

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE COACALCO

“Estudio de un sistema de Membrana de quitosano soportada en alfa alúmina para la separación y retención de nanopartículas de Silice (SiO_2), carbono (C) y Óxido de Zinc (ZnO)”

Titulación Integral
Proyecto de Investigación

Que para obtener el Título de
Ingeniero Ambiental
Con la Especialidad
Gestión y Tecnología del Agua

Presenta
Mauricio Vera Lara
201720524

Directora
M.S.A. Eréndira Ramírez Rivero

Coacalco de Berriozábal, Marzo de 2025

Agradecimientos

- A mi casa de estudios, el Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco. Por haberme permitido utilizar la infraestructura para realizar el presente trabajo.
- A la MSA Eréndira Ramírez Rivero, por su apoyo incondicional en este proyecto, le agradezco la atención, la motivación, la guía, su entrega, y el constante asesoramiento en la realización de este trabajo.
- Con mucho cariño, Mamá. Tu entrega, tu tolerancia y dedicación son la base para que hoy tenga las herramientas para llegar al éxito.
- A mi abuelito, por su esfuerzo para entenderme y todo el apoyo brindado. Este logro también es tuyo.
- A la sabiduría de mis hermanos, los mejores consejeros y ejemplos para mi formación.
- **A Dios, por acompañarme en cada momento de mi vida para darme fuerza y bienestar.**

Resumen

El objetivo del estudio de investigación es recopilar información teórica, técnica y ambiental de una tecnología de una membrana de quitosano soportada en alfa alúmina, para la separación y retención de nanopartículas contaminantes presentes en las emisiones de humos y vapores al medio ambiente.

- Se valoraron diferentes artículos para estimar la compatibilidad de la membrana de quitosano con el soporte cerámico alfa-alúmina.
- Se esquematizaron los componentes de la membrana y se contrastaron con materiales estructuralmente modificables.
- Posteriormente, se evaluó la viabilidad técnica de acuerdo con las Normas oficiales mexicanas.

Los resultados obtenidos indican que el sistema de membrana de quitosano soportada en alfa alúmina muestra un gran potencial como tecnología para la separación y retención de nanopartículas en humos y gases. No obstante, se recomienda continuar con la investigación, específicamente con la adquisición de equipo especializado, para llevar a cabo futuras exploraciones que permitan un desarrollo práctico de esta tecnología, con aplicaciones potenciales en la industria de control de emisiones y filtración de aire.

Palabras clave: membranas, quitosano, soporte alfa-alúmina, Bayerita, nanopartículas, contaminación

Abstrac

The objective of the research study is to analyze the technical and environmental feasibility of a chitosan membrane supported on alpha-alumina for the separation and retention of contaminant nanoparticles present in smoke and vapor emissions into the environment.

- Various articles were reviewed to estimate the compatibility of the chitosan membrane with the alpha-alumina ceramic support.
- The membrane components were outlined and compared with structurally modifiable materials.
- Subsequently, the technical feasibility was evaluated in accordance with official Mexican standards.

The results obtained indicate that the chitosan membrane system supported on alpha alumina shows great potential as a technology for the separation and retention of nanoparticles in fumes and gases. However, it is recommended to continue the research, specifically with the acquisition of specialized equipment, to carry out future explorations that will enable the practical development of this technology, with potential applications in the emissions control and air filtration industries.

Keywords: membranes, chitosan, alpha-alumina support, Bayerite, nanoparticles, pollution

Índice

Índice de Tablas	8
Índice de Figuras.....	9
Capítulo 1: Generalidades del proyecto.....	10
1.1 Introducción.....	10
1.2 Justificación.....	11
1.3 Problemática a resolver.....	11
1.4 Antecedentes.....	12
1.5 Objetivos.....	14
1.5.1 Objetivo General.....	14
1.5.2 Objetivos específico.....	14
1.6 Alcances y Limitaciones.....	13
1.6.1 Alcances.....	15
1.6.2 Limitaciones.....	15
1.7 Impactos Esperados y viabilidad.....	16
1.7.1 Impactos esperados.....	16
1.7.2 Viabilidad.....	17
Capítulo 2: Marco teórico.....	18
2.1 Introducción a las membranas en procesos de separación.....	18
2.2 Fundamentos de las Nanopartículas.....	18
2.3 Procesos de Filtración de Gases y Partículas.....	19
2.4 Quitina.....	19
2.4.1 Estructura química.....	20
2.5 Quitosano.....	20
2.5.1 Obtención de Quitosano.....	21
2.5.2 Estructura química.....	21
2.5.3 Propiedades químicas.....	22
2.5.4 Principales aplicaciones.....	22
2.6 Bayerita.....	23
2.6.1 Propiedades físicas de la Bayerita.....	23
2.6.2 Proceso Bayer para la obtención de Alúmina.....	24

2.6.3 Obtención de Alfa-Alúmina de Alta Pureza.....	24
2.7 Alfa-Alúmina: Propiedades y estructura.....	24
2.7.1 Principales aplicaciones de Alfa-Alúmina.....	25
2.8 Membranas.....	26
2.8.1 Membranas de Quitosano.....	26
2.8.1.1 Propiedades de las Membranas de Quitosano.....	26
2.8.1.2 Obtención de las Membranas de Quitosano.....	27
2.8.1.3 Aplicaciones de las Membranas de Quitosano.....	27
2.8.2 Soporte de Alfa-Alúmina.....	27
2.8.3 Síntesis de membranas de Quitosano soportadas en Alfa-Alúmina.....	28
2.8.3.1 Procedimiento de síntesis.....	28
2.8.3.2 Factores que Alteran la Síntesis.....	28
2.8.3.3 Caracterización de las Membranas Compuestas.....	29
Capítulo 3: Desarrollo.....	30
3.1 Síntesis del Quitosano.....	30
3.1.1 Caracterización del Quitosano.....	30
3.2 Comparación de las Características del Quitosano y la Alfa-Alúmina.....	30
3.2.1 Propiedades Físicas.....	30
3.2.2 Propiedades Químicas.....	31
3.2.3 Capacidad de Adsorción.....	31
3.2.4 Estabilidad Térmica.....	32
3.3 Preparación y Caracterización de Membranas de Quitosano y Alfa-Alúmina.....	32
3.3.1 Síntesis de Membranas.....	33
3.3.2 Método de Casting para la obtención de Membranas de Quitosano.....	33
3.3.3 Caracterización de las Membranas.....	34
3.3.4 Evaluación de la Capacidad de Filtración.....	34
Capítulo 4: Resultados.....	35
4.1 Evaluación Teórica de las Propiedades de la Membrana.....	35
4.2 Resultados de las Simulaciones.....	36
4.2.1 Análisis de la retención de nanopartículas.....	36
4.2.2 Reducción de contaminantes.....	36

5.- Conclusiones.....	37
6.- Competencias Desarrolladas.....	38
7.- Fuentes de información.....	40
8.- Anexos.....	46
Anexo 1 Glosario.....	46
Anexo 2 Caracterización del Quitosano.....	49
Anexo 3 El proceso Casting para la Síntesis de Membranas.....	52
Anexo 4 Purificación de la Quitina a partir de la Caridea	53
Anexo 5 Proceso Bayer para la obtención de Alúmina	54
Anexo 6 Técnicas de obtención de las Membranas de Quitosano	56
Anexo 7 Principios básicos de la Separación de partículas	59
Anexo 8 Tecnologías de Filtración	61
Anexo 9 Sectores Generadores de Emisiones de Nanopartículas Contaminantes.....	65
Anexo 10 Normas aplicables a la Membrana Compuesta.....	69

Índice de Tablas

Tabla 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible alineados al proyecto de investigación.....	13
Tabla 2. Factores que alteran los mecanismos de separación.....	19
Tabla 3. Propiedades Químicas del Quitosano.....	22
Tabla 4. Aplicaciones del Quitosano.....	23
Tabla 5. Propiedades Físicas de la Bayerita.....	24
Tabla 6. Aplicaciones del Alfa-Alúmina.....	25
Tabla 7. Clasificación de Membranas.....	26
Tabla 8. Propiedades de las Membranas de Quitosano.....	27
Tabla 9. Factores que afectan la Síntesis de una membrana compuesta.....	29
Tabla 10. Estabilidad Térmica del Quitosano y del Alfa-Alúmina.....	32
Tabla 11. Análisis teórico en la Síntesis de Membranas.....	33
Tabla 12. Técnicas para la caracterización de Membranas.....	34
Tabla 13. Parámetros analizados relacionados a las membranas compuestas.....	35
Tabla 14. Análisis del Proceso Casting.....	52
Tabla 15. Procedimiento para la purificación de la Quitina.....	53

Índice de Figuras.

Figura 1. Separación por tecnología de membranas.....	18
Figura 2. Estructura molecular de la celulosa y quitina.....	20
Figura 3. Fórmula desarrollada de la Quitina.....	20
Figura 4. Proceso para la obtención de Quitosano a partir de la Quitina.....	21
Figura 5. Fórmula Desarrollada del Quitosano.....	22
Figura 6. Diagrama de Flujo del Proceso Bayer.....	24
Figura 7. Estructura desarrollada del Alfa-Alúmina.....	25
Figura 8. Procedimiento de la Síntesis de Membranas Compuestas.....	28
Figura 9. Quitosano obtenido bajo procesos analíticos en laboratorio.....	30
Figura 10. Proceso Casting en la obtención de Membranas de Quitosano.....	33
Figura 11. Pesado de la Cáscara de Caridea.....	49
Figura 12. Triturado de la muestra.....	49
Figura 13. Pesado y preparación de soluciones.....	49
Figura 14. Preparación de Solución de HCL.....	50
Figura 15. Tratamiento de Desmineralización.....	50
Figura 16. Preparación de Solución de Etanol.....	50
Figura 17. Preparación de solución de NaOH.....	51
Figura 18. Tratamiento de Pigmentación.....	51
Figura 19. Obtención del Quitosano.....	51

Capítulo 1: Generalidades del Proyecto

1.1 Introducción

La motivación de este proyecto partió de la investigación de materiales amigables con el ambiente y biodegradables para la captación de nanopartículas. Mediante una técnica de bajo consumo energético. Por otra parte, para generar una solución barata, efectiva y aplicable a problemas específicos. Estandarizando una nueva especie de membranas en la tecnología de separación de nanopartículas contaminantes presentes en humos y vapores.

En beneficio a la salud pública y el ambiente. Con el fin de prevenir problemas ambientales y de salud por contacto directo e indirecto.

Estas nanopartículas, generadas por procesos industriales, vehiculares y de combustión, suelen ser altamente tóxicas, afectar la calidad del aire y contribuir al cambio climático. Un sistema de membrana eficiente permite la retención y separación de estas partículas, mitigando su liberación al medio ambiente ^[1].

En este contexto, el estudio de sistemas de membranas avanzadas, como las basadas en quitosano soportado en alfa-alúmina, se vuelve crucial. El quitosano es un biopolímero natural obtenido de la quitina, que se encuentra en los exoesqueletos de crustáceos, conocido por sus propiedades biodegradables y no tóxicas. Su alta capacidad de adsorción y su estructura química lo convierten en un material prometedor para la captura de contaminantes ^[2]. mientras que la alfa-alúmina (Al_2O_3) ofrece soporte estructural, mejorando la estabilidad mecánica y térmica de la membrana.

La investigación de esta tecnología de sistema de membrana no solo tiene aplicaciones ambientales, sino que también puede ser clave en el desarrollo de tecnologías industriales más limpias. Estos sistemas de membranas podrían ser utilizados en procesos de purificación de aire, captura de emisiones de partículas en centrales eléctricas, plantas industriales y en la industria automotriz, contribuyendo a la mejora de la calidad del aire y el cumplimiento de normativas ambientales más estrictas ^[3].

1.2 Justificación

El creciente enfoque en la protección del medio ambiente y la sostenibilidad ha acelerado el desarrollo de soluciones tecnológicas eficaces para reducir la contaminación causada por la liberación de nanopartículas en humos y gases. Aunque existen investigaciones previas centradas en el desarrollo de tecnologías basadas en membranas de quitosano soportadas en alfa alúmina, estos estudios han estado principalmente orientados a la filtración de agua. En investigaciones científicas sobre problemas ambientales, se ha demostrado que la exposición a nanopartículas bajo ciertas condiciones puede ser responsable de la degradación y muerte de la vegetación, la fauna e incluso causar daños directos a la salud humana. Entre las nanopartículas mayormente descargadas al medio ambiente destacan las Nanopartículas de carbono (C), Óxido de hierro (Fe_2O_3), Óxido de titanio (TiO_2), Óxido de zinc (ZnO), Nanopartículas de carbono (C), Nanopartículas de sílice (SiO_2).

1.3 Problemática a resolver

La creciente preocupación por la contaminación del aire, especialmente por la emisión de nanopartículas provenientes de diversos procesos industriales, representa uno de los desafíos ambientales más significativos en la actualidad. Estas nanopartículas, debido a su diminuto tamaño y alta reactividad, tienen la capacidad de penetrar en el sistema respiratorio humano, lo que incrementa los riesgos de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y otros problemas de salud ^[4]. Además, su presencia en la atmósfera puede contribuir a la formación de smog y otras formas de contaminación ambiental, lo que afecta tanto a la salud pública como al equilibrio ecológico.

