comparación con la viscosidad del disolvente puro por medio de un viscosímetro de tubo capilar. Se miden los tiempos de flujo de un volumen dado de un disolvente, t_0, y de una disolución, t, a temperatura y condiciones de presión atmosférica fijas, en el viscosímetro (57).

6.5.2 Caracterización por espectroscopía IR

Se llevo a cabo la caracterización por medio de espectroscopía de infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) de goma arábiga de acacia (GA), agar nutritivo (AN), acrilamida (C_3H_5NO), usados como materia prima para la obtención de los hidrogeles entrecruzados.

Los grupos funcionales típicos de cada uno de los reactivos químicos analíticos, así como de los hidrogeles entrecruzados obtenidos se analizaron usando un Espectrofotómetro Infrarrojo Perkin Elmer de transformadas de Fourier (FTIR), modelo Spectrum One. El equipo se encuentra bajo condiciones controladas de atmósfera para reducir la contribución del vapor de agua en las mediciones.

La espectroscopia FTIR es una herramienta donde el principio básico se basa en la absorción de un haz de luz infrarroja y consecuente excitación de grupos moleculares que comprende un intervalo entre 4000 a 500 cm^{-1} en número de onda o frecuencia de vibración, es decir, genera movimientos vibracionales en los enlaces de la molécula en el rango del espectro de infrarrojo medio (58).

El procedimiento realizado en este estudio consistió en un barrido inicial sin muestra para la recopilación de fondo, es decir, recopilación de rangos de aceptabilidad para los valores de absorbancia, ruido, vapor de agua, ruido electrónico, así como para las relaciones señal-ruido y señal-agua.

Realizado el procedimiento anterior se procedió a colocar una pequeña cantidad de muestra sólida en el punto de lectura, se comprime dicha muestra utilizando una ~~la~~ perilla que se encuentra sostenida mediante un brazo, hasta que el monitor muestra en el indicador de fuerza un valor entre 40 a 80 y se procede a correr las muestras, bajo el mismo procedimiento.

7. Discusión de resultados

De acuerdo con los objetivos planteados en el capítulo III, en primer lugar, fueron obtenidos los hidrogeles reticulados o entrecruzados, se realizaron ensayos probando tiempos de exposición de radiación de microondas, concentración de GA y concentración de agar (agar nutritivo y de coliformes). También fue calculado el porcentaje de hinchamiento y retención de agua de los hidrogeles de goma arábiga/agar/poliacrilamida (GA-PAM/AN) producidos. Finalmente se determinó el peso molecular de la goma arábiga de acacia y posteriormente se obtuvieron los espectros de absorción IR de todos los reactivos químicos de inicio, es decir, goma arábiga (GA), agar (AG) y el monómero de acrilamida (AM), así como del hidrogel reticulado o entrecruzado.

7.1 Ensayos preliminares de la síntesis de hidrogeles o copolímeros de Goma Arábiga/Poliacrilamida/Agar nutritivo (GA-PAM/AN) reticulados.

Se realizaron ensayos preliminares para la síntesis de hidrogeles a partir de goma arábiga (GA), agar nutritivo (AN), el monómero acrilamida (AM), persulfato de potasio (PP) como iniciador, N,N´–metilenbisacrilamida (MBA) como entrecruzante, y agua como disolvente, modificando el método de síntesis previamente reportado

de acuerdo a Mauselli y col. (59). Los hidrogeles entrecruzados o reticulados se formaron mediante la polimerización y reticulación de un monómero (acrilamida) en presencia de los polímeros ya formados (goma arábiga y agar); de esta manera el polímero (poliacrilamida) queda dentro en la red tridimensional del hidrogel. Generalmente se emplean para su obtención biopolímeros y el uso de un monómero sintético, el diseño de esta estrategia es para mejorar las propiedades mecánicas, proporcionando resistencia adicional al gel, sin perder el factor de biodegradabilidad y biocompatibilidad (39). Las propiedades físicas de los polímeros combinados dependen de las propiedades de los polímeros individuales, así como del camino mediante el cual son combinados (60,61).

7.1.1 Tiempo de irradiación

Los hidrogeles a partir de GA y AN como cadena principal, el monómero de AM, PP como iniciador, MBA como entrecruzante, y agua como disolvente fueron preparados. En la tabla 4, se muestra la dosis y concentraciones establecidas para las mezclas de reacción sometidas a variaciones en el tiempo de 30, 40 y 50 segundos de irradiación de microondas.

Tabla 4. *Parámetros de reacción a diferentes tiempos de irradiación de microondas (30,40 y 50 seg)*

GA/AN (g)	Conc. iniciador (mol/L)	Conc. monómero (mol/L)	Conc. entrecruzante (mol/L)	H_2O (mL)
0.5	0.043	0.1441	0.010	25 mL

En la figura 11 se muestran los hidrogeles crudos sintetizados como resultado de los ensayos a distintos tiempos de reacción (30, 40 y 50 s) de irradiación de microondas.

Las muestras indicaron que a un tiempo de irradiación de 30 segundos (figura 11 inciso (a)) presentaron una baja conversión de los reactivos y por lo tanto un menor rendimiento. Las mezclas de reacción expuestas a 40 y 50 segundos mostraron mejores productos de reacción, en donde fue muy claro que solo la muestra con un tiempo de irradiación con 40 segundos (figura 11 inciso b)) mostró características típicas de hidrogel; insolubilidad, textura blanda y consistencia elástica, que pueden variar dependiendo del polímero de conformación y la densidad de entrecruzamiento (62). Por lo tanto, fue considerado como el tiempo de irradiación de microondas para las posteriores síntesis de entrecruzamiento o reticulación de hidrogeles de goma arábiga.

a) b) c)

Figura 11. *Hidrogeles crudos obtenidos a distintos tiempos irradiación de microondas: a) 30 s, b) 40 s y c) 50s.*

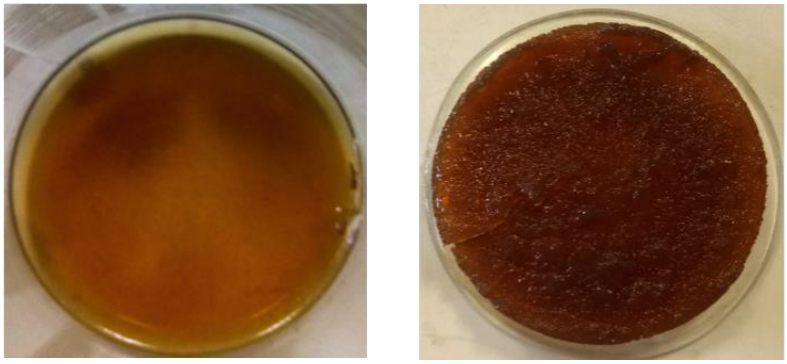
7.1.2 Concentraciones de GA/AN

Se elaboraron hidrogeles con dos diferentes proporciones de alimentación de GA/AN, las cuales fueron con el fin de conocer la masa de reacción. La tabla 5, resume las cantidades de reactivos necesarios para su síntesis. Los hidrogeles fueron asignados como HG0.5 (GA/AN) y HG2.00 (GA/AN).

Tabla 5. *Parámetros de síntesis para determinación de la masa de alimentación de GA/AN*

GA/AN (g)	Conc. iniciador (mol/L)	Conc. de AM (mol/L)	Conc. de MBA (mol/L)	H_2O (mL)	Tiempo de irradiación (s)	Hidrogeles
0.5	0.043	0.1441	0.010	25	40	HG0.5 (GA/AN)
2.00						HG2.00 (GA/AN)

La figura 12 expone los hidrogeles crudos sintetizados como resultado de la síntesis asistida por irradiación de microondas.



a **b**

Figura 12. *Muestras de hidrogel crudo para determinación de GA/AN en la composición de hidrogeles* ***a)*** *0.5 g y* ***b)*** *2.00 g.*

7.2 Hidrogeles de GA-PAM/Agar-nutritivo (GA-PAM/AN) y GA-PAM/Agar-coliforme (GA-PAM/AC).

A partir de los resultados derivados de los ensayos preliminares, se llevaron a cabo las síntesis para la preparación de hidrogeles con una composición polimérica GA-PAM/Agar-nutritivo (GA-PAM/AN) y GA-PAM)/Agar-coliforme (GA-PAM/AC), estableciendo las condiciones óptimas de los parámetros de reacción.

En la tabla 6 se informa lo relativo a los hidrogeles HG1 (Grupo A) y a los hidrogeles HG2 (Grupo B), los cuales contienen una composición polimérica GA-PAM/Agar-nutritivo (GA-PAM/AN). Los hidrogeles HG1 (Grupo A) se refieren a los hidrogeles preparados a diferente concentración de GA/AN que van de 0.5 g hasta 2.00 g como cadena principal, mientras se mantuvo constante la concentración del monómero de AM (0.1441mol/L). Los hidrogeles HG2 del Grupo B, fueron obtenidos cuando la concentración de GA/AN es constante y la concentración del monómero fue variando desde 0.0281 hasta 0.1969 mol/L. En cada una de las reacciones de copolimerización, fueron usadas: concentración de iniciador 0.043 mol/L, concentración de entrecruzante 0.010 mol/L, 25 mL de agua desionizada y 40 segundos de radiación por microondas.