Si bien se han desarrollado varias tecnologías para mitigar la liberación de nanopartículas, muchas de ellas siguen siendo ineficientes o costosas, lo que dificulta su implementación a gran escala. En este contexto, la búsqueda de sistemas de filtración más efectivos y accesibles se ha convertido en una prioridad.

En particular, la combinación de quitosano como material biocompatible y alfa-alúmina como soporte estructural podría ofrecer una solución viable. Sin embargo, es necesario investigar a fondo las propiedades y la eficacia de este sistema para la retención de nanopartículas en gases industriales, lo que hasta ahora no ha sido explorado a fondo en la literatura científica.

1.4 Antecedentes

Un primer estudio fue realizado por un grupo del Laboratorio de la Escuela de Química y Bioquímica de la Universidad Autónoma de Madrid, España. Quienes desarrollaron una membrana compuesta de alúmina y quitosano. En este enfoque tecnológico, se prepara una suspensión homogénea de partículas cerámicas que muestra una estabilidad relativamente alta ^[5].

De acuerdo con la metodología para la fabricación de un soporte de membrana de quitosano cerámica resulta factible mediante el método Casting, que resulta económicamente viable con un rango de distribución de tamaño de partícula distintivo y moldeable ^[6].

En el siguiente estudio, el grupo, que está encabezado por Jones Ariza, del Departamento de Ingeniería Nanoquímica de la Facultad de Tecnologías Avanzadas de la Universidad de Shiraz, propuso un nuevo enfoque de fabricación para reducir las dificultades durante la fabricación de membranas. Principalmente se empleó una capa intermedia de γ -alúmina de sacrificio (1,5 mm). Se determinó una mejora en la capacidad de recubrir las nanopartículas en superficies porosas y rugosas. A este procedimiento se le conoce como recubrimiento por inmersión. Aunque el análisis está en etapa inicial y para validarlo como método indicador de contaminación atmosférica, hacen falta datos de cinco a diez años, el equipo de trabajo ha topado con resultados favorables, que señalan que la técnica puede ser una herramienta útil ^[7].

En este sentido, se ha investigado el uso de alfa-alúmina como soporte para las membranas de quitosano. La alfa-alúmina (Al_2O_3) es un material cerámico con excelentes propiedades de estabilidad térmica, resistencia mecánica y alta capacidad de adsorción, lo que lo convierte en un candidato ideal para reforzar las membranas de quitosano ^[8]. La combinación de quitosano con alfa-alúmina puede mejorar significativamente las propiedades mecánicas y de durabilidad de las membranas, haciéndolas más aptas para aplicaciones industriales, especialmente en la captura de nanopartículas en humos y gases.

Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

El estudio de un sistema de membrana de quitosano soportada en alfa alúmina para la separación y retención de nanopartículas en humos y gases está alineado con varios de los **Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)** establecidos por las Naciones Unidas. La Tabla 1 determina los ODS alineados a la investigación.

Tabla 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible alineados al proyecto de investigación. ONU, 2015.

Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	Característica alineada
1.- ODS 3: Salud y bienestar	El control de la contaminación del aire y la reducción de nanopartículas en los gases industriales contribuirán a mejorar la salud pública, disminuyendo las enfermedades respiratorias, cardiovasculares y otros problemas de salud relacionados con la exposición a contaminantes.
2.- ODS 6: Agua limpia y saneamiento	Aunque este ODS se enfoca principalmente en el acceso a agua potable, la investigación en el tratamiento de emisiones gaseosas también se alinea con la gestión integral de recursos y el control de la contaminación ambiental, que beneficia indirectamente a los ecosistemas acuáticos al reducir la carga de contaminantes en el aire.
3.- ODS 9: Industria, innovación e infraestructura:	El desarrollo de tecnologías avanzadas de filtración, como las membranas híbridas de quitosano y alfa alúmina, contribuye a la innovación en la industria, promoviendo procesos industriales más limpios y sostenibles, que son esenciales para la mejora de la infraestructura industrial y la competitividad.
4.- ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles	La reducción de las emisiones de nanopartículas tiene un impacto directo en la calidad del aire, lo cual es crucial para la creación de ciudades más saludables y sostenibles, mejorando la calidad de vida de las personas que viven en áreas industriales o cercanas a fuentes de emisión.
5.- ODS 12: Producción y consumo responsables	Al promover el uso de materiales sostenibles como el quitosano y reducir el impacto ambiental de los procesos industriales mediante la retención de nanopartículas, esta investigación apoya la transición hacia una economía circular y la producción responsable, con un menor impacto ambiental.
6.- ODS 13: Acción por el clima:	Al contribuir a la reducción de la contaminación del aire, el estudio tiene el potencial de mitigar los efectos del cambio climático, ya que muchas de las emisiones industriales que contienen nanopartículas también están vinculadas a gases de efecto invernadero.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

- Determinar la viabilidad de un sistema de membrana compuesto por quitosano soportado en alfa alúmina y evaluar su desarrollo con el fin de optimizar su capacidad de separación y retención de nanopartículas presentes en combustión de hidróxido de azufre, hidróxido de Nitrógeno y Ozono

1.5.2 Objetivos específicos

- Analizar las propiedades fisicoquímicas del quitosano y la alfa alúmina, y su combinación como materiales de membranas, para estudiar su rentabilidad en la captura y retención de nanopartículas en gases industriales.
- Determinar las propiedades que afectan la eficiencia del sistema de membranas, como la porosidad, la permeabilidad y la interacción química entre los componentes.

1.6 Alcances y limitaciones

1.6.1 Alcances

- Este estudio se centrará en la investigación de una membrana compuesta por quitosano y alfa alúmina, evaluando su compatibilidad y viabilidad para la separación y retención de nanopartículas presentes en humos y gases industriales.
- Se identificarán y evaluarán las propiedades fisicoquímicas, mecánicas y térmicas de los componentes orgánicos e inorgánicos, estableciendo una base científica sólida para su implementación.
- Se analizará el impacto ambiental y el costo-beneficio del uso de la membrana desarrollada en comparación con tecnologías tradicionales.

1.6.2 Limitaciones

- El estudio no abarca las fases de implementación y evaluación de las estrategias.
- Las pruebas estarán limitadas a condiciones de laboratorio controladas, lo que puede diferir de las condiciones reales de operación industrial.
- La disponibilidad y el costo de los materiales utilizados, especialmente los componentes orgánicos e inorgánicos de alta pureza, podrían limitar la escalabilidad del diseño.
- Este estudio se enfocará en nanopartículas presentes en humos y vapores, por lo que el sistema de membrana desarrollado puede no ser completamente aplicable a todos los tipos de emisiones industriales o contaminantes presentes en diferentes sectores.

1.7 Impactos esperados y viabilidad

1.7.1 Impactos esperados

Impacto Ambiental

- **Reducción de la contaminación atmosférica:** La implementación del sistema de membrana basado en quitosano soportado en alfa alúmina contribuirá a una significativa reducción de nanopartículas en los humos y gases industriales.
- **Fomento de tecnologías sostenibles:** Este desarrollo se alinea con la sostenibilidad, promoviendo la implementación de soluciones tecnológicas limpias y energéticamente eficientes.
- **Cumplimiento de regulaciones ambientales:** La tecnología permitirá a las industrias cumplir con estándares más estrictos en materia de emisiones, reduciendo penalizaciones regulatorias y fortaleciendo su responsabilidad ambiental.

Impacto Económico

- **Optimización de procesos Industriales:** La incorporación de membranas híbridas reducirá costos operativos en comparación con tecnologías tradicionales

Impacto Social

- **Mejora de la calidad del aire:** Al contribuir a la reducción de contaminantes, este proyecto impactará positivamente en la salud de las comunidades cercanas a centros industriales.
- **Generación de conocimiento y empleo:** Este proyecto promoverá el desarrollo de capacidades técnicas y científicas, creando oportunidades de investigación y empleo especializado.

1.7.2 Viabilidad

Viabilidad técnica

- **Disponibilidad de materiales:** Los componentes necesarios, como la alfa-alúmina y el quitosano, están ampliamente disponibles en el mercado, facilitando el desarrollo del prototipo.
- **Tecnologías comprobadas:** La combinación de la alta capacidad de adsorción del quitosano con la estabilidad térmica y mecánica de la alfa alúmina sugiere que esta solución es técnicamente viable para la captura de nanopartículas en condiciones industriales.
- **Compatibilidad con procesos existentes:** Las membranas son integrables en sistemas industriales, minimizando la necesidad de modificaciones importantes en infraestructura.

Viabilidad económica

- **Relación costo-beneficio positiva:** Aunque el desarrollo inicial puede requerir una inversión significativa, el costo operativo de las membranas es inferior al de las tecnologías tradicionales, lo que asegura su rentabilidad a largo plazo.
- **Acceso a financiamiento:** El enfoque ambiental del proyecto lo hace atractivo para obtener fondos de programas de desarrollo sostenible y de instituciones interesadas en tecnologías verdes.

Viabilidad ambiental

- **Reducción del impacto energético:** Las membranas requieren menos energía que otras tecnologías de separación, lo que disminuye la huella de carbono asociada a los procesos industriales.
- **Sustentabilidad a largo plazo:** Los materiales seleccionados, como la alfa-alúmina, son duraderos y reciclables, lo que refuerza el carácter sostenible del proyecto.

Viabilidad social

- **Apoyo a la transición ecológica:** Este proyecto se alinea con la tendencia global hacia la adopción de tecnologías que prioricen la salud humana y la protección del medio ambiente.
- **Aceptación industrial y comunitaria:** Las industrias y las comunidades cercanas a fuentes de contaminación se beneficiarán de esta solución, promoviendo su aceptación y difusión.

Capítulo 2: Marco Teórico

2.1 Introducción a las membranas en procesos de separación

El presente capítulo aborda los conceptos fundamentales y el contexto científico relacionado con el estudio de un sistema de membrana de quitosano soportada en alfa-alúmina para la separación y retención de nanopartículas en humos y gases. Se explorarán los principios básicos de la separación de partículas, el uso de membranas en procesos de filtración, y las propiedades del quitosano y alfa-alúmina como materiales clave en el desarrollo de tecnologías para la captura de nanopartículas contaminantes en flujos gaseosos.

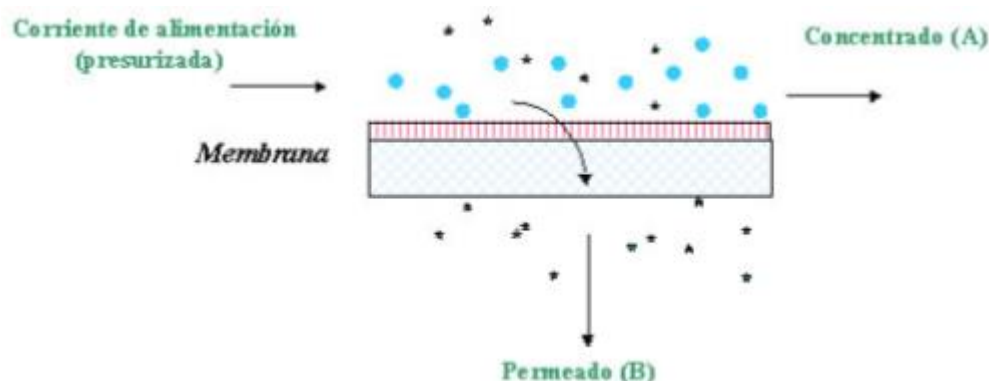


Figura 1. Separación por tecnología de membranas. Qurashi, 1992.

2.2 Fundamentos de las Nanopartículas

Las nanopartículas son partículas de tamaño microscópico que poseen propiedades físicas, químicas y biológicas que difieren significativamente de sus contrapartes a escala macroscópica ^[9]. Estas propiedades, que incluyen una mayor relación superficie-volumen, las hacen especialmente útiles en áreas como la nanotecnología, la medicina, la electrónica, y la química ^[10]. pero también presentan un riesgo significativo debido a su capacidad de penetración en organismos vivos y su potencial tóxico.

En el contexto de los humos y gases industriales, las nanopartículas pueden ser generadas por procesos de combustión, emisiones industriales o como subproductos de reacciones químicas ^[11]. Estas partículas son de gran interés debido a sus impactos en la salud humana y el medio ambiente, lo que ha impulsado el desarrollo de tecnologías para su captura y eliminación eficiente.

2.3 Procesos de Filtración de Gases y Partículas

La filtración de gases y partículas es un proceso crítico en el tratamiento de emisiones industriales, con el objetivo de reducir la liberación de contaminantes a la atmósfera ^[12]. Tradicionalmente, las tecnologías de filtración incluyen filtros de partículas como los de carbón activado, los filtros High Efficiency Particulate Air (HEPA), y los filtros electrostáticos. Sin embargo, la creciente preocupación por las nanopartículas ha generado la necesidad de desarrollar materiales avanzados, como las membranas, que puedan ofrecer una mayor eficiencia en la separación de partículas de tamaño nanométrico.

En este contexto, las membranas de separación han ganado popularidad debido a su capacidad para seleccionar partículas con alta precisión según su tamaño, forma o carga. Los materiales que componen estas membranas deben tener propiedades específicas, como alta permeabilidad, selectividad, estabilidad térmica y resistencia a los contaminantes ^[13].

Tabla 2. Factores que alteran los mecanismos de separación. Joan Yang, 2009.