Tabla 6. *Proporciones de alimentación utilizadas para la síntesis de los hidrogeles GA-poli (AM)/AN*			
HG1 (Grupo A)	**Goma arábiga (g)**	**Agar Nutritivo (g)**	**Monómero acrilamida (mol/L)**
HG-0.50	0.50	0.50	0.1441
HG-0.75	0.75	0.75	
HG-1.00	1.00	1.00	
HG-1.25	1.25	1.25	
HG-1.50	1.50	1.50	
HG-2.00	2.00	2.08	
HG2 (Grupo B)			
HG-0.0281	0.50	0.50	0.0281
HG-0.0844			0.0844
HG-0.1441			0.1441
HG-0.1969			0.1969

La tabla 7 presenta los hidrogeles HG3 (Grupo A) y HG4 (Grupo B), en donde la composición polimérica es GA-PAM/Agar-coliforme (GA-PAM/AC). Los hidrogeles HG3 (Grupo A) se trata de los hidrogeles producidos con diferentes concentraciones de GA/AC manteniendo constante la concentración del monómero de AM. Con respecto a los hidrogeles HG4 (Grupo B), la concentración de GA/AC es constante y la concentración del monómero varió de 0.0281 hasta 0.4783 mol/L.

Tabla 7. *Proporciones de alimentación utilizadas para la síntesis de los hidrogeles a partir de GA-poli (AM)/AC.*			
HG3 (Grupo A)	**Goma arábiga (g)**	**Agar Coliformes (g)**	**Monómero acrilamida (mol/L)**
HG-0.50	0.50	0.50	0.1441
HG-1.00	1.00	1.00	
HG-1.50	1.50	1.50	
HG-2.08	2.08	2.08	
HG4 (Grupo B)			
HG-0.0281	2.00	2.00	0.0281
HG-0.1441			0.1441
HG-0.2532			0.2532
HG-0.3657			0.3657
HG-0.4783			0.4783

Los hidrogeles GA-PAM/AN y GA-PAM/AC (figura 13) fueron fácilmente sintetizado por medio de una polimerización acuosa mediante un proceso asistido por radiación de microondas, reacción que se desencadenó por el iniciador persulfato ($K_2S_2O_8$) utilizado, responsable de la formación de especies activas. Las cadenas del polímero que se forman se unen covalentemente cuando se adicionan el entrecruzante MBA, dando lugar así, a un hidrogel químico, caracterizado por una estructura en forma de red capaz de expandirse al entrar en contacto con un fluido.

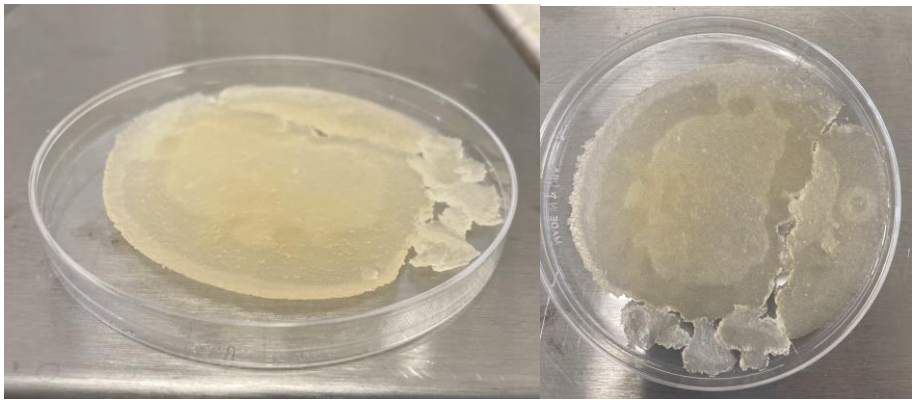


Figura 13. *Hidrogeles purificados obtenidos GA-PAM/AN y GA-PAM/AC*

Los polisacáridos son una abundante muestra de biopolímeros presentes en la naturaleza y que pueden mejorar las propiedades de nuevos productos para ser más amigables con el medio ambiente.

Los biopolímeros presentan algunas limitantes por si solos como fragilidad, baja resistencia térmica y a la humedad y su uso frente a los polímeros sintéticos puede verse en desventaja. Sin embargo, existen nuevos requerimientos en los materiales desarrollados que ponen a ambos materiales como complementarios entre sí para mejorar las propiedades de nuevos materiales.

Este trabajo de investigación se centró en la síntesis asistida por microondas y el uso de dos gomas naturales como columna vertebral del hidrogel, es decir, agar y goma arábiga. El agar es un polisacárido no ramificado, forma una sustancia gelatinosa disuelto en agua caliente y un gel al enfriarse. Actúa como un excelente acondicionador del suelo y mejora el rendimiento de los cultivos pues permite generar un ambiente promotor del crecimiento bacteriano propiciando en su descomposición una mayor afinidad de los productos de degradación con el medio. Es un tipo de especie bacteriana degradante y sirve como promotor del crecimiento de las plantas y para mejorar la fijación y modulación del nitrógeno (23). La goma arábiga se obtiene de árboles de Senegal que tienen propiedades de alta solubilidad

y baja viscosidad. La optimización de la reacción se realizó tomando en cuenta algunas variables de reacción tales como concentración de monómero, dosis de agar y goma arábiga como columna vertebral del hidrogel, tiempo de irradiación de microondas y volumen de disolvente, modificando el método de síntesis previamente reportado por Hasijai y col. (23), para obtener un hidrogel con un mejor porcentaje de hinchamiento.

Cabe destacar que el método de síntesis modificado en nuestro laboratorio permitió obtener hidrogeles superabsorbentes con un mayor porcentaje de hidratación, superando así a los reportados por Hasijai y col. (23), lo cual implica que las variables de reacción ocupadas son determinantes para la preparación de biopolímeros con un mayor volumen de hidratación.

7.3 Porcentaje de hidratación (o hinchamiento, %H) de los hidrogeles producidos.

El hinchamiento o hidratación es el rasgo característico más importantes de un hidrogel, la absorción de un líquido se manifiesta en un incremento visible de su volumen, por lo que se habla de hinchamiento del gel. Todos los hidrogeles preparados se caracterizaron midiendo el porcentaje de hinchamiento, el cual es una medida de la cantidad de fluido que puede absorber un hidrogel en su interior.

En la figura 14 se muestran las curvas del porcentaje de hidratación (%H) con respecto al tiempo (min) de los hidrogeles GA-PAM/AN, HG1 (Grupo A), en agua desionizada a 25 °C. El procedimiento para obtener el porcentaje de hidratación se efectúo hasta que no fue significativa la variación en la masa entre los lapsos de medición. Los tiempos de hidratación fueron de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 60, 90 y 120 min. Todas las medidas se realizaron a temperatura ambiente (25°C). De acuerdo con la figura 21, el porcentaje de hidratación mostró su máximo a 559,21 a 120 min, cuando el hidrogel fue preparado con una masa de 1.25 g de GA/AN, es decir, el asinado como %H(1.25), en la figura 14. Cuando se incrementa la masa de GA/AN hasta 2.08 g se observa que diminuye notablemente en el % de hinchamiento, incluso cuando la composición GA/AN es del orden de 0.5 g.

En la figura 15 se exponen las curvas del porcentaje de hinchamiento (%H) con respecto al tiempo en min., de los hidrogeles de composición polimérica GA-PAM/AN, HG2 (Grupo B) en agua desionizada a 25 °C, se observa que el porcentaje de hinchamiento máximo fue a una concentración de monómero de AM de 0.0281 mol/L con un porcentaje de hinchamiento del 504.10 a 120 min, ligeramente mayor a la concentración de 0.0844 mol/L de AM con un % de hinchamiento de 470.37.

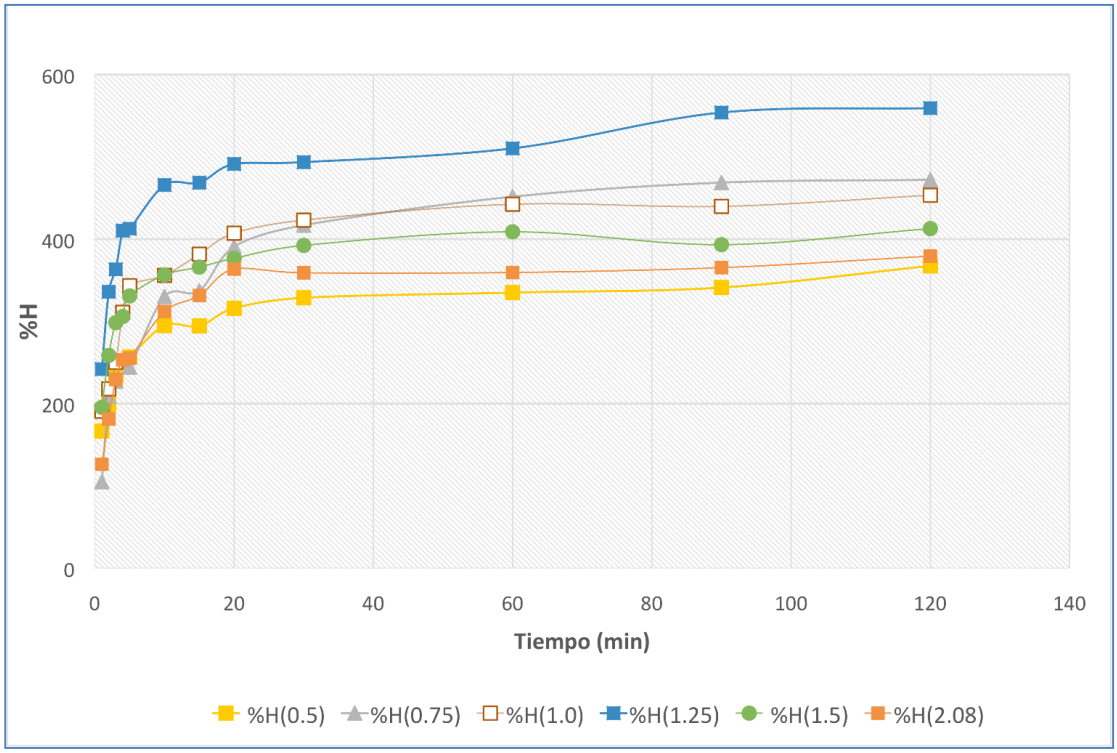


***Figura 14**. Curva del porcentaje de hinchamiento en agua desionizada de los hidrogeles HG1 (Grupo A). Diferentes concentraciones de la composición de GA/AN.*