Factores que alteran los mecanismos de separación	Propiedades
1.- Naturaleza de los materiales:	La composición química y la estructura influyen la selectividad frente a ciertos gases o vapores.
2.- Condiciones operativas	Presión, temperatura y concentración afectan el rendimiento de las membranas
3.- Interacciones moleculares	Afinidad química entre la matriz de la membrana y los componentes de la mezcla

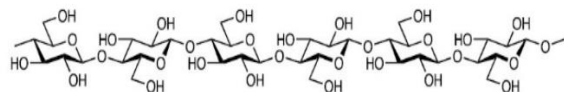
2.4 Quitina

Entre las moléculas poliméricas más abundantes en la naturaleza se halla la quitina, que es un componente de los exoesqueletos de invertebrados y las paredes celulares de algunos hongos y algas. La quitina se produce por biosíntesis en los organismos ante indicados y presenta una tasa de reposición tan alta en la biosfera que, se estima, duplica a la de la celulosa ^[14]. Los desechos de crustáceos producidos por la industria pesquera son la materia prima para la industrialización de la quitina. El procedimiento para obtenerla consiste en aislarla de proteínas, minerales, generalmente calcáreos y pigmentos. Las etapas de este procedimiento se denominan procesos de desproteinización y desmineralización ^[15].

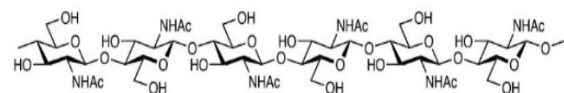
2.4.1 Estructura química

La estructura de la quitina presenta similitud con la de la celulosa, la diferencia entre ellas se encuentra en que el carbono 2 contiene un grupo hidroxilo en la celulosa y un grupo acetamida en la quitina ^[16].

La Figura 2 muestra la comparación en la estructura molecular de la celulosa y quitina.



(a) Celulosa: polímero de β -(1 $\rightarrow$ 4) D-Glucopiranosas



(b) Quitina: polímero de β -(1 $\rightarrow$ 4) 2 acetamido-2 deoxi-D Glucopiranosas

Figura 2. Estructura molecular de la celulosa y quitina. Khor, E, 2003.

En la Figura 3, se muestra la Fórmula desarrollada de la Quitina ^[16].

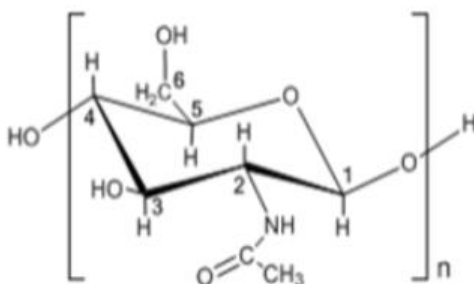


Figura 3. Fórmula desarrollada de la Quitina. Lárez, C, 2006.

2.5 Quitosano

El quitosano, es el principal derivado de la quitina, se obtiene industrialmente mediante un tratamiento de desacetilación. Estas variables los hacen útiles para diversas aplicaciones ^[17]. En general, el quitosano es un polímero biodegradable y natural proveniente de la quitina, componente natural de la concha de los crustáceos. Es un biomaterial que ha demostrado ser biocompatible y que puede ser utilizado en diversas áreas ^[18].

Posee propiedades antimicrobianas y absorbe los metales tóxicos como: mercurio, cadmio, plomo, etc. Además, tiene buena adhesión, capacidad de coagulación y actividad inmunoestimulante ^[19]. En

los últimos años, se ha observado el uso creciente de este biopolímero en actividades relacionadas con la preservación del medio ambiente y el cuidado de la salud humana.

2.5.1 Obtención de Quitosano

La caracterización del biopolímero quitosano, a partir del exoesqueleto de langostino blanco, se recurrió a un procedimiento que involucró las etapas de desmineralización desproteinización y desacetilación ^[20]. (Ver Anexo II)

En la Figura 4, se identifica el proceso para la obtención del quitosano a partir de la quitina presente en conchas de crustáceos.

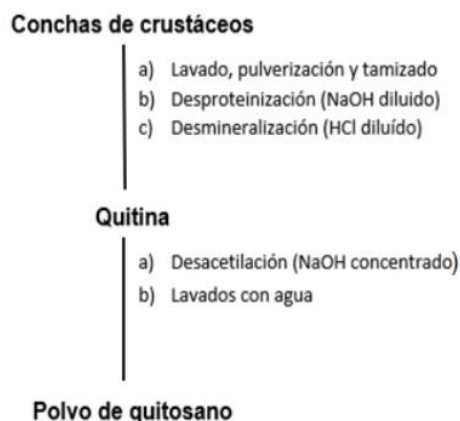


Figura 4. Proceso para la obtención del quitosano a partir de la quitina. Rinaudo, M, 2006.

2.5.2 Estructura química

El quitosano muestra variabilidad no solamente en el tamaño de las cadenas, sino, también, en el grado de acetilación de estas ^[21].

En la Figura 5. Podemos encontrar la estructura molecular del Quitosano.

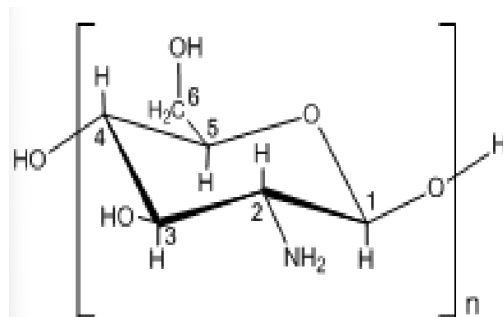


Figura 5. Fórmula Desarrollada del Quitosano. Khor E, 2006.

2.5.3 Propiedades químicas

La Tabla 3. enlista las principales y más importantes propiedades químicas del quitosano.

Tabla 3. Propiedades Químicas del Quitosano. Velasco M, 2006.

Propiedades Químicas del Quitosano
1.- Estructura rígida de D-glucosamina; alta hidrofiliidad y cristalinidad
2.- Permite la formación de enlaces de hidrógeno intermoleculares; en solución presenta alta viscosidad.
3.- Capacidad para formar polielectrolitos.
4.- El grupo amino desprotonado actúa como un poderoso nucleófilo.
5.- Insoluble en agua y disolventes orgánicos; soluble en soluciones acuosas de ácidos diluidos
6.- Tiene propiedades de captura y adsorción; filtración y separación; con elementos afines a su grupo amina.
7.- Amino-polisacáridos lineales con alto contenido de hidrogeno.
8.- Agente floculante; Interactúa con moléculas cargadas negativamente.
9.- Biocompatibilidad.
10.- Bioactividad y No tóxico

2.5.4 Principales aplicaciones

La Tabla 4 establece las aplicaciones más importantes que tiene actualmente el Quitosano en el mundo.

Tabla 4. Aplicaciones del Quitosano. Badot M, 2008.

Aplicaciones del Quitosano	Características
a) Captación de nanopartículas para la descontaminación ambiental.	Su capacidad para unirse a metales pesados y otras partículas nocivas lo convierte en una herramienta valiosa en la remediación ambiental.
b) Tratamiento de aguas y filtración	Su capacidad para formar complejos con las nanopartículas lo convierte en un material excelente para la fabricación de filtros ecológicos.
c) Industria alimentaria: conservación y seguridad alimentaria.	Las nanopartículas encapsuladas en matrices de quitosano pueden liberar gradualmente ingredientes activos, como conservantes o antioxidantes, para mejorar la seguridad alimentaria y prolongar la vida útil de los productos
d) Cosmética y productos de cuidado Personal	El quitosano se utiliza en la formulación de productos cosméticos debido a sus propiedades hidratantes y antioxidantes. Además, su acción antimicrobiana se aprovecha para desarrollar productos como geles antibacterianos o cremas antiacné, proporcionando protección contra agentes patógenos y mejorando la salud de la piel.

2.6 Bayerita.

La Bayerita es un mineral que forma parte del grupo de los óxidos de aluminio, específicamente una forma hidratada de alúmina (Al_2O_3). Su fórmula química es $\text{Al}(\text{OH})_3$. Su transformación en alúmina anhidra y más específicamente en alfa-alúmina es un paso crucial en la producción de materiales cerámicos de alta resistencia ^[22].

2.6.1 Propiedades físicas de la Bayerita

En la Tabla 5. Se representan las Propiedades Físicas de la Bayerita ^[23].

Tabla 5. Propiedades Físicas de la Bayerita. Berlin, Hhidelberg, 2005.

Propiedades Físicas	Característica
Color	Blanco
Densidad	2.54 g/cm ³ , peso normal
Fórmula	Al(OH) ₃ .
Lista de elementos	Al, H, O

2.6.2 Proceso Bayer para la Obtención de Alúmina

El proceso Bayer es el método industrial más utilizado para la obtención de alúmina a partir de la bauxita, que contiene una alta proporción de Bayerita ^[24]. La Figura 6 presenta simplificado el Proceso Bayer.

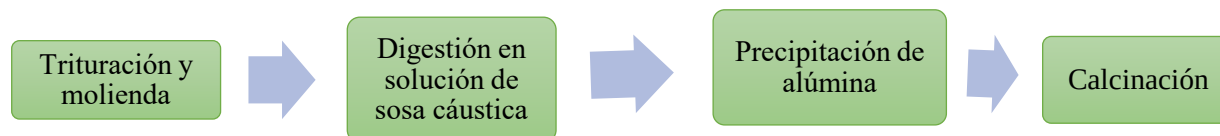


Figura 6. Diagrama de Flujo del Proceso Bayer. Henry J, 2001.

2.6.3 Obtención de Alfa-Alúmina de Alta Pureza

Aunque el proceso Bayer produce alúmina en forma de gamma-alúmina (γ -Al₂O₃), theta-alúmina (θ -Al₂O₃) y kappa-alúmina (κ -Al₂O₃), la obtención de alfa-alúmina (α -Al₂O₃) requiere un tratamiento adicional ^[25]. Esto se logra mediante un proceso de calcinación controlada a temperaturas muy altas (aproximadamente 1200°C a 1600°C), donde se favorece la formación de la estructura cristalina estable de alfa-alúmina.

Además, la alfa-alúmina se puede obtener por medio de la sinterización de una mezcla de partículas de gamma-alúmina a altas temperaturas, proceso que permite la recrystalización de las partículas y la conversión de las fases intermedias en la forma estable y de alta densidad.

2.7 Alfa-Alúmina: Propiedades y estructura

El tratamiento térmico de la bohemita o bayerita a altas temperatura (>1100°C) genera la fase alfa. Dicho tratamiento a mayor temperatura de transición y transforma la morfología definiendo mejor el grano ^[26]. En la Figura 7 se encuentra mostrada la estructura desarrollada del Alfa-alúmina.

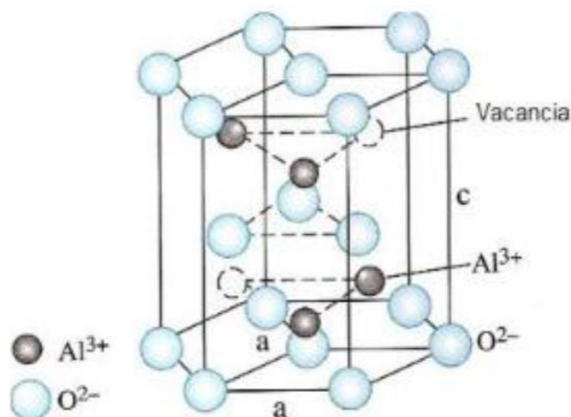


Figura 7. Estructura desarrollada del Alfa-alúmina. Berlín Heidelberg, 2014.

2.7.1 Principales aplicaciones de Alfa-Alúmina

La alfa-alúmina tiene una amplia variedad de aplicaciones industriales debido a sus excepcionales propiedades de dureza, resistencia a la abrasión y estabilidad térmica ^[27]. La Tabla 6 reúne las principales Aplicaciones de interés del Alfa-Alúmina.

Tabla 6. Aplicaciones del Alfa-Alúmina. Benalcázar M, 2024.

Aplicaciones del Alfa-Alúmina más comunes	Características
1.- Materiales Cerámicos	La alfa-alúmina es fundamental en la fabricación de cerámicas técnicas como baldas refractarias, discos abrasivos y componentes para la industria del automóvil.
2.- Membranas Cerámicas	Alfa-alúmina es ampliamente utilizada como soporte para la fabricación de membranas de separación en aplicaciones como la purificación de gases y la filtración de líquidos
3.- Catalizadores	En la industria química, la alfa-alúmina se utiliza como soporte en la fabricación de catalizadores heterogéneos, que son utilizados en procesos como la refinación de petróleo y la producción de productos químicos finos.
4.- Industria electrónica	Debido a su alta conductividad térmica y resistencia mecánica, la alfa-alúmina es utilizada en la fabricación de componentes electrónicos y materiales para la industria de la microelectrónica.

2.8 Membranas

Las membranas son materiales que actúan como barreras selectivas, permitiendo el paso de ciertos componentes de una mezcla mientras retienen otros. Son utilizadas en una variedad de aplicaciones, como en procesos de separación, purificación, filtración y tratamiento de aguas ^[28]. La Tabla 7 muestra la clasificación de las Membranas.

Tabla 7. Clasificación de las Membranas. S.J Allen, 2002.

Clasificación de acuerdo con la estructura, composición y el tipo de procesos que pueden realizar:
1.- Transporte por difusión
2.- Ósmosis
3.- Electrodialisis

Las membranas se utilizan en procesos como la filtración de líquidos y gases, en la separación de moléculas en función de su tamaño, carga o propiedades químicas. Se emplean en diversas industrias, incluyendo la farmacéutica, la alimentaria, la química, y la energética, entre otras ^[28].

2.8.1 Membranas de Quitosano.

Es un material con características únicas, tales como biocompatibilidad, biodegradabilidad, propiedades antimicrobianas, y alta capacidad de adsorción, lo que lo convierte en un material atractivo para la fabricación de membranas de separación ^[29].

2.8.1.1 Propiedades de las Membranas de Quitosano.

Las membranas de quitosano son particularmente conocidas por su alta capacidad de adsorber diversas moléculas, lo que las hace útiles en aplicaciones de purificación y tratamiento de gases, líquidos, y procesos de separación de contaminantes ^[30]. La Tabla 8. Enlista las principales propiedades de las Membranas de Quitosano.

Tabla 8. Propiedades de las Membranas de Quitosano. Harris R, 2010.

Propiedades de las Membranas de Quitosano	Resultados
- Biocompatibilidad y biodegradabilidad	El quitosano es un material ecológico que se descompone fácilmente en el medio ambiente sin generar productos tóxicos.
- Alta capacidad de adsorción	El quitosano presenta una gran capacidad para adsorber metales pesados, contaminantes orgánicos e incluso nanopartículas, lo que es ventajoso en aplicaciones de filtración y purificación.
- Propiedades antimicrobianas	El quitosano tiene propiedades antimicrobianas naturales, lo que le permite ser utilizado en aplicaciones médicas y ambientales.
- Solubilidad en soluciones ácidas	El quitosano es soluble en soluciones ácidas, lo que facilita su procesamiento para la fabricación de membranas y otros dispositivos.

2.8.1.2 Obtención de las Membranas de Quitosano

Las membranas de quitosano pueden ser preparadas mediante diferentes técnicas, como el electro spinning, el reparto, y el proceso de gelificación. (Ver Anexo 6) Estas técnicas permiten formar una matriz porosa que facilita la separación de partículas o moléculas según sus características.

2.8.1.3 Aplicaciones de las Membranas de Quitosano

Las membranas de quitosano soportadas en alfa-alúmina tienen diversas aplicaciones, especialmente en la separación de nanopartículas y la captura de contaminantes en sistemas de filtración de humos y gases. La capacidad de adsorción del quitosano permite la captura de nanopartículas, mientras que el soporte de alfa-alúmina garantiza que la membrana mantenga su integridad estructural incluso a altas temperaturas, lo que la convierte en una opción viable para su uso en procesos industriales y ambientales ^[31].

2.8.2 Soporte de Alfa-Alúmina

El objetivo de un soporte es proporcionar la superficie a las especies activas o aditivos que forman al catalizador. Existe una gran diversidad de formas, tamaño de partícula y propiedades texturales, que son elegidas para lograr un mayor aprovechamiento de los catalizadores, disponer de mayor área de contacto, transferencia de masa, estabilidad, etc. ^[32].

La alfa-alúmina se utiliza como material de soporte para membranas debido a su alta estabilidad estructural y resistencia a la degradación. La alúmina es preparada por la deshidratación del hidróxido de aluminio o hidrólisis del aluminato de sodio por el proceso Bayer. (Ver Anexo V)

2.8.3 Síntesis de membranas de Quitosano soportadas en Alfa-Alúmina

La combinación de Quitosano y alfa-alúmina para la fabricación de membranas compuestas es una estrategia efectiva para optimizar las propiedades de adsorción y separación de nanopartículas en humos y gases ^[33]. La alfa-alúmina, por su parte, actúa como soporte estructural, proporcionando rigidez y estabilidad térmica a la membrana, mientras que el quitosano, con su capacidad de adsorción de contaminantes, facilita la captura de nanopartículas.

2.8.3.1 Procedimiento de Síntesis

La síntesis de membranas de quitosano soportadas en alfa-alúmina se lleva a cabo mediante una metodología de preparación que involucra la aplicación del quitosano sobre un soporte cerámico de alfa-alúmina ^[34]. En la Figura 8 se muestra simplificado el proceso de pasos generales de síntesis.

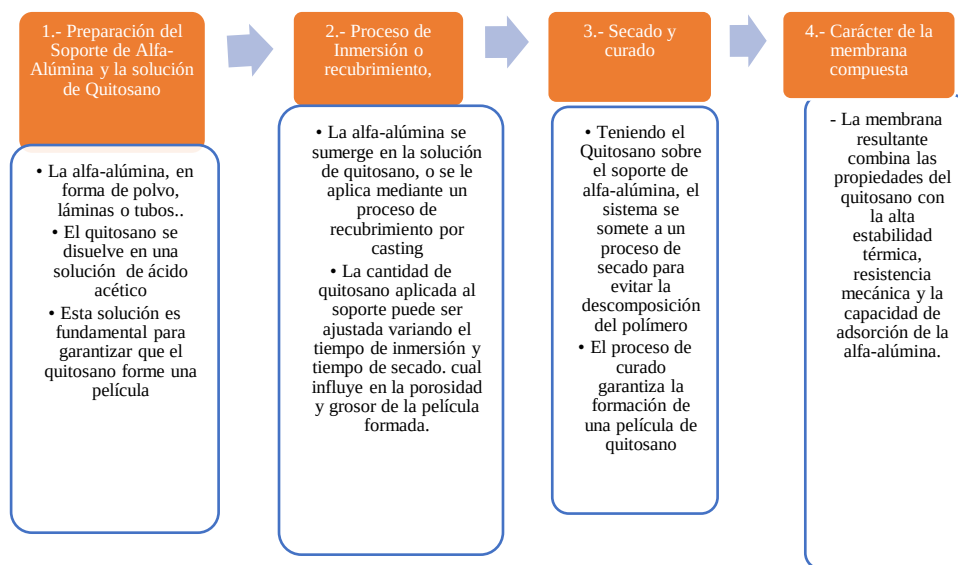


Figura 8. Procedimiento de Síntesis De Membranas Compuestas. Rojas L, 2021.

2.8.3.2 Factores que Afectan la Síntesis

Varios factores pueden influir en las propiedades finales de las membranas de quitosano soportadas en alfa-alúmina ^[35]. La Tabla 9 detalla la comparativa entre los Factores que pueden afectar la Síntesis de este Material.

Tabla 9. Factores que afectan la Síntesis de membranas compuestas. Muraviev D, 2008.

Factores que pueden afectar la Síntesis	Definición
- Concentración de la solución del Quitosano	La concentración de quitosano en la solución influye directamente en la formación de la capa de membrana. Soluciones con mayor concentración tienden a generar membranas más gruesas y con mayor capacidad de adsorción, pero con menor flexibilidad.
- Tipo y tamaño de Alfa-Alúmina	La estructura y porosidad del soporte cerámico de alfa-alúmina afectan la distribución del quitosano y la formación de la membrana
- Temperatura de secado y curado	Las condiciones de secado y curado aseguran la estabilidad de la película de quitosano. Temperaturas muy altas pueden causar la descomposición del quitosano, mientras que temperaturas demasiado bajas pueden resultar en una película débil o mal adherida.

2.8.3.3 Caracterización de las Membranas Compuestas

Una vez sintetizadas las membranas de quitosano soportadas en alfa-alúmina, es necesario caracterizarlas para evaluar sus propiedades y determinar su rendimiento en aplicaciones de separación y adsorción. Algunas de las técnicas más comunes utilizadas incluyen ^[36]:

- **Microscopía Electrónica de Barrido (SEM):** Para observar la morfología y distribución de los poros en la membrana, lo que proporciona información sobre la calidad del recubrimiento y la interacción entre el quitosano y el soporte de alfa-alúmina.
- **Análisis de superficie (BET):** Para medir el área superficial específica de la membrana y determinar la distribución de tamaños de poro, lo que es crucial para evaluar la eficiencia de la adsorción de nanopartículas.
- **Espectroscopía de Infrarrojo (FTIR):** Para identificar los grupos funcionales presentes en la membrana y confirmar las interacciones químicas entre el quitosano y la alfa-alúmina, lo que afecta las propiedades de adsorción y la estabilidad de la membrana.
- **Pruebas de permeabilidad y adsorción:** Para evaluar la eficacia de la membrana en la separación de nanopartículas o contaminantes de los gases y humos, y determinar su capacidad de adsorción y la retención de partículas.

Capítulo 3: Desarrollo

En este capítulo se lleva a cabo una comparación exhaustiva entre las características del Quitosano y la Alfa-alúmina para evaluar cuál de los dos materiales es más adecuado para el diseño de un sistema de membrana compuesto. En particular, se comparan sus propiedades fisicoquímicas, mecánicas y de adsorción. Con el objetivo de determinar cómo sus características impactan en la eficacia de la membrana soportada para la separación y retención de nanopartículas en humos y gases.

3.1 Síntesis del Quitosano

El quitosano es un biopolímero natural obtenido por desacetilación de la quitina ^[37]. Este biomaterial presente principalmente en los exoesqueletos de crustáceos. Este material es de interés debido a su biocompatibilidad, biodegradabilidad, y su capacidad para formar películas y membranas porosas, lo que lo convierte en un excelente candidato para aplicaciones en la filtración y adsorción de contaminantes ^[38].

3.1.1 Caracterización del Quitosano

Los análisis de las muestras en el laboratorio, para la obtención del biopolímero Quitosano, mostraron la certeza del protocolo del proceso de obtención. (Ver Anexo III)



Figura 9. Quitosano obtenido bajo procesos analíticos, Elaboración Propia

3.2 Comparación de las Características del Quitosano y la Alfa-Alúmina

La comparación entre el quitosano y la alfa-alúmina se realiza mediante diferentes criterios técnicos que incluyen propiedades estructurales, comportamiento en sistemas de filtración y estabilidad a condiciones extremas, como temperatura elevada y exposición a ambientes ácidos o básicos.

3.2.1 Propiedades Físicas

- **Quitosano:** El quitosano es un biopolímero derivado de la quitina, conocido por su alta porosidad y capacidad para formar películas flexibles. Sus propiedades físicas son influidas

por la presencia de grupos amino en su estructura, lo que le otorga características como la biodegradabilidad, la biocompatibilidad y la capacidad de formar enlaces con otras moléculas [39]. Su capacidad para formar películas porosas lo hace adecuado para aplicaciones de separación en sistemas de filtración de gases y líquidos, aunque su resistencia mecánica puede ser menor comparada con otros materiales más sólidos como la alfa-alúmina.

- **Alfa-Alúmina:** La alfa-alúmina es un material cerámico con una estructura cristalina robusta y una alta estabilidad térmica. Este material es conocido por su alta dureza y resistencia a la compresión, lo que le otorga una gran resistencia mecánica. Su capacidad para formar estructuras porosas también es un atributo valioso para aplicaciones de filtración, pero con la ventaja de mantener su integridad estructural incluso a temperaturas elevadas, lo que lo hace ideal como soporte para membranas en ambientes extremos.

3.2.2 Propiedades Químicas

- **Quitosano:** El quitosano es un polímero que se disuelve fácilmente en soluciones ácidas debido a su estructura química, lo que lo hace susceptible a la descomposición bajo condiciones de pH extremos (muy ácido o alcalino). Sin embargo, su capacidad para formar enlaces con metales y otras sustancias químicas es una ventaja en aplicaciones de adsorción, especialmente para la captura de nanopartículas y contaminantes.
- **Alfa-Alúmina:** La alfa-alúmina es un material químicamente inerte en una amplia gama de pH, lo que le otorga una excelente estabilidad química. Este material no se ve afectado por la exposición a ácidos y bases, lo que lo hace ideal para entornos donde se emplean condiciones extremas, como en la filtración de gases industriales. Además, la alfa-alúmina es conocida por sus capacidades de adsorción de partículas cargadas debido a sus superficies activas, que la hacen útil para retener nanopartículas o partículas en suspensión.

3.2.3 Capacidad de Adsorción

- **Quitosano:** El quitosano tiene una gran capacidad de adsorción debido a sus grupos amino y otras unidades funcionales presentes en su estructura. Estas propiedades le permiten adsorber una amplia variedad de contaminantes, incluidos metales pesados, compuestos orgánicos y nanopartículas. La adsorción de nanopartículas en sistemas de filtración es favorecida por la capacidad del quitosano para formar interacciones electrostáticas y de coordinación con estas partículas.

- **Alfa-Alúmina:** La alfa-alúmina, al ser un material cerámico microporoso, presenta una alta área superficial, lo que le confiere una notable capacidad de adsorción. Este material tiene una excelente capacidad para adsorber partículas, especialmente en forma de nanopartículas o moléculas cargadas debido a su superficie activa. Sin embargo, su capacidad de adsorción depende en gran medida de la estructura porosa que se desarrolle, lo que es más estable cuando se emplea en combinación con otros materiales, como el quitosano.

3.2.4 Estabilidad Térmica

La Tabla 10 añade una comparativa en las propiedades térmicas que componen la estructura del Quitosano y del Alfa-Alúmina.

Tabla 10. Estabilidad Térmica del Quitosano y del Alfa-Alúmina, Chitosan, 2010.