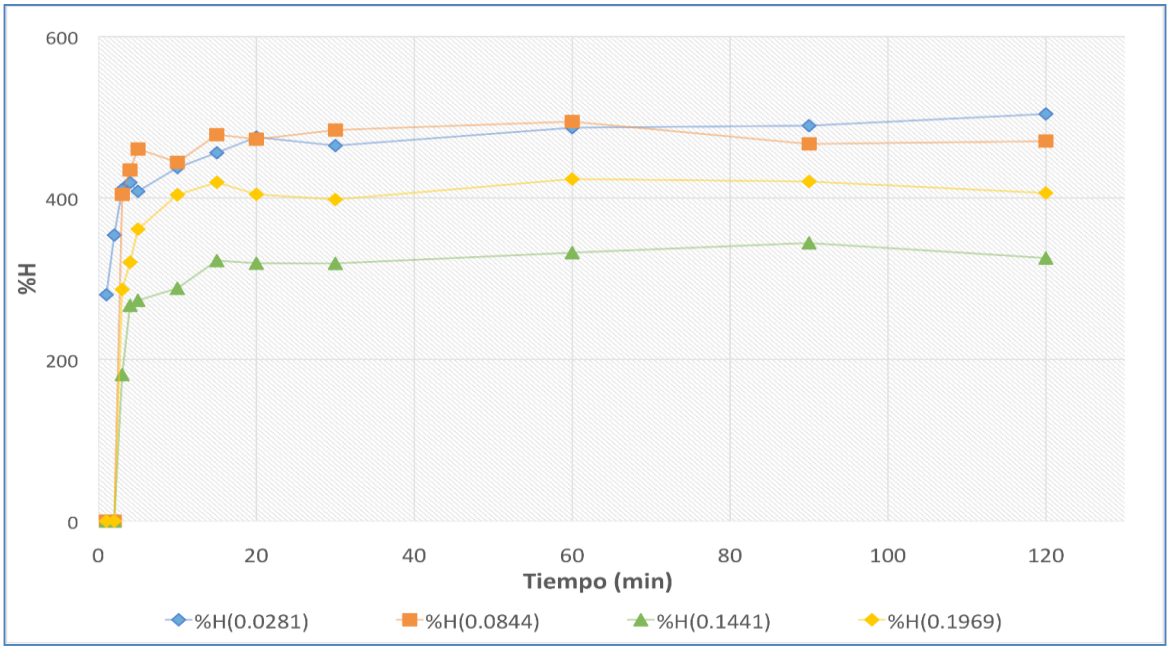
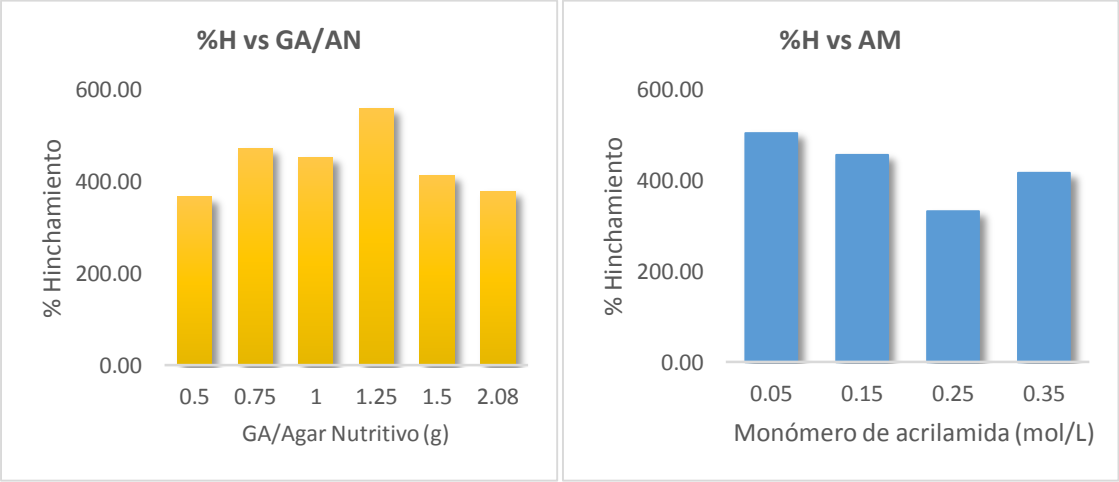


***Figura 15.** Curva del porcentaje de hinchamiento en agua desionizada de los hidrogeles HG2 (Grupo B). Diferentes concentraciones del monómero AM.*

En los gráficos de la figura 16, se resumen los resultados del %H vs el contenido en gramos de GA/AN (Figura 16 **A**) y la concentración en mol/L de AM (Figura 16 **B**) a un tiempo de absorción de 120 min.

En la figura 16 A, se puede observar el incremento del contenido de agua en los productos (hidrogeles) que van de 0.5 a 1.25 g de GA/AN, siendo este último valor (1.25 g) su máximo de hinchamiento (559.21%), pero a medida que aumenta la proporción de GA/AN de 1.5 y 2.8 g, es claro que el %H disminuye.

La figura 16 B proporciona la relación %H vs concentración del monómero AM (grupo B), donde es preciso decir que el máximo de absorción de fluido para estos productos se dio a la concentración más baja de monómero de AM en su estructura macromolecular (%H = 504.10), también se distingue que a medida que incrementa la presencia de PAM, menor es la cantidad de agua que puede ser absorbida y retenida por estos hidrogeles.



A **B**

Figura 16. ***A)*** *Porcentaje de hinchamiento versus contenido de GA/Agar nutritivo del grupo A.* ***B)*** *Porcentaje de hinchamiento versus concentración de monómero del grupo B a un tiempo de 120 min.*

En la figura 17 se aprecian las curvas de hinchamiento para hidrogeles de composición polimérica GA-PAM/AN de los productos HG3 del grupo A, donde más del 50 % de la absorción tuvo lugar en los primeros minutos de la inmersión en agua, lo cual es una característica de gran importancia para la aplicación de hidrogeles usados como por ejemplo en la agricultura. La muestra de hidrogel irradiada por microondas con masa de GA/AC-1.0 g a 120 min (HG3-1.0) logró un porcentaje de hinchamiento de 631.69. Si tomamos en cuenta que un hidrogel superabsorbente se considera como tal, cuando puede absorber por arriba del 100% su peso en agua

(3, 41, 42), por lo cual, el valor obtenido en nuestro laboratorio es relativamente alto en cuanto al porcentaje de hinchamiento (631.69 %) para el hidrogel HG3-1.0.

En la figura 18 se consideran los porcentajes de hinchamientos logrados con las muestras de hidrogeles HG4 (GA-PAM/AC, Grupo B) preparados con agar coliforme y variando la concentración de monómero de AM de acuerdo con el tiempo de hidratación. Las curvas de absorción de los hidrogeles reflejan las mismas tendencias en agua. Y una capacidad de absorción más sobresaliente para el producto HG4-0.3657 con un valor de hinchamiento del 542.8%.

Todas las curvas de hinchamiento presentaron características de hidrogeles: un comportamiento rápido de absorción en los primeros instantes de tiempo en contacto con agua. Después de 60 min, empieza a perder capacidad de absorción, en donde es posible sea el máximo contenido de agua retenida en el interior de su matriz polimérica, y a partir de cual se mantiene relativamente constante su masa, ya que llega a su máximo límite de expansión y elasticidad (4, 63).

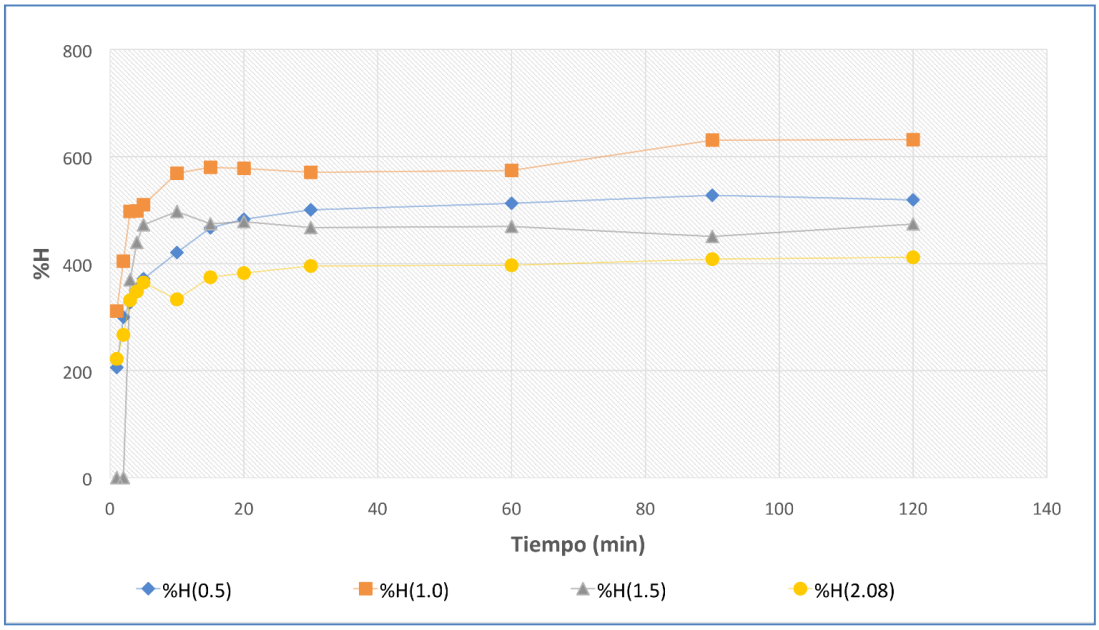


Figura 17. *Curva del porcentaje de hinchamiento en agua desionizada de los hidrogeles HG3 (Grupo A). Diferentes concentraciones de la composición de GA/AC.*