Estabilidad Térmica	Características
1.- Quitosano	- El quitosano tiene una estabilidad térmica limitada en comparación con la alfa-alúmina. - A temperaturas elevadas, el quitosano tiende a degradarse y perder su integridad estructural, lo que puede limitar su rendimiento en aplicaciones que involucren calor extremo. - Su combinación con materiales cerámicos, como la alfa-alúmina, puede mejorar esta característica
2.- Alfa-Alúmina	- La alfa-alúmina es conocida por su alta estabilidad térmica, resistiendo temperaturas de hasta 1000 °C o más sin descomposición significativa. Esta característica la convierte en un material ideal para aplicaciones de filtración a alta temperatura, donde otros materiales como el quitosano no podrían mantenerse funcionales. - Además, su estabilidad térmica asegura que las membranas puedan operar durante largos períodos sin perder eficiencia.

3.3 Preparación y Caracterización de Membranas de Quitosano y Alfa-Alúmina

Se determinó la Fabricación del sistema de membrana compuesto de quitosano soportado en alfa-alúmina ^[40]. Donde se realizaron varios procedimientos experimentales. Esta sección describe los métodos de síntesis, preparación de las membranas y las técnicas de caracterización empleadas para evaluar el rendimiento de ambas membranas, tanto de quitosano como de alfa-alúmina, en la separación de nanopartículas en humos y gases.

3.3.1 Síntesis de Membranas

La Tabla 11 Determina un análisis teórico entre el proceso de obtención en la Síntesis de Membranas de Quitosano soportadas en Alfa-Alúmina.

Tabla 11. Análisis teórico en la Síntesis de Membranas, Cell membrane. 2020

Proceso de Obtención	Resultados
Membranas de Quitosano	- Las membranas de quitosano obtienen mayor efectividad a través del método casting, (Anexo III) en el que el quitosano se disuelve en una solución ácida y se vierte sobre el soporte de alfa-alúmina. - Esta mezcla se deja secar y se somete a un proceso de curado para formar una capa delgada, pero resistente. Se varían parámetros como la concentración de quitosano, la temperatura y el tiempo de secado para optimizar la formación de la membrana.
Membranas Compuestas de Quitosano y Alfa-Alúmina.	- En la elaboración de las membranas compuestas, el quitosano se aplica sobre el soporte de alfa-alúmina, creando una película delgada de quitosano que aprovechó la estabilidad mecánica y térmica de la alfa-alúmina. - Permitió que la membrana combinara las propiedades adsorbentes del quitosano con la resistencia y estabilidad térmica de la alfa-alúmina.

3.3.2 Método Casting para la obtención de Membranas de Quitosano.

El “Método Casting” es una técnica ampliamente utilizada para la fabricación de membranas de quitosano debido a su simplicidad, bajo costo y capacidad para producir membranas de alta calidad con una estructura homogénea ^[41].

Este proceso consiste en la formación de una película delgada a partir de una solución de quitosano disuelto en un solvente adecuado, que luego se solidifica para formar la membrana.

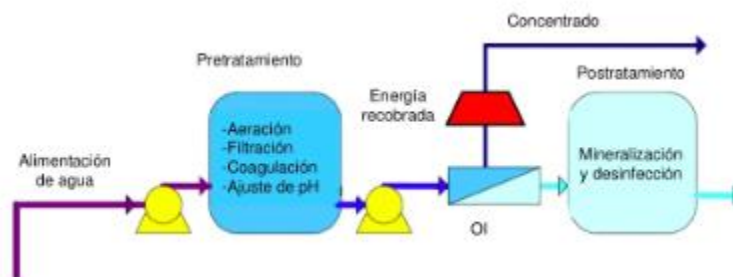


Figura 10. Proceso Casting en la obtención de Membranas de Quitosano. Petzke J, 2021.

3.3.3 Caracterización de las Membranas

La Tabla 12 recopila las Técnicas más importantes para la Caracterización de membranas:

Tabla 12. Técnicas para la caracterización de Membranas. Library, 2020.

Técnica para Caracterizar Membranas	Funcionamiento
Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	Para evaluar la morfología y la distribución de los poros de las membranas de quitosano y alfa-alúmina. Esta técnica permitió observar la uniformidad de las capas y la interacción entre ambos materiales.
Análisis de Porosidad	Se empleó la técnica de adsorción de nitrógeno (BET) para medir el área superficial y la distribución de tamaños de poro de las membranas. Este análisis es fundamental para entender cómo cada material contribuye al rendimiento de la membrana en términos de capacidad de adsorción y filtración
Espectroscopía de Infrarrojo (FTIR)	Se utilizó para identificar los grupos funcionales en las membranas, lo que ayudó a entender las interacciones químicas entre el quitosano y la alfa-alúmina y cómo estas afectan las propiedades de adsorción de la membrana.

3.3.4 Evaluación de la Capacidad de Filtración

Se realizaron pruebas de filtración de nanopartículas y gases contaminantes para evaluar la eficacia de las membranas en la separación y retención de partículas. (Anexo) Las pruebas incluyeron la exposición a aerosoles y humos con partículas a diferentes concentraciones, y la medición de la cantidad de nanopartículas que la membrana era capaz de retener ^[42].

Capítulo 4: Resultados

El objetivo principal de este estudio fue evaluar la compatibilidad y el rendimiento de un sistema de membranas de quitosano soportadas en alfa-alúmina para la separación y retención de nanopartículas presentes en humos y gases. En la revisión de la literatura existente, el análisis teórico de las propiedades de los materiales involucrados, y los modelos de desempeño de las membranas en escenarios de filtración industrial. A continuación, se detallan los principales hallazgos teóricos relacionados con el comportamiento de las membranas y su potencial aplicación en la captura de nanopartículas.

Si bien se tenía la intención de realizar pruebas experimentales detalladas para caracterizar el comportamiento de las membranas en condiciones reales de filtración, el análisis se concluyó a nivel teórico debido a la limitación de recursos y la falta de acceso a los equipos experimentales necesarios, como los sistemas de filtración para pruebas de permeabilidad, capacidad de adsorción y retención de partículas.

4.1 Evaluación Teórica de las Propiedades de la Membrana

A partir de las características conocidas del quitosano y de la alfa-alúmina, se realizaron cálculos teóricos relacionados con la capacidad de adsorción, permeabilidad y resistencia térmica de las membranas compuestas. La Tabla 13 presenta los principales parámetros analizados

Tabla 13. Parámetros analizados relacionados a las membranas compuestas, Elaboración Propia.

Parámetros analizados	Características
1.- Capacidad de adsorción	- Se estima que el quitosano, debido a su alta área superficial y la presencia de grupos funcionales como los amino y hidroxilo, tiene una alta capacidad de adsorción de nanopartículas. Teóricamente, esta capacidad podría ser complementada por la estructura porosa de la alfa-alúmina, que proporciona una mayor área superficial para la interacción con las partículas a filtrar. - De acuerdo con sus características estructurales, la combinación de ambos materiales debería resultar en una membrana con una capacidad de adsorción superior a la de materiales convencionales de filtración.
2.- Permeabilidad	- A nivel teórico, se modeló la permeabilidad de la membrana para evaluar su rendimiento en la separación de nanopartículas. - Se espera que la alfa-alúmina actúe como un soporte robusto que mantenga la integridad estructural de la membrana incluso a altas temperaturas, mientras que el quitosano podría influir en la permeabilidad de esta, debido a su capacidad para formar una película relativamente densa.

3.- Resistencia térmica y mecánica	- Basado en los datos disponibles sobre la alfa-alúmina, se estima que la membrana compuesta podría soportar temperaturas superiores a los 1000°C sin perder su estructura, lo que la hace ideal para aplicaciones en ambientes industriales de alta temperatura. - La estabilidad térmica del quitosano, aunque limitada a temperaturas más bajas, se vería mejorada al estar soportada sobre la alfa-alúmina. - Se calcula que la resistencia mecánica de la membrana compuesta sería adecuada para resistir las condiciones de filtración, aunque con una flexibilidad moderada debido a la naturaleza del quitosano.
---	--

4.2 Resultados de las Simulaciones

Los resultados obtenidos de las investigaciones sugieren que la combinación de quitosano y alfa-alúmina tiene un comportamiento positivo en términos de la **retención de nanopartículas** y la **reducción de la concentración de contaminantes en gases**. A continuación, se presentan los principales hallazgos teóricos:

4.2.1 Análisis de la retención de nanopartículas:

Se determinó que las membranas compuestas podrían lograr una retención de nanopartículas de más del 90%, dependiendo del tamaño y carga de las partículas presentes en los humos y gases. Las partículas más grandes (en el rango de micrómetros) son retenidas eficientemente por la estructura porosa de la alfa-alúmina, mientras que las nanopartículas más pequeñas se adsorben principalmente sobre la superficie activa del quitosano.

4.2.2 Reducción de contaminantes

La información encontrada, muestra que la membrana compuesta podría ser eficaz en la eliminación de contaminantes gaseosos, como compuestos orgánicos volátiles (COVs) o gases ácidos, debido a la capacidad de adsorción química del quitosano. Se espera que esta capacidad de adsorción, combinada con la estabilidad térmica de la alfa-alúmina, permita una alta eficiencia de filtración incluso en condiciones de exposición prolongada.

5.- Conclusiones

En el presente estudio, se ha investigado el desarrollo de un sistema de membrana compuesto por quitosano soportado en alfa alúmina, orientado a la separación y retención de nanopartículas en humos y gases. Durante la investigación, se ha analizado de manera teórica la capacidad de este sistema para actuar como barrera eficiente contra la transmisión de partículas a nivel nanométrico, evaluando sus propiedades fisicoquímicas, su estabilidad térmica y su eficacia potencial en entornos industriales.

Sin embargo, es importante destacar que la validación práctica de estos resultados sigue siendo un paso crucial para confirmar la viabilidad industrial del sistema. La falta de equipo especializado para realizar ensayos experimentales a gran escala ha sido una limitación importante que restringió la profundización en el estudio.

Los resultados obtenidos indican que el sistema de membrana de quitosano soportada en alfa alúmina muestra un gran potencial como tecnología para la separación y retención de nanopartículas en humos y gases. No obstante, se recomienda continuar con la investigación, específicamente con la adquisición de equipo especializado, para llevar a cabo pruebas experimentales que validen y optimicen los resultados obtenidos en esta investigación. Este estudio abre la puerta a futuras exploraciones que permitan un desarrollo práctico de esta tecnología, con aplicaciones potenciales en la industria de control de emisiones y filtración de aire.

6.- Competencias Desarrolladas

A lo largo del desarrollo del proyecto de investigación: *"Estudio de un sistema de Membrana de quitosano soportada en alfa alúmina para la separación y retención de nanopartículas en humos y gases"*, se lograron adquirir y perfeccionar un conjunto de competencias técnicas, científicas y metodológicas esenciales para el ámbito académico y profesional. Estas competencias abarcan diferentes atributos de egreso que se detallan a continuación:

1. AE1. Identificar, resolver y formular problemas de Ingeniería Ambiental aplicando conocimientos de ciencias básicas y ciencias de la ingeniería:

El proyecto implica la resolución de un problema ambiental relacionado con la separación y retención de nanopartículas contaminantes (SiO_2 , C y ZnO) utilizando una membrana de quitosano, lo que demanda la aplicación de conocimientos tanto de ciencias básicas (como la química, biología y física) como de ingeniería ambiental para desarrollar una solución efectiva.

2. AE2. Analizar, aplicar, proponer y gestionar procesos de diseño de Ingeniería que resulten en proyectos sustentables que cumplen las necesidades o requerimientos especificados. _

El proyecto se centra en el diseño de un sistema de membrana que utiliza materiales biocompatibles y sostenibles (como el quitosano) para el tratamiento de contaminantes, lo que tiene un enfoque claro hacia la sustentabilidad. El diseño también busca satisfacer la necesidad de filtrar contaminantes de forma eficiente y con un impacto ambiental mínimo.

3. AE3. Analizar, utilizar e interpretar los datos obtenidos a partir de la experimentación mediante el juicio ingenieril estableciendo planes de acción y diseño de procesos o equipos, además con el uso de TIC's y Software de aplicación ambiental.

El proyecto requiere la interpretación de datos experimentales relacionados con la eficiencia de la membrana en la retención de nanopartículas, lo que involucra análisis y uso de herramientas tecnológicas (como software para modelar y analizar datos de filtración o simulaciones del proceso). Estos datos se utilizarán para optimizar el proceso y los resultados obtenidos.

4. AE5. Reconocer sus responsabilidades éticas y profesionales en situaciones relevantes para la Ingeniería, mediante juicios informados que consideren el impacto de las soluciones de Ingeniería Ambiental en los contextos global, económico, ambiental y social, así como las implicaciones normativas de la legislación ambiental, atendiendo la actualización profesional y permanente, mediante la investigación y emprendimiento.

El proyecto tiene un impacto potencial tanto en el área ambiental como en la salud pública, ya que busca mitigar la contaminación por nanopartículas. Además, es importante que el proyecto considere las implicaciones de las normativas ambientales y la ética profesional al proponer una solución que sea viable y tenga un bajo impacto ecológico. El uso de materiales naturales y la potencial aplicabilidad en diversas industrias también requiere una reflexión ética sobre su implementación.

5. **AE6. Promover y proteger la integridad y la salud de los trabajadores, generando acciones de prevención y control de accidentes y/o enfermedades de trabajo, gestionando los factores laborales y ambientales a los que están expuestos los trabajadores en diversas áreas, como tratamiento de aguas, gestión de residuos, contaminación de suelos y contaminación atmosférica.**

El proyecto, al abordar la separación de nanopartículas, puede ser relevante en sectores industriales donde los trabajadores están expuestos a estos contaminantes. El desarrollo de tecnologías de tratamiento como esta membrana tiene el potencial de mejorar las condiciones laborales al mitigar los riesgos asociados con la exposición a sustancias peligrosas como las nanopartículas de SiO₂, C y ZnO.

6. **AE7. Estructurar y aplicar proyectos para el dimensionamiento, adecuación, operación, mantenimiento y desarrollo tecnológico de tratamiento, prevención, control y transformación de efluentes sólidos, líquidos y gaseosos contaminantes.**

Este atributo está alineado con el proyecto, ya que implica el desarrollo de una tecnología para la retención y separación de nanopartículas en diferentes fases (sólida, líquida o gaseosa). Aunque el foco principal está en la filtración, el concepto de "transformación" y "control" de los contaminantes también se aplica a este proyecto, que busca diseñar un sistema que prevenga la liberación de nanopartículas peligrosas en el medio ambiente.

7. **AE8. Aplicar Sistemas de Gestión Ambiental de acuerdo con la normatividad nacional e internacional vigente, con responsabilidad y compromiso en la protección ambiental en las empresas y en la gestión de proyectos, involucrando las tres áreas más significativas: suelo, agua y aire.**

El proyecto tiene el potencial de contribuir al diseño de un sistema de gestión ambiental que considere la remoción de contaminantes del aire, agua o suelos, específicamente aquellas partículas peligrosas como SiO₂, C y ZnO. El diseño de un sistema que pueda integrarse en industrias de diversas áreas (como tratamiento de aguas o control de emisiones) podría alinearse con los principios de normatividad ambiental tanto nacional como internacional.

7.- Fuentes de Información

Nota: Se adjunta la liga a la Hoja de Cálculo con las Fuentes de Información estudiadas. El contexto en el presente proyecto de investigación y el Link para acceso:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1PvflXp8shg3nNWbVcPauHVLOofevV7ZY/edit?usp=sharing&oid=118323280883959555449&rtpof=true&sd=true>

[1] Mosa, J., "Membranas inorgánicas e híbridas orgánico - inorgánicas para pilas de combustibles de intercambio de protones (PEMFC)", Tesis de Doctorado en Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España (2008).

[2] [HERNANDEZ COCOLETZI, H.](#) et al. Obtención y caracterización de quitosano a partir de exoesqueletos de camarón. *Superf. vacío* [online]. 2009, vol.22, n.3, pp.57-60. ISSN 1665-3521.

[3] Lim, Y. y otros ocho autores, *Preparation and characterization of proton exchange poly (ether sulfone)s membranes grafted propane sulfonic acid on pendant phenyl groups*, *Electrochimica Acta*: 118(1), 18-25 (2014).

[4] Smitha, B., S. Sridhar, y A. Khan, *Synthesis and characterization of nanoparticles*, *Journal of Power Sources*: 159(2), 846-854 (2006).

[5] Mosa, J., "Membranas inorgánicas e híbridas orgánico - inorgánicas para aumentar la selectividad de intercambio de protones (PEMFC)", Tesis de Doctorado en Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España (2008).

[6] Park H. M., L. W. (2003). Environmentally friendly polymer hybrids. Part I. Mechanical, thermal and barrier properties of thermoplastic starch/clay nanocomposites. *Journal of Material Science*, 38: 909-915.

[7] Riau, Andri K.; Mondal, Debasish; Setiawan, Melina; Palaniappan, Alagappan; Yam, Gary H. F.; Liedberg, Bo; Venkatraman, Subbu S.; Mehta, Jodhbir S. (28 de diciembre de 2016). "Functionalization of the Polymeric Surface with Bioceramic Nanoparticles via a Novel, Nonthermal Dip Coating Method". *ACS Materials & Interfaces aplicados*. **8** (51): 35565-35577. doi:10.1021/acsami.6b12371. hdl:10356/80680. ISSN 1944-8244.

[8] Paglia, G. (2004). «[Determination of the structure of \$\gamma\$ -Alumina using empirical and first principles calculations combined with supporting experiments](#)» (free download). Perth, Australia: Curtin University of Technology. Consultado el 5 de mayo de 2009.

[9] Gómez-Garzón, M. (2018). Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde. *Revista Repertorio de Medicina y Cirugía*, 27(2).

[10] Gómez-Garzón, M. (2018). Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde. *Revista Repertorio de Medicina y Cirugía*, 27(2).

[11] Yamakawa, H. (2001). Modern theory of polymer solutions. Harper & Row Publishers Inc, Electronic edition.

[12] Lárez, C. (2006). Quitina y quitosano: Materiales del pasado para el presente y el futuro. *Avances en química*, 1:15-21.

- [13] yen, M., Joan Yang y JengMau (2009). Physicochemical characterization of chitin and chitosan from shells. *Carbohydrate polymers*, 75:15-21.
- [14] yen, M., Joan Yang y JengMau (2009). Physicochemical characterization of chitin and chitosan from shells. *Carbohydrate polymers*, 75:15-21.
- [15] Alvanegra, E., Cristiane Pereira y Carlos Bellato (2010). An approach to understanding the deacetylation degree of chitosan. *Carbohydrate polymers*, 80:1155-1160.
- [16] Khor, E. y Lee Y. Lim (2003). Implantable applications of chitin and chitosan. *Biomaterials*, 24:2339-2349.
- [17] Khor, E. y Lee Y. Lim (2003). Implantable applications of chitin and chitosan. *Biomaterials*, 24:2339-2349.
- [18] Dash, M., F. Chiellini, R.M. Ottenbrite y E. Chiellini (2011). Chitosan-A versatile semisynthetic polymer in biomedical. *Progress in polymer science*, 36:981-1014.
- [19] Dash, M., F. Chiellini, R.M. Ottenbrite y E. Chiellini (2011). Chitosan-A versatile semisynthetic polymer in biomedical. *Progress in polymer science*, 36:981-1014.
- [20] Rinaudo, M. (2006). Chitin and Chitosan: Properties and applications. *Progress in polymer science*, 31:603-632.
- [21] Rinaudo, M. (2006). Chitin and Chitosan: Properties and applications. *Progress in polymer science*, 31:603-632
- [22] Alonso, A. Á., Alonso, J. A., Duménigo, M., & Castellanos, J. *Estudio de las propiedades físico-químicas de las pulpas acuosas de minerales lateríticos*.
- [23] Alonso, A. Á., Alonso, J. A., Duménigo, M., & Castellanos, J. *Estudio de las propiedades físico-químicas de las pulpas acuosas de minerales lateríticos*.
- [24] Rodríguez, G. P., Rivera, F. G., & Aza, S. (1999). Obtención industrial de materiales cerámicos a partir de lodos rojos del proceso Bayer. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 38(3), 220-226.
- [25] DORRE, E.; HUBNER. H., "Alumina: Processing, Properties and Applications". Berlin, Hhidelberg: Springer-Verlag, 1984.
- [26] DORRE, E.; HUBNER. H., "Alumina: Processing, Properties and Applications". Berlin, Hhidelberg: Springer-Verlag, 1984.
- [27] MARIA, M. R. J. (1997). *Síntesis y aplicaciones catalíticas de alfa-fosfato de circonio con pilares de alamina* (Doctoral dissertation, Universidad de Málaga).
- [28] M.T. Qurashi, H.S Blair, S.J Allen, Studies on modified chitosan membranes I. Preparation and characterization, *J. Appl. Pol. Sci.* 46 (2) (1992) 255-261.
- [29] M.T. Qurashi, H.S Blair, S.J Allen, Studies on modified chitosan membranes I. Preparation and characterization, *J. Appl. Pol. Sci.* 46 (2) (1992) 255-261.
- [30] Harris R. 2010. Madrid, Quitosano, un biopolímero con aplicaciones en sistemas de Membranas Cerámicas. Ruth Expósito Harris, 2010. Madrid. Doctorado. Universitas

Complutensis.<https://docta.ucm.es/rest/api/core/bitstreams/0ba2b083-0b67-43d8-93ba-ba1e79f5cd1b/content>.

[31] Harris R. 2010. Madrid, Quitosano, un biopolímero con aplicaciones en sistemas de Membranas Cerámicas. Ruth Expósito Harris, 2010. Madrid. Doctorado. Universitas Complutensis.<https://docta.ucm.es/rest/api/core/bitstreams/0ba2b083-0b67-43d8-93ba-ba1e79f5cd1b/content>.

[32] Miranda, S. P., Cárdenas, G., López, D., & Sagahon, A. V. L. (2003). Comportamiento de películas de quitosán compuesto en un modelo de almacenamiento de aguacate. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 47(4), 331-336.

[33] ALVES, N., MANOA, J., "Chitosan derivatives obtained by chemical modifications for biomedical and environmental applications", *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 43, n. 5, pp. 401-414, 2008.

[34] Reynoso, S. 2016. Síntesis y caracterización de membranas de ZIF, soportadas en alfa-alumina. La Referencia, (11799/65772). Recuperado desde: https://www.lareferencia.info/vufind/Record/MX_3bf7f452dc16e9bdb9248e4af989e169

[35] Rojas, L. (2021). Estudio de biocompatibilidad de membranas ultradelgadas de quitosano como sustituto dérmico, empleando células madre mesenquimales y queratinocitos. *SciELO*. (VOL. 44). Recuperado desde: https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0376-78922018000100003

[36] Muraviev, D. (1948). Desarrollo de nuevas membranas compuestas para la separación de iones metálicos y aplicaciones electroquímicas. (VOL. 24/343). Recuperado desde: <https://ddd.uab.cat/record/38122>

[37] Miranda, S. P., Cárdenas, G., López, D., & Sagahon, A. V. L. (2003). Comportamiento de películas de quitosán compuesto en un modelo de almacenamiento de aguacate. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 47(4), 331-336.

[38] Espinosa-Cavazos, K.G. et al. "Películas de quitosano propiedades y aplicaciones". *Afinidad. Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*, vol.VOL 77, no. 591, <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/377418>.

[39] Mancilla, Andrea. (2016). Propiedades fisicoquímicas y antibacteriales de mezclas PLA-Quitosano obtenidas por casting con potencial uso como acolchados agrícolas. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, (0718-8706). Recuperado desde: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/34240>

[40] Sánchez, E. (2021). Síntesis de membranas cerámicas para la regeneración de baños de cromados agotados. *Boletín de la Sociedad Española*, (VOL 67, no. 591). Recuperado desde: https://www.researchgate.net/profile/Sergio-Mestre/publication/28303758_Sintesis_de_membranas_ceramicas_para_la_regeneracion_de_banos_de_cromado_agotados/links/553792590cf268fd0018a559/Sintesis-de-membranas-ceramicas-para-la-regeneracion-de-banos-de-cromado-agotados.pdf

[41] Chariguamán, J. A. (2015). *Caracterización de bioplástico de almidón elaborado por el método de casting reforzado con albedo de maracuyá (Passiflora edulis spp.)* (Doctoral dissertation, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2015.).

- [42] Inchaurregui, Vianey. Febrero.2020. Diseño y evaluación de filtro purificador de agua a partir de nanopartículas manufacturadas, nanopartículas del suelo y materiales reciclados. Ciudad de México. TESIS. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. [SSIT0016630.pdf](#)
- [43] (Merino, Danila. (2016). Propiedades fisicoquímicas y antibacteriales de mezclas PLA-Quitosano obtenidas por casting con potencial uso como acolchados agrícolas. Avances en Ciencias e Ingeniería, (0718-8706). Recuperado desde: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/34240>
- [44]. Zulay, M., et.al. (2011). QUITINA Y QUITOSANO POLÍMEROS AMIGABLES, UNA REVISIÓN DE SUS APLICACIONES. Universidad Rafael Urdaneta. Maracaibo. 53-54 pp. (12 de febrero de 2018, 17:00 hrs). <http://uru.edu/fondoeditorial/revista/pdf/rtu/TCUn1/Quitina%20y%20quitosano.pdf>
- [45] A. Paulino, J. Simionato, J. Garcia and J. Nozaki. “Characterization of chitosan and chitin produced from silkworm chrysalides”. Carbohydrate Polymers, 64, 98–103, 2006.
- [46] VARELA, F. (2001). Mejoramiento del proceso de precipitación de partículas superfinas de alúmina de CVG Bauxilum. Trabajo Especial de Grado. Universidad de Carabobo, Valencia
- [47] Shafik, N. y S. Bandyopadhyay (1992): “Economic Development and Environmental Quality: Time-Series and Cross-Country Evidence”, Policy Research Working Paper 904 y Background Paper for the World Development Report 1992 (Oxford University Press), Banco Mundial, Washington D.C.
- [48] Pezzey, J. (1992): “The Symmetry between Controlling Pollution by Price and Controlling it by Quantity”, Canadian Journal of Economics, n.º 25, págs. 983-991
- [49] Pearce, D.W. (1994): “Costing the Environmental Damage from Energy Production”, CSERGE, University College London y University of East Anglia
- [50] OFICO (1995a): Boletín Anual de Emisiones de Contaminantes de Centrales Térmicas. Año 1994, Oficina de Compensaciones de la Energía Eléctrica, Madrid
- [51] Carey R (2008) Depth filtration VS Cross flow: Novel filter sheets give new life to the older technology. Wines & Vines.
- [52] Choa V, Bo MW and Chu J (2009) A new type of fabricated vertical drain with improved properties. Geotextiles Geomembranes. 27, 152-155.
- [53] Dorman RG (1964) Filter materials. In: P. A. F. White and S.E. Smith, Editors, High efficiency air filtration, Butterworths, London, pp100–118.
- [54] Higgins T (2003) Advances in filtration technology are making new products possible in food and beverage. Dairy Foods.
- [55] HOUGEN, O.A., K.M. WATSON, and R.H., RAGATZ, Chemical Process Principles, Part I, Material and Energy Balances, 2nd ed., John Wiley & Sons (1954).
- [56] RANDOLPH, A.D., and M.A. LARSON, Theory of Particulate Processes, 2nd ed., Academic Press, New York (1988)