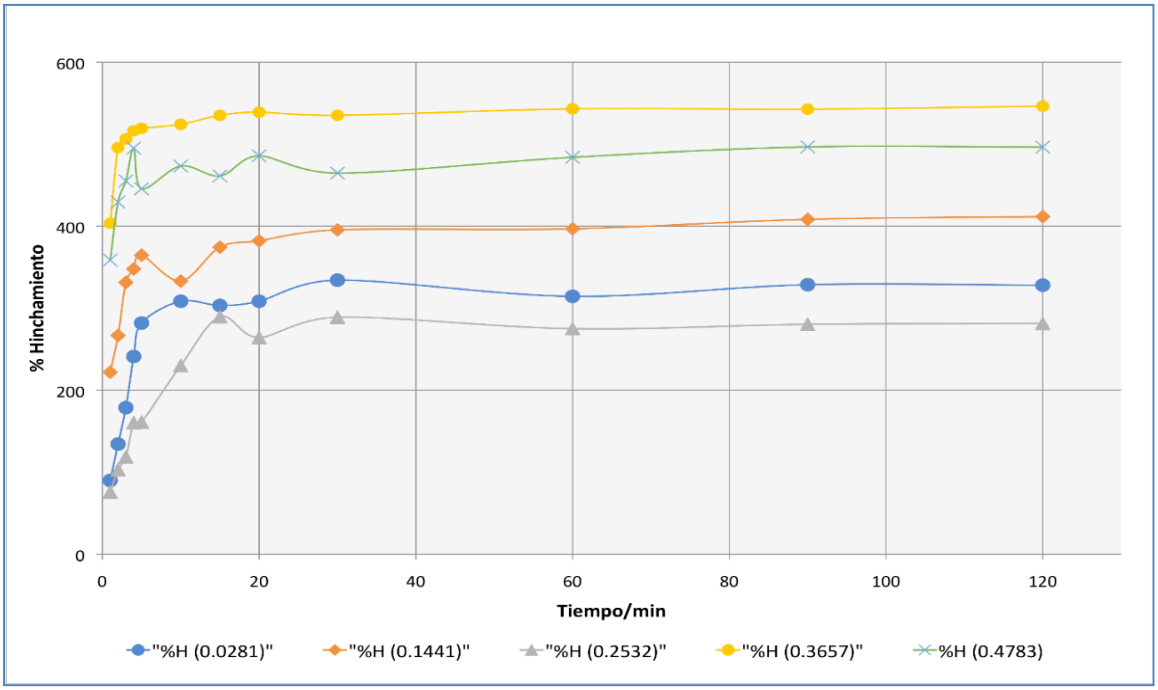
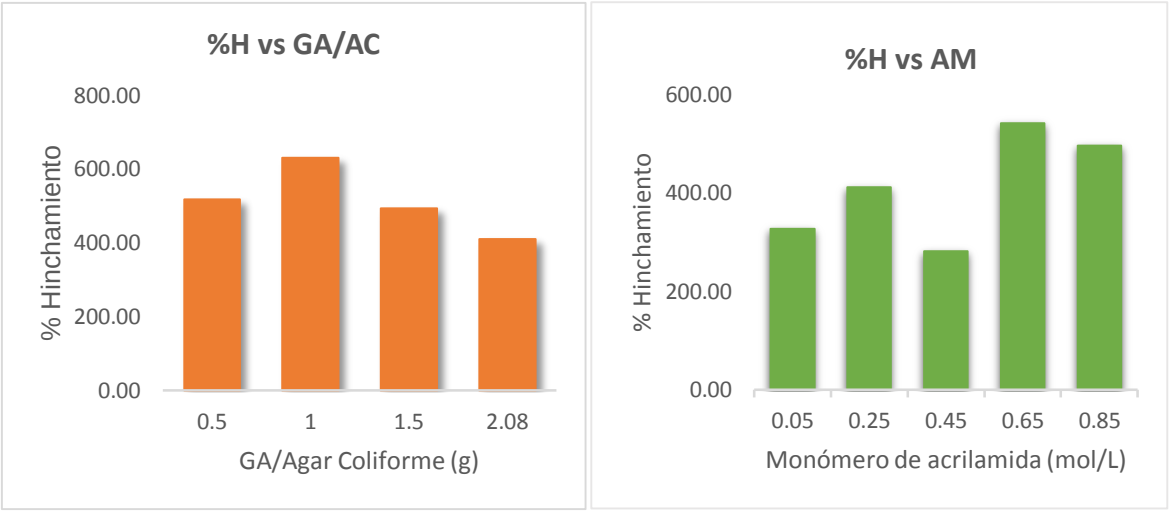


Figura 18. *Curva del porcentaje de hinchamiento en agua desionizada de los hidrogeles HG4 (Grupo B). Diferentes concentraciones del monómero AM.*

En la figura 19, se resumen los resultados obtenidos de %H vs el contenido en g de GA/AC (figura 19 A) y la concentración en mol/L de AM (Figura 19 B) ambos a un tiempo de absorción de 120 min. En la Figura 19 A, se nota el máximo incremento en el %H cuando la masa de AG/AC corresponde a 1.0 g. En la figura 19 B se indica se indica que el mayor %H se manifiesta cuando la concentración de monómero AM fue de 0.65 mol/L con un %H del orden de 542.80. En general el aumento en la capacidad de retención de agua para estos productos muestra resultados superiores en aquellos del grupo A (GA-PAM/AC) donde se ha variado el contenido polisacárido en la estructura polimérica.



A **B**

Figura 19. A) *Porcentaje de hinchamiento versus contenido GA/Agar coliforme del grupo A.* ***B)*** *Porcentaje de hinchamiento versus concentración de monómero del grupo B, a un tiempo de 120 min.*

La siguiente tabla (tabla 8) se resumen los datos experimentales óptimos de los hidrogeles de composición GA-PAM/AN (HG1 Grupo A y HG2 Grupo B), así como los hidrogeles de constitución GA-PAM/AC (HG3 Grupo A y HG4 Grupo B), con los mejores % de hidratación, tanto del grupo A como del grupo B.

Dentro del grupo A, los hidrogeles de composición GA-PAM/AN, en donde la concentración de GA/AN como cadena principal fue de 1.25 g concentración y designado como HG1-1.25 mostró el mayor porcentaje de hinchamiento del orden de 559.21%, mientras que en el grupo B, el hidrogel denotado como HG2-0.0281 y con una concentración de monómero de acrilamida 0.0281 mol/L, se obtuvo un % de hinchamiento de 504.10.

Para el grupo A, los hidrogeles de disposición GA-PAM/AC, los porcentajes de hinchamiento más favorables, fue cuando la cantidad o matriz polimérica de GA/AC fue de 1.00 g y la concentración de acrilamida fue 0.01441 mol/L, dando un porcentaje de hinchamiento de 631.69 %. Para los HG4 (Grupo B). En el caso del hidrogel HG4-0.36 (Grupo B), el mayor porcentaje de hinchamiento fue de 542.80.

Tabla 8. *Parámetros de reacción óptimos de hidrogeles de composición GA-PAM/AN y GA-PAM/AC de los grupos A y B.*

Hidrogel	GA/AN (mol/L)	Conc. de AM (mol/L)	Promedio del % de Hinchamiento
(GRUPO A) HG1-1.25	1.25	0.1441	559.21
(GRPO B) HG2-0.028	0.50	0.0281	504.10
(GRUPO A) HG3-1.00	1.00	0.1441	631.69
(GRUPO B) HG4-0.36	2.00	0.3657	542.80

Los polímeros sintéticos permiten controlar muchos aspectos en la síntesis de nuevos materiales y su aplicación en la formación de hidrogeles poliméricos aumento en gran medida su capacidad de controlar la formación de su estructura reticular, del mismo modo su capacidad de hidratación mejoro con el paso de los años pasando de 20 a 400 veces su peso en agua para polímeros hidrofílicos a base de poliacrilamida, por lo cual, el tiempo de hidratación es alto en comparación con los polímeros naturales. Se ha informado que polímeros naturales como el ácido algínico o alginato muestran una capacidad de absorción de hasta 300 veces su propio peso en agua y algunos como el almidón se hidratan totalmente en agua en muy poco tiempo, mientras que aquellos de origen sintético como polivinil alcohol y la poliacrilamida pueden llegar a tardar más de seis horas para hidratarse en su totalidad (64,41,6).

Para el caso de hidrogeles obtenidos por entrecruzamiento de goma arábiga diversos estudios han resaltado la viabilidad en el uso de dicha goma para la obtención de matrices polimérica reticuladas, ya sea por modificaciones químicas o interacciones físicas y se ha descrito su gran afinidad al agua y la capacidad de absorción que estos materiales presentan con la característica biocompatibilidad que ha tomado gran relevancia en la ciencia actual (65,66).

Las macromoléculas de origen natural son asimiladas de manera sencilla en los entornos biológicos puesto que las fuentes de obtención son bien conocidas por los microorganismos que pueden encargarse de su descomposición para generar productos más sencillos y de fácil asimilación.

De acuerdo con la tabla 8, es muy claro que los hidrogeles de composición HG1-1.25 y HG3-1.00 tienen gran afinidad y capacidad de absorción al agua debido probablemente al carácter hidrofílico por el número de sitios activos y el grado de entrecruzamiento que se presenta en la estructura reticular en las cadenas poliméricas GA/AN.