- [57] GEANKOPLIS, C.J. *Transport Processes and Unit Operations*, 3rd ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ (1993)
- [58] W. Lee, P. Tseng, D. Di Carlo, *Microtecnología para la manipulación y clasificación de células*, Springer, Suiza 2017.
- [59] International Organization for Standardization. (2015). *ISO 9001:2015 – Sistemas de gestión de la calidad*. <https://www.iso.org/standard/62085.html>
- [60] International Organization for Standardization. (2016). *ISO 13485:2016 – Dispositivos médicos: Sistemas de gestión de la calidad para la fabricación de dispositivos médicos*. <https://www.iso.org/standard/59752.html>
- [61] ASTM International. (2018). *ASTM D751-18 – Métodos de prueba de permeabilidad de membranas*. <https://www.astm.org/Standards/D751.htm>
- [62] International Organization for Standardization. (2012). *ISO 12500-3:2012 – Filtros de aire de alta eficiencia – Parte 3: Métodos de ensayo de la eficiencia de los filtros de aire de alta eficiencia para partículas*. <https://www.iso.org/standard/55573.html>
- [63] International Organization for Standardization. (2015). *ISO 14001:2015 – Sistemas de gestión ambiental*. <https://www.iso.org/standard/60857.html>
- [64] Occupational Safety and Health Administration. (n.d.). *29 CFR 1910.1000 – Normas de salud y seguridad ocupacional*. U.S. Department of Labor. <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910>
- [65] European Union. (2006). *Reglamento (EC) No 1907/2006 – REACH: Registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias y mezclas químicas*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32006R1907>
- [66] International Organization for Standardization. (1996). *ISO 13321:1996 – Técnicas de dispersión de partículas*. <https://www.iso.org/standard/17128.html>
- [67] ASTM International. (2008). *ASTM E2523-08 – Métodos de medición de la concentración de nanopartículas en aire*. <https://www.astm.org/Standards/E2523.html>
- [68] International Organization for Standardization. (2018). *ISO 2781:2018 – Determinación de la densidad aparente de las partículas*. <https://www.iso.org/standard/70279.html>
- [69] ASTM International. (2020). *ASTM F329-05(2020) – Caracterización de materiales compuestos para filtración*. <https://www.astm.org/Standards/F329.html>
- [70] International Organization for Standardization. (n.d.). *ISO 16890 – Filtros de aire para la purificación del aire*. <https://www.iso.org/standard/67807.html>
- [71] International Organization for Standardization. (2015). *ISO 14644-1:2015 – Clases de limpieza del aire*. <https://www.iso.org/standard/53341.html>
- [72] ASTM International. (2014). *ASTM F1605-14 – Evaluación del rendimiento de membranas en procesos de separación*. <https://www.astm.org/Standards/F1605.htm>

[73] International Organization for Standardization. (2018). *ISO 10787:2018 – Determinación de la eficiencia de separación de membranas*. <https://www.iso.org/standard/70290.html>

[74] ONU, (2015), Objetivos de Desarrollo Sostenible. Naciones Unidas.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

8.- Anexos

Anexo 1. Glosario

1. Membranas:

Estructuras delgadas, generalmente de material poroso, utilizadas para filtrar o separar sustancias, como partículas, moléculas o iones, de un fluido (líquido o gas).

2. Quitosano:

Polímero natural derivado de la quitina, que se obtiene principalmente de los exoesqueletos de crustáceos. Es conocido por sus propiedades biodegradables, no tóxicas y sus aplicaciones en procesos de separación y filtración.

3. Alfa-alúmina:

Forma estabilizada del óxido de aluminio (Al_2O_3), utilizada como soporte en diversas aplicaciones industriales debido a su alta resistencia térmica, durabilidad y propiedades de adsorción.

4. Bayerita:

Mineral que contiene alúmina hidratada, un componente importante en el proceso de extracción del aluminio, que puede estar presente como impureza en los materiales utilizados en la síntesis de alfa-alúmina.

5. Nanopartículas:

Partículas extremadamente pequeñas, generalmente con un tamaño menor a 100 nanómetros, que poseen propiedades fisicoquímicas únicas debido a su tamaño reducido. Son utilizadas en una amplia gama de aplicaciones, incluidas las de filtración y separación.

6. Contaminación:

Presencia de sustancias nocivas o contaminantes en el aire, agua o suelo que puede tener efectos adversos sobre la salud humana, el medio ambiente y los ecosistemas. En este contexto, se refiere específicamente a la contaminación del aire debido a nanopartículas presentes en los gases y humos industriales.

7. Filtración:

Proceso de separación de partículas sólidas de un fluido (líquido o gas) mediante el uso de una membrana u otro material poroso que retiene las partículas no deseadas.

8. Adsorción;

Proceso en el cual moléculas o partículas se adhieren a la superficie de un sólido. Es fundamental en la captura de contaminantes o nanopartículas por parte de los materiales utilizados en las membranas.

9. Separación de partículas:

Proceso que implica la discriminación de partículas según su tamaño, forma, carga o propiedades fisicoquímicas, utilizado en la purificación de gases o líquidos.

10. Nanotecnología:

Campo de la ciencia y la ingeniería dedicado al diseño, síntesis y aplicación de estructuras, dispositivos y sistemas a escala nanométrica (generalmente entre 1 y 100 nanómetros), que tiene aplicaciones significativas en la medicina, la electrónica, la energía y la contaminación.

11. Eficiencia de separación:

Medida de la capacidad de un sistema (como una membrana) para separar con éxito los componentes deseados (por ejemplo, nanopartículas) de un flujo de gas o líquido.

12. Membrana compuesta:

Tipo de membrana que consta de múltiples capas de materiales, combinando las propiedades de diferentes materiales para mejorar su rendimiento, resistencia y selectividad en procesos de separación.

13. Humos industriales:

Gases o vapores emitidos durante procesos industriales, a menudo contaminados con partículas finas, metales pesados y compuestos orgánicos, que pueden tener efectos adversos en la salud y el medio ambiente.

14. Permeabilidad:

Propiedad de un material que indica su capacidad para permitir el paso de un fluido (gas o líquido) a través de él. En el contexto de membranas, se refiere a la facilidad con la que las partículas o gases atraviesan la estructura de la membrana.

15. Porosidad

Característica física que describe la cantidad y distribución de los poros en un material, que influye en su capacidad para adsorber, filtrar y separar partículas o sustancias.

Anexo 2. Caracterización del Quitosano

Los análisis de las muestras en el laboratorio, para la obtención del biopolímero Quitosano, cuyo rendimiento global de la operación comprobó la certeza del protocolo del proceso de obtención.



Figura 11. Pesado de la Muestra. Elaboración Propia.



Figura 12. Triturado de la muestra. Elaboración Propia.



Figura 13. Pesado y preparación de soluciones. Elaboración Propia.



Figura 14. Preparación de Solución de HCL. Elaboración Propia

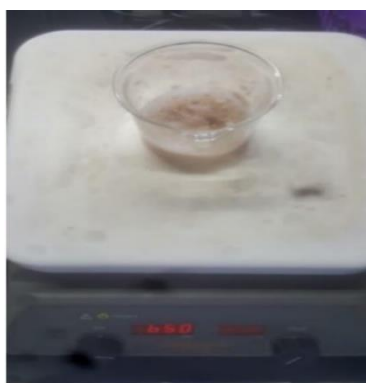


Figura 15. Tratamiento de Desmineralización. Elaboración Propia



Figura 16. Preparación de solución de Etanol. Elaboración Propia

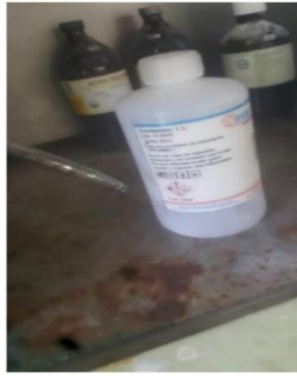


Figura 17. Preparación de solución de NaOH. Elaboración Propia.



Figura 18. Tratamiento de Pigmentación. Elaboración Propia



Figura 19. Obtención del Quitosano. Elaboración Propia

Anexo 3. El proceso Casting para la Síntesis de Membranas

A continuación, se detalla esquemáticamente el proceso Casting ^[43].

Tabla 14. Análisis del Proceso Casting. González I, 2019.

Proceso Casting	
1.- El proceso inicia con la preparación de una solución de quitosano, que generalmente se obtiene disolviendo el quitosano en una mezcla de ácido acético diluido o en otro disolvente adecuado que permita la solubilidad del biopolímero	La concentración de quitosano en la solución puede variar dependiendo de las propiedades deseadas para la membrana final, como la porosidad y la flexibilidad.
2.- Una vez obtenida la solución, esta se vierte sobre una superficie plana y se extiende uniformemente para formar una capa delgada.	El espesor de la película resultante puede controlarse ajustando la cantidad de solución vertida y la técnica de extendido, que puede implicar el uso de una espátula o un rodillo para garantizar una distribución uniforme.
3.- El siguiente paso es la evaporación del solvente, que se realiza típicamente en condiciones controladas de temperatura y humedad. Durante esta fase, el solvente se evapora lentamente, dejando atrás la membrana de quitosano que se va solidificando y endureciendo.	El tiempo y las condiciones de secado son cruciales para obtener membranas con la calidad deseada, ya que una evaporación rápida puede dar lugar a la formación de defectos o una estructura irregular.
4.- Finalmente, la membrana obtenida puede someterse a un proceso de curado o tratamiento adicional para mejorar su resistencia mecánica o sus propiedades específicas, como la impermeabilidad o la capacidad de adsorción.	Este tratamiento puede incluir el uso de una solución de endurecimiento o el secado a temperaturas más altas

El método Casting es ideal para la producción de membranas de quitosano debido a su capacidad para producir estructuras finas y uniformes que son adecuadas para aplicaciones en filtración, separación de partículas y en tecnologías de purificación de líquidos o gases.

Anexo 4. Purificación de la Quitina a partir de la Caridea

Una de las fuentes de obtención de Quitina es el exoesqueleto del camarón, a partir del cual se obtiene desacetilando la quitina. En el procedimiento, se sustituyen los grupos acetamido por grupos amino. Y finalmente se precipita y purifica ^[45]. La Tabla 15 une el proceso de obtención con el proceso que debe seguirse.

Tabla 15. Procedimiento para la purificación de la Quitina. Gacén J, 2018.

1.1 Recortar y machacar las cáscaras de camarón con ayuda del mortero. Anotar la masa de la cáscara a agitar.	1.2 En un vaso de precipitados, realizar una solución 1M de ácido clorhídrico (HCl), y colocar las cáscaras anteriormente trituradas.	1.3 Con ayuda de un agitador magnético, dejar agitar la solución con las cáscaras por 24 horas mínimo
1.4. Posteriormente, filtrar el resultado del paso 1.3 por medio de papel filtro. Tirar los restos de cáscara de camarón.	1.5 Realizar una solución 1M de hidróxido de sodio (NaOH), con la finalidad de neutralizar nuestra solución a un pH 7.	1.6 Filtrar nuevamente la solución neutralizada por medio de papel filtro.

Anexo 5. Proceso Bayer para la obtención de Alúmina

El proceso Bayer consiste principalmente en la disolución de la bauxita en una solución de NaOH, seguida por la separación de los residuos insolubles, la precipitación del hidróxido de aluminio, y su posterior calcinación para obtener alúmina ^[46]. Este proceso es fundamental para la industria del aluminio, ya que permite extraer de manera eficiente el óxido de aluminio de la bauxita.

Proceso Bayer para la Obtención de Alúmina

1. Trituración y Molienda de la Bauxita:

- La bauxita, una roca sedimentaria rica en óxidos de aluminio (principalmente gibbsite, bohemita y diasporo), se extrae de yacimientos mineros.
- La bauxita se tritura y muele para obtener un polvo fino que facilite su tratamiento en las etapas posteriores.

2. Digestión con Hidróxido de Sodio (NaOH):

El polvo de bauxita se mezcla con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) a alta temperatura y presión en un digestor (o autoclave).

En este paso, el óxido de aluminio se disuelve selectivamente en el hidróxido de sodio, formando aluminato de sodio.

Otros minerales de la bauxita, como la sílice (SiO_2), no reaccionan con el NaOH y permanecen en la solución en forma de lodos.

3. Separación de la Solución de Aluminato de Sodio:

Después de la digestión, la mezcla se enfría y se filtra para separar el aluminato de sodio disuelto de los residuos insolubles, como la sílice y otros minerales presentes en la bauxita. Estos residuos se denominan lodos rojos.