Bocourt y col. (67) han demostrado que para sistemas entrecruzados de quitosano y poliacrilamida puede observarse un aumento de la velocidad inicial de hinchamiento al aumentar el carácter hidrofílico de los hidrogeles y en contraste, el

tiempo necesario para alcanzar el máximo hinchamiento se hace mayor a medida que aumenta el contenido de acrilamida.

De acuerdo con la literatura, al aumentar la concentración de monómero de AM, aumenta el carácter hidrofílico del hidrogel a medida que se vuelven accesibles más moléculas de monómero para los sitios de propagación de la cadena en el esqueleto polisacárido y se mejora el porcentaje de hinchamiento (1, 68, 69). La disminución del porcentaje de hinchamiento a una mayor concentración de AM se puede deber al aumento de la viscosidad del medio de reacción y al movimiento impedido de los radicales libres (70), como se puede observar en el caso de los hidrogeles superabsorbentes como HG2-0.028 (GRUPO B) y HG4-0.36 (GRUPO B) (ver tabla 8). A mayor número de sitios activos en las cadenas poliméricas, mayor es el grado de entrecruzamiento que se presenta en la estructura reticular, lo que se traduce en una mayor resistencia de las cadenas a la expansión perdiendo elasticidad, adicional a esto el agua embebida es retenida por menos tiempo debido a una estructura más rígida de hidrogel (figura 12 inciso b).

Por lo tanto, la penetración del agua depende de la rapidez de relajación de las cadenas de polímero (expansión y contracción), que está condicionada por distintos factores como el tipo de polímero (grupos funcionales, carga iónica, carácter hidrófilo), el secado previo del hidrogel, el tipo de entrecruzante, la densidad de entrecruzamiento y el tamaño de poro (71).

7.4 Caracterización

7.4.1 Determinación del peso molecular de goma arábiga de acacia

La viscosimetría de soluciones poliméricas muy diluidas está relacionada con la medida de la habilidad intrínseca de un polímero para incrementar la viscosidad de un disolvente a una temperatura determinada y es útil para obtener información relacionada con el tamaño y la forma de las moléculas de polímero en solución y las interacciones polímero-disolvente.

Por lo tanto, es necesario definir los siguientes términos:

Viscosidad relativa (3)

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_0}$$

Donde η es la viscosidad de la solución polimérica y η_0 es la viscosidad del disolvente puro.

Viscosidad específica (4)

$$\eta_{sp} = \eta_r - 1 = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0}$$

Viscosidad reducida (5)

$$\eta_{red} = \frac{\eta_{sp}}{C}$$

Donde C es la concentración del polímero y se refiere a una medida de la habilidad de polímero para aumentar la viscosidad de un disolvente.

Y la viscosidad inherente (6)

$$\eta_{inh} = \frac{ln\ \eta_r}{C}$$

En soluciones muy diluidas las cadenas poliméricas pueden ser capaces de interacciones intermoleculares. Por lo que, las dos contribuciones a la viscosidad reducida son el movimiento de las moléculas aisladas en el disolvente y la interacción entre moléculas del polímero y la solución. Para eliminar las interacciones es necesario extrapolar a concentración cero para obtener las viscosidades inherente y reducida comúnmente conocidas como viscosidad intrínseca (24, 72).

Viscosidad intrínseca (7)

$$[\eta]_{intr} = (\eta_{red})_{c \to 0} (\eta_{inh})_{c \to 0}$$

La viscosidad intrínseca es una medida del tamaño de una molécula en solución. Es una medida de la habilidad de una molécula de polímero para aumentar la viscosidad de un disolvente en ausencia de interacciones intermoleculares.

De acuerdo con lo anterior, fueron preparadas soluciones diluidas acuosas a partir de concentraciones de 1, 3 y 5 g/dL, de goma arábiga de Acacia. Se determinaron las viscosidades tanto inherente como reducida de soluciones acuosas de goma arábiga de las diferentes concentraciones, las cuales se presentan en la tabla 9. La viscosidad intrínseca [⍰], se determinó mediante la extrapolación a cero a partir de las viscosidades determinadas experimentalmente.

Tabla 9. *Promedios de viscosidad reducida e inherente para soluciones de goma arábiga de acacia*

Concentración (g/dL)	**1**	**3**	**5**
η_{red} **promedio**	0.2282	0.2602	0.3181
η_{inh} **promedio**	0.2055	0.1923	0.1904

En la figura 20, se muestra la gráfica típica para los datos de la viscosidad inherente y reducida en función de la concentración de goma arábiga para evaluar la viscosidad intrínseca para una solución acuosa de GA a 25 °C. Se realizo una extrapolación para obtener el valor de la viscosidad intrínseca [⍰], obteniendo a partir de los datos experimentales, un valor igual a 0.2122 dL/g = 21.22 cm^3/g.

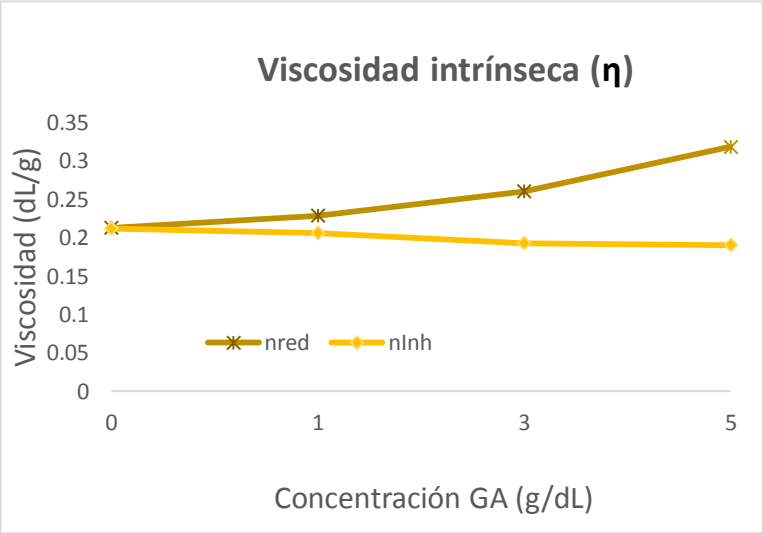


Figura 20. *Evaluación de la viscosidad intrínseca a partir de la viscosidad reducida e inherente de soluciones acuosas de GA.*

El peso molecular viscosimétrico se puede calcular utilizando la ecuación de Mark-Houwink Sakurada (24), en donde M$\tilde{v}$ es el peso molecular viscosimétrico promedio, K y a son constantes para un sistema dado polímero/disolvente/temperatura.

Ecuación Mark Houwink Sakurada (8)

$$[\eta] = k(M\tilde{v})^{a}$$

La tabla 10 muestra las constantes k y a reportadas para la ecuación de Mark Houwink Sakurada y que contemplan la temperatura y viscosidad intrínseca determinadas experimentalmente mediante viscosimetría de polímeros para goma arábiga de acacia.

Tabla 10. *Parámetros de Mark-Houwink-Sakurada en función de la temperatura y datos de viscosidad intrínseca para goma arábiga de acacia (24)*

□(□)	[□](□□^□/□)	□(□□^□/□)	□
293.36	22.20	0.01301	0.5496
298.16	19.81	0.01311	0.5406
303.46	17.71	0.01316	0.5321
308.16	16.77	0.01321	0.5278
309.86	15.90	0.01326	0.5235
313.16	14.98	0.01331	0.5189
3218.16	14.01	0.01338	0.5135
322.96	13.12	0.01342	0.5085

Para la determinación del peso molecular viscosimétrico de la goma arábiga se usaron los valores de K = 0.01311 cm^3/g y a = 0.5406, los cuales se encuentran reportados para la solución de goma arábiga a 25°C de acuerdo con (24).

Por lo anterior el peso molecular promedio determinado para la goma arábiga fue M$\tilde{v}$ = 828.4522 Kg/mol, cuyo valor se encuentra dentro del rango que va de 250 a 1 000 Kg/mol reportados (24, 59). La Tabla 11, resume los datos obtenidos y utilizados para la determinación del peso molecular viscosimétrico promedio de GA.

Tabla 11. *Peso molecular promedio de goma arábiga y datos para su determinación*

[□] (cm^3/g)	**K (cm^3/g)**	**a**	**M$\tilde{v}$ (Kg/mol)**
21.22	0.01311	0.5406	828.4522

7.4.2 Caracterización por espectroscopía IR

La espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) es una técnica útil para identificar la presencia de los grupos funcionales característicos y verificar la estructura química de una sustancia. Se basa en el principio de que los componentes básicos de una sustancia generalmente pueden excitarse y absorber la luz infrarroja a frecuencias de los tipos de enlaces químicos. El espectro de absorción IR representa una huella digital de una sustancia en estudio. Esta técnica se usa ampliamente para investigar la disposición estructural en hidrogeles en comparación con los materiales de partida.

Los grupos funcionales típicos de goma arábiga, agar, monómero de acrilamida como materiales de partida e hidrogel sintetizado fueron obtenidos por medio de sus espectros IR utilizando un espectrofotómetro infrarrojo por transformadas de Fourier (FTIR) Perkin Elmer, modelo Spectrum One, y fueron analizados.

7.4.2.1 Goma Arábiga de Acacia, Agar-Agar, monómero acrilamida

En la figura 21, se muestra el espectro IR de la goma GA, en donde se observa una banda ancha de absorción característica alrededor de 3340 cm^{-1} que representa la presencia del grupo O–H en la estructura del polisacárido de la columna vertebral. La banda a 2890 cm^{-1} indican la presencia de azúcares, galactosa, arabinosa y ramnosa, también la presencia de estiramiento C–H de alcanos y estiramiento de C–H de aldehídos. Los polímeros también mostraron la banda característica de estiramiento C=C, alrededor de 1600 cm^{-1}.

Los ácidos glucurónicos tienen vibraciones específicas como la banda de 1380 cm^{-1} debido al estiramiento simétrico C=O y la flexión -OH, respectivamente.

La banda débil a 1280 cm^{-1} representan flexión de alcano CH_3, estiramiento alcohol C–O, estiramiento C–O–C, estiramiento ácido carboxílico C-O y alquilo contenido en la cadena principal del azúcar mostrando una flexión de alcano y estiramiento del grupo del alcohol. Una banda intensa a 1030 cm^{-1} está asociada con la flexión C–H del polisacárido (huella digital de carbohidratos). Todo lo anterior está de acuerdo con lo reportado por Rabee y col. (73), por lo cual podemos sugerir que se trata de la goma arábiga de acacia ya que es la goma más ampliamente utilizada y es obtenida a partir del árbol de *Acacia senegal var. senegal*. El amplio uso de la GA es debido a su alta solubilidad y baja viscosidad comparada con otros polisacáridos, es un buen emulsificante y no es tóxica.

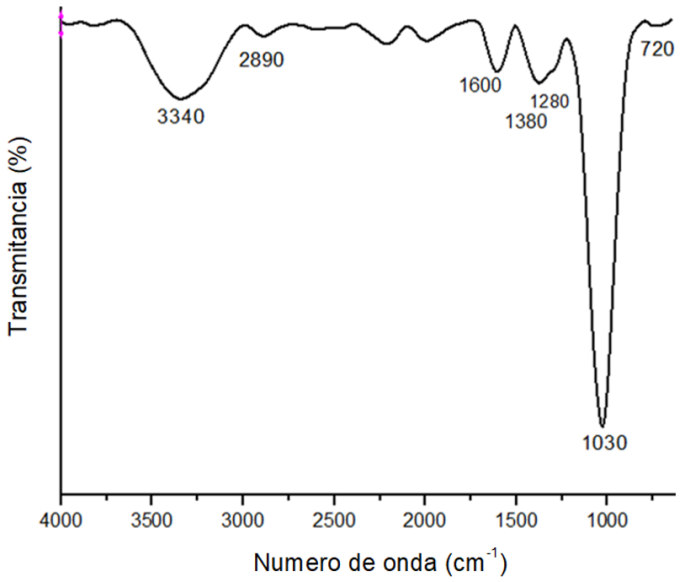


Figura 21. *Espectro IR de la Goma Arábiga de Acacia (GA).*

Los picos de absorción para el polisacárido agar fueron observado a 3300 cm^{-1} (–OH estiramiento del hidroxilo grupo), 1060 cm^{-1} (enlace glucosídico) mientras que la banda vibratoria que se presentó a 1600 cm^{-1} presentó vibraciones para CO y 760 cm^{-1} para el balanceo de CH_3 (Figura 22) (23).

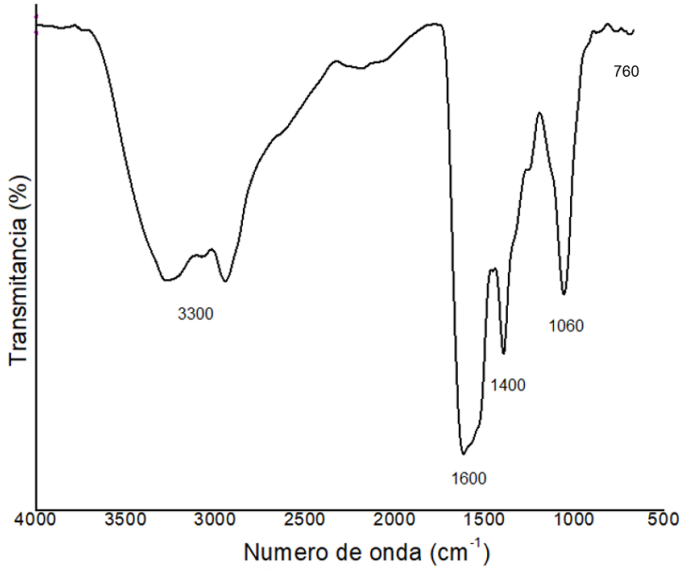


Figura 22. *Espectro IR de Agar.*

En el espectro IR de la Figura 23 aparecen las bandas características de los grupos funcionales del monómero acrilamida. La primera señal aparece como una banda con dos picos que corresponden a la amina primaria para NH_2 asimétrico a 3336 y NH_2 simétrico a 3180 cm^{-1}. La segunda señal corresponde a una banda fuerte con un pico a 1665 cm^{-1}, que es característica al estiramiento del grupo carbonilo C=O de la amida primaria. Dos bandas muy fuertes a 1613 y 1420 cm^{-1}, se asigna a las deformaciones de enlaces NH_2 y $=CH_2$, respectivamente. Las bandas que aparecen a 1355 cm^{-1} se refiere al enlace C-N, banda de intensidad fuerte a 1276 cm^{-1}, se asocia a la vibración molecular de balanceo =CH, así como la banda de intensidad media a 1136 cm^{-1} se asocia a la vibración molecular de balanceo NH_2 y la banda 1050 cm^{-1} se refiere a la vibración molecular de balanceo $=CH_2$, pero la banda observada a 958 cm^{-1} corresponde a las vibraciones de aleteo $=CH_2$, mientras que la banda de intensidad media que aparece a 840 cm^{-1} está asignada al enlace C–C y la banda a 669 cm^{-1} se asocia a la vibración de torsión NH_2 (74).

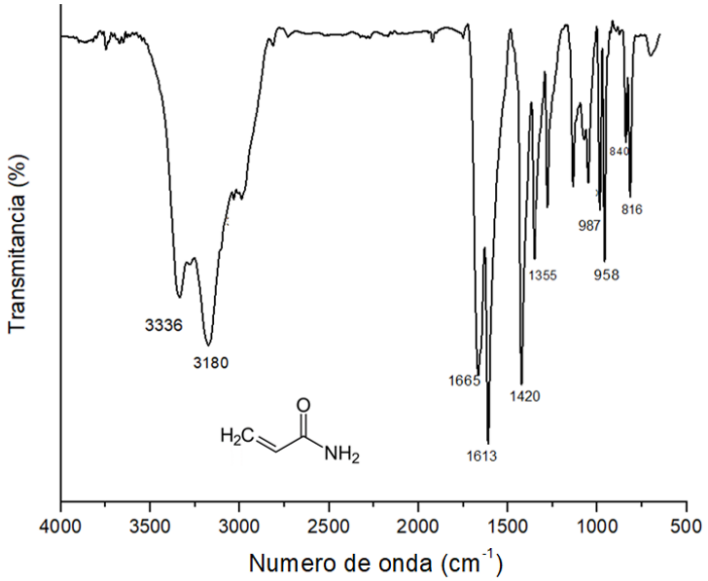


Figura 23. *Espectro IR del monómero de acrilamida (AM).*

7.4.2.2 Hidrogeles GA-PAM/AN

Una evidencia del entrecruzamiento en los hidrogeles GA-PAM/AN y GA-PAM/AC se confirmó de acuerdo con los espectros FTIR registrados (Figura 24). Los picos de absorción anchos característicos del agar y la goma arábiga se observaron alrededor de 3330 cm^{-1}, lo que especifica la presencia de -OH correspondiente a

las vibraciones de tensión en la estructura de la columna vertebral del sacárido. Para 1650 cm^{-1} el estiramiento simétrico del enlace carbonilo C=O (poli-AM). El pico en 1030 cm^{-1} están asociados con la flexión C-H de los alquenos del polisacárido, enlace glucosídico y el pico en 750 cm^{-1} para el balanceo de CH_3 (29). La formación de hidrogel reticulado se confirma aún más a partir del pico de absorción en 1400 cm^{-1}, lo que representa la flexión en el plano del grupo amida -NH a partir del entrecruzante (MBA) (27). Las observaciones de bandas adicionales y cambios en la intensidad de las bandas verificaron el injerto de AM sobre agar y goma arábiga.

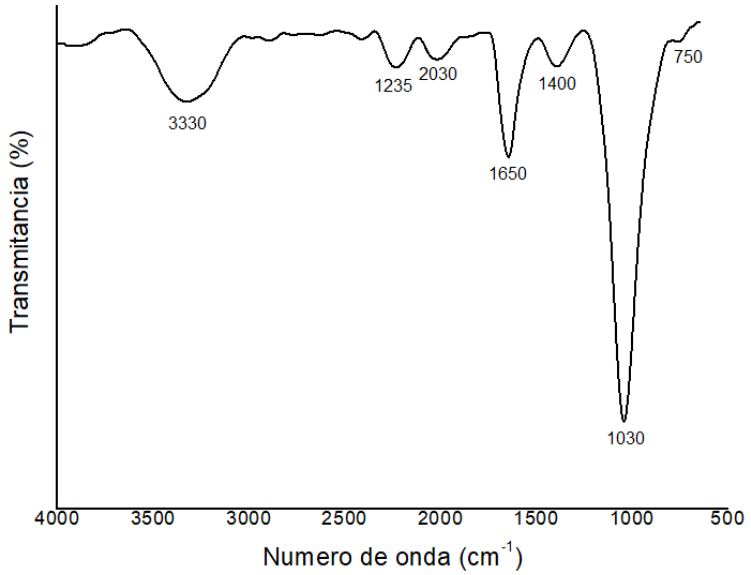


Figura 24. *Espectro IR de hidrogel (GA)/Agar (A)/Poliacrilamida (PAM).*

8. Conclusión

Para el presente estudio se sintetizaron hidrogeles superabsorbentes biopoliméricos entrecruzados (GA-PAM/AN y GA-PAM/AC) con diferentes proporciones de alimentación de goma arábiga, agar nutritivo y/o coliforme, monómero de acrilamida a través un método asistido por microondas.

La capacidad de hidratación o % de hinchamiento, así como los estudios FTIR confirmaron la obtención de hidrogeles superabsorbentes entrecruzados.

Los hidrogeles superabsorbentes con mayor capacidad de hidratación fueron los de composición GA-PAM/AN asignado como HG1-1.25 (Grupo A) y el GA-PAM/AC

etiquetado como HG3-1.00 (Grupo A), ambos con masas similares de GA/AN y GA/AC en la cadena principal, mostrando su porcentaje máximo de hidratación de 559,21% y de 631.59% a 120 min, respectivamente.

En el caso de los estudios FTIR, los espectros de absorción mostraron cambios en la intensidad de los picos y la aparición de nuevos picos que prueban el entrecruzamiento o reticulación sobre las cadenas poliméricas naturales de agar, goma arábiga de acacia y poliacrilamida en los hidrogeles obtenidos.

Finalmente, se obtuvo la masa molecular promedio por viscosimetría de la goma arábiga de acacia dando un resultado de $M\tilde{v}$ = 828.4522 Kg/mol, cuyo valor se encuentra en el intervalo para masas de goma Arábiga de Acacia que van de 250 a 1 000 Kg/mol.

9. Bibliografía

1. Ramírez A, Benítez JL, Rojas de Astudillo L y Rojas de Gáscue B. Materiales polímeros de tipo hidrogeles: revisión sobre su caracterización mediante ftir, dsc, meb y met Rev. LatinAm. Metal. Mater. [Internet] 2016 diciembre; 36(2), 108-130. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522016000200002
2. H. Gulrez SK, Al-Assaf S, O Phillips G. Hydrogels: methods of preparation, characterisation, and applications. En: Carpi A, editor. Progress in molecular and environmental bioengineering - from analysis and modeling to technology applications [Internet]. InTech; 2011]. Disponible en: http://www.intechopen.com/books/progress-in-molecular-and-environmental-bioengineering-from-analysis-and-modeling-to-technology-applications/hydrogels-methods-of-preparation-characterisation-and-applications
3. 3. Soto D y Haydée O. Métodos para preparar hidrogeles químicos y físicos basados en almidón: una revisión. Rev. LatinAm. Metal. Mater [Internet] 32(2), 154-175. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522012000200002
4. Barón A, Barrera IX, Boada LF y Rodríguez G. Evaluación de hidrogeles para aplicaciones agroforestales. Ingeniería e Investigación [Internet]. 2007; 27(3): 35-44. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64327305
5. Majcher MJ, Hoare T. Applications of Hydrogels. En: Jafar Mazumder MA, Sheardown H, Al-Ahmed A, editores. Functional Biopolymers [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2018. p. 1–39. (Polymers and

Polymeric Composites: A Reference Series). Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-319-92066-5_17-1
6. Bocourt M, Cruz J, Bada N y Peniche C. Síntesis y caracterización de hidrogeles biocompatibles interpenetrados de quitosana y poliacrilamida. Revista CENIC. Ciencias Químicas [Internet]. 2008; 39(2): 70-74. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181615046002
7. Ma J, Li X, Bao Y. Advances in cellulose-based superabsorbent hydrogels. RSC Adv. [Internet] 2015; 5(73): 59745–57. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/279069799_Advances_in_Cellulose-based_Superabsorbent_Hydrogels
8. Nelson DL. Cox MM. Lenhinger. Principios de bioquímica. 6ª. Edición. Barcelona: Omega; 2015. 1154 p.
9. Canevarolo Junior SV. Ciência dos polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. São Paulo (SP): Artliber; 2006.
10. Aradilla Zapata D. Electrogeneración y estudio de propiedades físicas de polímeros conductores obtenidos a partir de oligómeros de poli heterociclos. [Proyecto / Trabajo Fin de Carrera]. UPC, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Barcelona, Departamento de Ingeniería Química; 2008.
11. Bucknall DG y L Anderson H. Chemistry. Polymers get organized. Science. [Internet] 2003 diciembre 12; 302(5652): 1904–5. Disponible en: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14671284/
12. Billmeyer FW. Ciencia de los polímeros. Barcelona: Reverté; 1975.
13. Magdy Elnashar (Editor). Biopolymers. 2010
14. Bhat SV, editor. Biomaterials [Internet]. Springer Netherlands; [Internet] 2002. Disponible en: https://www.springer.com/gp/book/9789401038508
15. Labeaga Viteri A. Polímeros biodegradables. Importancia y potenciales aplicaciones. [Tesis Máster]. UNED, Facultad de Ciencias, Departamento de Química Inorgánica e Ingeniería Química; 2018 mzo. 15.
16. Trejo A, Chavarría A. Química de los Carbohidratos. En: Martínez F. Pardo JP, Riveros H, editores. Bioquímica de Laguna y Piña. El manual moderno; 2013. p. 201–14.
17. Spotti MJ. Estudio de propiedades y estructura de geles mixtos proteína-polisacárido. Influencia de la reacción de glicosilación. [Tesis Doctoral]. Universidad Nacional del Litoral. Facultad de Ingeniería Química, Instituto de Tecnología de Alimentos; 2013.
18. Trejo MA, Lira, AA. Fibra para el futuro: propiedades y beneficios. En: Ramírez ME. Propiedades funcionales de hoy [Internet]. 1a ed. OmniaScience; 2017. 1-34. Disponible en: https://www.omniascience.com/books/index.php/monographs/catalog/book/98
19. Mayorga Mora YA. Síntesis de hidrogeles poliméricos con inclusiones de nanopartículas magnéticas por el método de microemulsión inversa. [Tesis de Grado]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Ciencias, Escuela de Física y Matemática; 2019 jun. 11.
20. Jimeno LG, Obrecht M, Jareño P. Estudio de la estabilidad dimensional de los hidrocoloides irreversibles. ESORIB [Internet]. 2009 diciembre 11; 10(6): 268-274. Disponible en: http://www.esorib.com/articulos/hidrocoloides.pdf

21. Peña EJ, Peñaranda ML, Ospina N. Algas como indicadores de contaminación. Universidad del Valle - Programa Editorial; 2005.
22. Prado HJ. Estudio de los polisacáridos del alga roja Polysiphonia nigrescens, cationización de agarosa, formación de complejos interpolielectrolito. Aplicaciones en floculación de coloides y liberación controlada de drogas. [Tesis Doctoral]. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales; 2010.
23. Hasija V, Sharma K, Kumar V, Sharma S, Sharma V. Green synthesis of agar/gum arabic based superabsorbent as an alternative for irrigation in agriculture. Vacuum [Internet]. 2018; 157: 458-64. Disponible en: https://www.semanticscholar.org/paper/Green-synthesis-of-agar%2FGum-Arabic-based-as-an-for-Hasija-Sharma/9cf8d5a3a136c131c34661d35c37eb6e693f0c76
24. Masuelli MA. Hydrodynamic properties of whole arabic gum. Am. J. Food. Tech [Internet]. 2013 agosto; 1(3): 60-66 Disponible en: https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/5699
25. Dauqan E, Abdullah A. Utilization of Gum Arabic for Industries and Human Health. Am J Appl Sci [Internet]. 2013 septiembre 6; 10(10): 1270–9. Disponible en: https://doi.org/10.3844/ajassp.2013.1270.1279
26. Atgié M. Composition and structure of gum arabic in solution and at oil-water interfaces. [Tesis Doctoral]. Universidad de Toulouse. Instituto Politécnico Nacional de Toulouse (INP Toulouse); 2018 mzo. 13.
27. Al-Mosawi AJ. Acacia gum therapeutic potential: Possible role in the management of uremia - a new potential medicine. Therapy (Clinical practice). Acacia gum (gum arabic). 2006 marzo; 3(2): 311–2.
28. Pasquel A. Gomas: Una aproximación a la industria de alimentos. RAIA [Internet]. 2001; 1(1): 1-8.
29. Sibaja Hernández, R. Propiedades fisicoquímicas y funcionales de las gomas de Acacia cochliacantha y Acacia farnesiana. [Tesis Doctoral]. IPN, Centro de desarrollo de productos bióticos; 2015 abr.
30. Clarke AE, Anderson RL, Stone BA. Form and function of arabinogalactans and arabinogalactan-proteins. Phytochemistry [Internet]. 2012; 18(4): 521–40.
31. Yadav H, Karthikeyan C. 1 - Natural polysaccharides: Structural features and properties. En: Maiti S, Jana S, (editores). Polysaccharide carriers for drug delivery [Internet]. Woodhead Publishing; 2019. p. 1–17. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081025536000015
32. Wang A, Wang W. Gum-g-copolymers: Synthesis, properties, and applications. En Kalia S y Sabaa M.W. (editores.), Polysaccharide based graft copolymers, Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2013. p. 149–203.
33. Williams PA, O Phillips G. Gum arabic. Handbook of hydrocolloids (2ª edición) [Internet]. Woodhead Publishing; 2009. p. 252–73. (Woodhead publishing series in food science, technology, and nutrition). Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845694142500114
34. Buffo RA, Reineccius GA, Oehlert GW. Factors affecting the emulsifying and rheological properties of gum acacia in beverage emulsions. Food

Hydrocolloids. 2001;15(1):53-66. Disponible en: https://doi.org/10.1016/S0268-005X(00)00050-3
35. Gum Arabic. Structure, Properties, Application and Economics. [Internet]. Academic Press; 2018. (Fadlelmoula AA. Dietary gum arabic as animal feed additive.). Disponible en: https://www.sciencedirect.com/book/9780128120026/gum-arabic?via=ihub=
36. Shao-Ping N, Cathy W, Steve WC y Qi W. The core carbohydrate structure of Acacia Seyal var. Seyal (Gum Arabic) [Internet]. 2013; 32(2): 221–227. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/257102930_The_core_carbohydrate_structure_of_Acacia_seyal_var_seyal_Gum_arabic
37. Guerrero RF, Torres D, Anaya D, Lugo V. Hidrogeles biopoliméricos potencialmente aplicables en agricultura. Revista Iberoamericana de Polímeros [Internet]. 2011; 12(2): 76-87. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3694912
38. Mazumder MAJ, Sheardown H, Al-Ahmed A, (editores). Functional biopolymers [Internet]. Springer International Publishing; 2019. (Polymers and polymeric composites: A reference series). Disponible en: https://www.springer.com/gp/book/9783319959894
39. Laya J, Marfisi S, López G, Pastrana J, Sousa MG de, Peña G, y col. Hidrogeles semi-interpenetrados de poliacrilamida/poli (vinil alcohol): Estudio de su estructura, capacidad de absorción y propiedades mecánicas. Av En Quím [Internet]. 2017 diciembre 30; 12(2–3): 37–40. Disponible en: file:///C:/Users/esme_/AppData/Local/Temp/10118-30231-1-SM.pdf
40. Peñaranda A, López ME. Hidrogeles. Potenciales biomateriales para la liberación controlada de medicamentos. Rev Ing Bioméd [Internet]. 2009; 3(5): 83–94. Disponible en: http://www.scielo.org.co/pdf/rinbi/v3n5/v3n5a13.pdf
41. Hernández Gonzáles, O. Hidrogeles mejoradores de cultivos agrícolas. [Trabajo de especialización]. Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo, Coahuila; 2007 ag.
42. Kalhapure A, Kumar R, Singh VP, Pandey DS. Hydrogels: A boon for increasing agricultural productivity in water-stressed environment. Curr Sci. 2016; 111(11): 1773–9. Disponible en: http://www.jstor.org/stable/24911537
43. Torres G, Torres CD, Escobar H y González L. Adición de hidrogeles al suelo para germinación y cultivo de *Lactuca sativa* variedad Green Forest. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano [Internet]. 2009; 2(5). Disponible en: https://www.utadeo.edu.co/files/collections/documents/field_attached_file/adicion_de_hidrogeles_al_suelo_para_germinacion.pdf
44. Ramírez Bernabé, MJ. Efecto del uso de una poliacrilamida sobre la sobrevivencia al trasplante y rendimiento de lechugas (Lactuca sativa L.) en la XI Región de Chile. [Tesis de Grado]. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela de Agronomía; 2004.
45. Moreno IM, Rubio C, Gutiérrez AJ, Cameán AM, Hardisson A. La acrilamida, contaminante químico de procesado: Revisión. Revista de Toxicología

[Internet]. 2007; 24(1): 1-9. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91924101
46. Majcher MJ, Hoare T. Hydrogel synthesis and design. En: Jafar Mazumder MA, Sheardown H, Al-Ahmed A, editores. Functional biopolymers [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2019. p. 239–78. (Polymers and polymeric composites: A reference series). Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95990-0_9
47. Menéndez, J.A., Moreno, A.H. (Eds.). (2017). Aplicaciones industriales del calentamiento con energía microondas. Latacunga, Ecuador: Editorial Universidad técnica de cotopaxi, Primera edición, pp 315.
48. Hoogenboom R, Schubert US. Microwave-assisted polymer synthesis: Recent developments in a rapidly expanding field of research. Macromol rapid commun. 2007; 28(4): 368–86. Disponible en: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/marc.200600749
49. Chemat F, Esveld E. Microwave super-heated boiling of organic liquids: Origin, effect and application. Chem Eng Technol [Internet]. 2001; 24(7): 735–44. Disponible en: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/1521-4125%28200107%2924%3A7%3C735%3A%3AAID-CEAT735%3E3.0.CO%3B2-H
50. Giachi G, Frediani M, Rosi L, Frediani P. Synthesis and processing of biodegradable and bio-based polymers by microwave irradiation. 2011; Disponible en: https://core.ac.uk/display/301562516
51. Jovanovic J, Adnadjevic B. Influence of microwave heating on the kinetic of acrylic acid polymerization and crosslinking. J Appl Polym Sci [Internet]. 2010; 116(1): 55–63. Disponible en: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.31230
52. Pandey M, Mohamad N, Amin MCIM. Bacterial cellulose/acrylamide pH-sensitive smart hydrogel: Development, characterization, and toxicity studies in ICR mice model. Mol Pharm [Internet]. 2014; 11(10): 3596–608. Disponible en: https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/mp500337r
53. Pandey M, Mohd Amin MCI, Ahmad N, Mohamad N, Muda S. Structure and characteristics of bacterial cellulose-based hydrogels prepared from cryotropic gelation and irradiation method. Polym-Plast Technol Eng [Internet]. 2013; 52: 1510–18. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/254256202_Structure_and_Characteristics_of_Bacterial_Cellulose_Based_Hydrogels_Prepared_From_Cryotropic_Gelation_and_Irradiation_Method
54. Feng H, Li J, Wang L. Preparation of biodegradable flax shive cellulose-based superabsorbent polymer under microwave radiation. BioResources. 2010;5.
55. ZhengLong W, ZhouYi X, HeLing R, YuanYuan H, HuaXi L, HanGuo X, y col. Graft copolymerization of methyl methacrylate onto bamboo cellulose under microwave irradiation. Carbohydr Polym. 2011; 83(1): 264–9.
56. Kader D, Molina E, de Pinto L, Negrón G y Lachmann M. Nota técnica: Caracterización analítica de cinco gomas *Mimosaceae* venezolanas y su posible aplicación industrial. Rev Fac Agron. 2002; 19(3): 230-39. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182002000300007&lng=es&nrm=iso

57. Marín de la Puente J. Efectos del pH sobre la viscosidad intrínseca de dispersantes poliméricos. [Tesis de Maestría] Universidad Politécnica de Madrid. 2021 sep.
58. Barraza G, de la Rosa L, Martínez A, Castillo H, Cotte M, Alvarez E. La microespectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIRM) en el estudio de sistemas biológicos. Rev. latinoam. quím. 2013; 41(3), 125-148. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-59432013000300001&lng=es.
59. Tonelli F y Masuelli M.A. Acacia caven Gum Studies of Hydrodynamic Parameters. Evolution Poly Tech J 2019, 2(1): 180007.
60. Rodríguez Félix D.E. Síntesis y caracterización de hidrogeles de redes semi-interpenetradas basadas en poli(acrilamida) y poli (ácido-Y-glutámico. Saltillo, Coah. 2006 jun.
61. González N, El-Halah A, Contreras J.M, Rojas B. Estudio de la capacidad de absorción en hidrogeles semi-interpenetrados de poliacrilamida/poli(hidroxibutirato-co-hidroxivalirato) Rev. Colomb. Quim. 2018; 47(3), 5-12. Disponible en:
Doi: http://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v47n3.69280
62. Katime I, Katime O. y Katime D. Materiales inteligentes: hidrogeles macromoleculares. Algunas aplicaciones biomédicas. Anales de la Real Sociedad Española de Química. 2005, Núm. 4: 35-50.
63. Katime I, Katime O y Katime D. *Los materiales inteligentes de este milenio: Los hidrogeles macromoleculares. Síntesis, propiedades y aplicaciones*. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco, Bilbao España. 2004
64. Castro L. Polímeros biodegradables y química. [Tesis de Grado]. Universidad de Sevilla; 2016 jul.
65. Wang Y, Tong L, Zheng Y, Pang S, Sha J, Li L y Zhao G. Hydrogels with self-healing ability, excellent mechanical properties and biocompatibility prepared from oxidized gum Arabic. European Polymer Journal 117 (2019) 363–371
66. Khan M, Shah L, Rehman T, Khan A, Iqbal A, Ullah M y Alam S. Synthesis of physically cross-linked gum Arabic-based polymer hydrogels with enhanced mechanical, load bearing and shape memory behavior. Iranian Polymer Journal 2020.
67. Bocourt M, Cruz J, Bada N y Peniche C. Síntesis y caracterización de hidrogeles biocompatibles interpenetrados de quitosana y poliacrilamida. Rev. CENIC. 2008;39(2), 70-74.
68. Medina F, Lara. Diseño y aplicación de hidrogeles basados en polisacáridos para ingeniería de tejidos. [Tesis Doctoral]. Buenos Aires; 2019. Disponible en: https://core.ac.uk/download/296414321.pdf
69. Ortiz E, Antonio R, Cruz J, Mendoza AM, Morales AB. Síntesis y caracterización de hidrogeles obtenidos a partir de acrilamida y metilcelulosa. Revista Iberoamericana de Polímeros. 2006;7(4).
70. Garnica Duran, SA. Estudio de la cinética de hinchamiento de hidrogeles nano estructurados cargados con partículas núcleo coraza de poliacrilamida-poli (ácido acrílico)". [Tesis de grado] Universidad de Guadalajara; 2020.

71. Martínez Martínez M.T. Desarrollo y aplicaciones de hidrogeles para la administración y liberación modificada de fármacos. [Tesis Doctoral]. Valencia, 2016.
72. Ramírez J, Gaytán D y Galicia G. Viscosimetría de soluciones de quitosano y evaluación electroquímica con la técnica de impedancia. Rev. JEEOS. 2018;2(3): 1-14. Disponible en: DOI:10.19136/Jeeos.a2n3.3064
73. Rabeea D, Aarif E, Misni M, Elfatih H y Mohammed O. Characterization and functional properties of some natural Acacia gums. Rev. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. 2016;17, 241–249.
74. Kolek E, Simko P, Simon P y Gatial A, Confirmation of polymerisation effect of sodium chloride and its additives on acrylamide by infrared spectrometry. J. Food Nutr Res. 2007; 46(1), 39-44.