4. Precipitación de Hidróxido de Aluminio:

La solución filtrada de aluminato de sodio se enfría y se introduce en un proceso de precipitación, generalmente mediante la adición de una solución diluida de aluminato de sodio.

5. Filtración y Lavado:

El hidróxido de aluminio precipitado se filtra y se lava para eliminar los residuos de solución de NaOH y otros compuestos solubles.

6. Obtención de Alúmina:

Finalmente, el óxido de aluminio (alúmina) obtenido es el material que se utilizará en la producción de aluminio metálico, generalmente mediante el proceso de electrólisis en celdas de Hall-Héroult.

Anexo 6. Técnicas de obtención de las Membranas de Quitosano

Las membranas de quitosano se obtienen mediante diversas técnicas, que incluyen el moldeo por solución (casting), electrospinning, gelificación, coagulación y composición con otros polímeros ^[55]. Cada técnica tiene ventajas y se adapta a diferentes aplicaciones, desde la biomedicina hasta la filtración y protección ambiental.

A continuación, se recopilaron las Técnicas más importantes para la Obtención de Membranas de Quitosano.

1.-Técnica de Moldeo por Solución (Casting)

Esta es una de las técnicas más comunes y simples para la obtención de membranas de quitosano. En este proceso, el quitosano se disuelve en un solvente adecuado, como el ácido acético o agua, para formar una solución viscosa. Luego, la solución se vierte sobre una superficie plana (generalmente una placa de vidrio) y se deja secar a temperatura ambiente o en una estufa controlada ^[56].

Proceso:

- Preparar la solución de quitosano disolviendo el quitosano en el solvente adecuado.
- Verter la solución sobre un molde plano.
- Dejar secar la solución hasta que se forme una película sólida.
- Retirar la película de quitosano del molde y, si es necesario, cortar o dar forma a la membrana.

Ventajas: Método sencillo, económico, y adecuado para obtener membranas de tamaño y espesor controlado.

Aplicaciones: Membranas para aplicaciones biomédicas, como vendajes o sistemas de liberación controlada de fármacos.

2-Técnica de Electrospinning (Electrohilado)

El electrospinning es una técnica avanzada que utiliza un campo eléctrico para generar fibras ultrafinas a partir de una solución de quitosano. Estas fibras se depositan sobre una superficie, formando una membrana de fibras nanométricas ^[57]. El electrospinning es especialmente útil para obtener membranas con alta área superficial, porosidad y propiedades mecánicas mejoradas.

Proceso:

- Preparar una solución de quitosano disuelto en un solvente adecuado, como ácido acético o una mezcla de ácido acético y agua.
- Introducir la solución en una jeringa equipada con una aguja.

- Aplicar un alto voltaje entre la aguja y una colector, lo que provoca la formación de fibras de quitosano que se depositan sobre el colector.
- Recoger la membrana de fibras en el colector y secar si es necesario.

Ventajas: Permite obtener fibras muy finas con un alto control sobre la morfología de la membrana (porosidad y superficie).

Aplicaciones: Filtración, ingeniería de tejidos, y sistemas de liberación de fármacos.

3.- Técnica de Gelificación

En esta técnica, una solución de quitosano se mezcla con un agente gelificante, como el glutaraldehído o el ácido tánico, para inducir la formación de una gelatina en la que las moléculas de quitosano se entrelazan, formando una red tridimensional ^[58]. Este proceso es utilizado para obtener membranas con una estructura más rígida y con propiedades mecánicas mejoradas.

Proceso:

- Preparar la solución de quitosano en un disolvente adecuado (por ejemplo, ácido acético).
- Añadir el agente gelificante a la solución de quitosano y mezclar bien.
- Verter la solución en un molde y permitir que ocurra la gelificación.
- Una vez que la gelificación ha tenido lugar, se procede al secado de la membrana.

Ventajas: Mejora las propiedades mecánicas de la membrana, lo que la hace útil en aplicaciones estructurales.

Aplicaciones: Membranas para uso en ingeniería de tejidos y sistemas de liberación controlada de fármacos.

4.-Técnica de Coagulación (Coagulation Bath)

Este proceso implica la disolución de quitosano en un solvente como ácido acético, y luego la coagulación de la solución al sumergirla en un baño de coagulación, generalmente compuesto por una solución de ácido o una mezcla de agua y alcohol.

Proceso:

- Preparar la solución de quitosano en un solvente adecuado.
- Colocar la solución de quitosano en un molde o sobre una superficie.
- Sumergir la película en un baño de coagulación para que el quitosano se precipite y forme una membrana sólida.

- Enjuagar la membrana con agua para eliminar el exceso de solvente y dejarla secar.

Ventajas: Es un proceso relativamente simple y puede producir membranas con alta porosidad.

Aplicaciones: Membranas para filtración y como barreras en sistemas de liberación de fármacos.

5.- Técnica de Composición con otros Polímeros (Blending)

Para mejorar las propiedades del quitosano, este se puede combinar con otros polímeros (naturales o sintéticos) mediante técnicas de mezcla o disolución conjunta ^[58]. Esta estrategia puede mejorar características como la resistencia mecánica, la estabilidad térmica o la biodegradabilidad.

Proceso:

- Preparar soluciones de quitosano y el polímero complementario en disolventes apropiados.
- Mezclar ambas soluciones hasta obtener una mezcla homogénea.
- Proceder con las técnicas de formación de membranas, como el moldeo por solución o electro spinning.

Ventajas: Permite ajustar propiedades específicas de las membranas, como la flexibilidad o la resistencia química.

Aplicaciones: Membranas multifuncionales para aplicaciones biomédicas, empaques alimentarios, o protección ambiental.

Anexo 7. Principios básicos de la Separación de Partículas

Los principios básicos de la separación de partículas abarcan una variedad de fenómenos físicos y químicos, que incluyen el tamaño, la densidad, la forma, las propiedades electrostáticas, la viscosidad del medio, y las interacciones superficiales. La comprensión de estos principios permite la selección y optimización de técnicas de separación adecuadas para distintas aplicaciones industriales, contribuyendo a mejorar la eficiencia de los procesos y la calidad del producto final.

1. Tamaño de Partículas

El tamaño de las partículas es uno de los factores más importantes en la separación. Las técnicas de separación se diseñan para clasificar o separar partículas basándose en su diámetro o tamaño efectivo.

- Las partículas grandes pueden ser separadas por técnicas como la sedimentación o el tamizado, que permiten que las partículas de mayor tamaño se separen de las más pequeñas.
- Las partículas pequeñas o finas requieren técnicas como la centrifugación o la filtración, donde la velocidad y la capacidad de retención de los medios filtrantes juegan un papel clave.

2. Densidad de las Partículas

La diferencia en la densidad de las partículas es otro principio básico en la separación. Las técnicas que aprovechan esta propiedad incluyen:

- **Centrifugación:** Se basa en la diferencia de densidad para aplicar una fuerza centrífuga que hace que las partículas más densas se sedimenten más rápido que las de menor densidad.
- **Flotación:** Utiliza la diferencia de densidad para separar partículas en un líquido. Las partículas más densas se hunden mientras que las menos densas flotan.

3. Forma de las Partículas

La morfología o forma de las partículas también puede influir en la separación. Por ejemplo:

- Las partículas esféricas tienden a ser más fáciles de separar mediante tamizado o filtración, mientras que las partículas irregulares o alargadas pueden requerir técnicas especializadas, como la flotación.

- En procesos como la clasificación o el tamizado, las partículas de formas irregulares pueden no pasar tan fácilmente por los poros de un tamiz, ya que su geometría puede interferir con el paso de partículas más pequeñas.

4. Propiedades Electroestáticas

Las cargas eléctricas de las partículas pueden influir en su separación. El principio de separación electrostática se basa en la atracción o repulsión entre partículas con cargas opuestas o iguales. Técnicas como la electrofiltración y electrostatic separation se utilizan para separar partículas basadas en su carga.

5. Viscosidad del Medio

La viscosidad del fluido en el cual las partículas están suspendidas es un factor importante en muchos procesos de separación. A mayor viscosidad, mayor será la resistencia al movimiento de las partículas. Este principio se utiliza en procesos como:

- **Filtración:** En la que la alta viscosidad puede hacer más difícil el paso de partículas a través de un medio filtrante.
- **Centrifugación:** La viscosidad influye en la velocidad de sedimentación de las partículas.

6. Difusión Molecular y Browniana

Las partículas suspendidas en un fluido tienden a moverse de manera aleatoria debido a la agitación térmica del fluido (movimiento browniano). Este principio es utilizado en técnicas como la filtración y sedimentación, donde las partículas pequeñas se mueven hacia áreas donde las fuerzas de atracción entre partículas y superficies de filtro o sedimento facilitan la separación.

7. Interacción Superficial y Química

Las fuerzas de adhesión entre las partículas y las superficies en contacto son esenciales para la separación. Estas fuerzas pueden ser de naturaleza física (como la atracción van der Waals) o química (por ejemplo, interacciones iónicas, covalentes o de puentes de hidrógeno).

- Técnicas como la flotación o la adsorción de partículas en materiales específicos (como carbón activado o resinas) dependen de estas interacciones.
- En el caso de la filtración y centrifugación, las partículas pueden adherirse a la superficie de los filtros o al fondo del recipiente debido a su interacción con el medio.

Anexo 8. Tecnologías de Filtración

Las tecnologías de filtración de partículas son fundamentales para muchos procesos industriales, desde la purificación de agua hasta la producción de productos farmacéuticos ^[51]. La elección del filtro adecuado depende de las características de las partículas a separar (tamaño, forma, carga), del fluido en cuestión y de los requerimientos específicos de la aplicación.

A continuación, se reúnen las Tecnologías de Filtración conocidas más importantes ^[52].

1. Filtración Mecánica

La filtración mecánica es el proceso más común, en el que las partículas son retenidas en un medio por su tamaño. Esta técnica se utiliza ampliamente en la purificación de agua, en la separación de sólidos en líquidos, y en sistemas de tratamiento de aire.

1.1 Filtros de Malla o Tamiz

Consisten en una malla o tela con poros de tamaño controlado que permite el paso de líquidos o gases mientras retiene las partículas más grandes.

Aplicaciones: Tratamiento de aguas, filtración de jugos o aceites, procesos de reciclaje, y sistemas de ventilación.

Ventajas: Bajo costo y mantenimiento fácil, adecuado para partículas grandes.

1.2 Filtros de Cartucho

Estos filtros están compuestos por un material fibroso o una membrana que retiene las partículas. Los cartuchos son reemplazables o lavables, y se utilizan en una variedad de aplicaciones, desde la purificación de agua hasta procesos industriales.

Aplicaciones: Purificación de agua potable, filtración de líquidos en industrias alimentarias, farmacéuticas, cosméticas y en la industria del petróleo.

Ventajas: Eficiencia alta para partículas de tamaños medianos a pequeños, facilidad de reemplazo.

2. Filtración por Membranas

La filtración por membranas es un proceso avanzado en el que un fluido pasa a través de una membrana semipermeable que retiene partículas y otras impurezas, dejando pasar solo las moléculas o partículas más pequeñas ^[53].

2.1 Filtración de Ultrafiltración (UF)

Utiliza membranas con poros entre 1 y 100 nanómetros, lo que permite retener partículas grandes, bacterias y virus, mientras que el agua y otros pequeños compuestos pasan a través de la membrana.

Aplicaciones: Purificación de agua, tratamiento de aguas residuales, desmineralización de líquidos, y en la industria farmacéutica.

Ventajas: Alta capacidad de filtración, eliminando microorganismos y macromoléculas.

2.2 Nanofiltración (NF)

La nanofiltración tiene membranas con poros más pequeños que la ultrafiltración, generalmente entre 1 y 10 nanómetros. Es utilizada para eliminar sales, moléculas orgánicas y otros contaminantes más pequeños que no son eliminados por filtraciones de menor escala.

Aplicaciones: Purificación de agua potable, tratamiento de aguas residuales, eliminación de contaminantes en la industria alimentaria y química.

Ventajas: Alta eficiencia en la eliminación de sales y contaminantes a nivel molecular, baja energía comparada con la ósmosis inversa.

2.3 Ósmosis Inversa (RO)

La ósmosis inversa utiliza membranas semipermeables para filtrar pequeñas partículas, iones y compuestos disueltos de los líquidos ^[54]. Este proceso es muy eficaz para purificar agua y producir agua ultrapura.

Aplicaciones: Desalación de agua, purificación de agua potable, industria farmacéutica y alimentaria.

Ventajas: Alta eficiencia en la eliminación de contaminantes disueltos, eliminación casi total de sales y contaminantes orgánicos e inorgánicos.

3. Filtración por Adsorción

La adsorción es un proceso en el cual los contaminantes o partículas se adhieren a la superficie de un material adsorbente, como el carbón activado, las resinas o los materiales porosos. Este proceso se utiliza cuando se busca eliminar compuestos solubles, no solo partículas visibles.

3.1 Filtros de Carbón Activado

Los filtros de carbón activado son ampliamente utilizados para la adsorción de contaminantes orgánicos, gases y compuestos químicos. Las partículas de carbón tienen una gran área superficial que permite la adsorción de compuestos disueltos.

Aplicaciones: Purificación de agua, eliminación de olores y compuestos orgánicos volátiles (COVs) en sistemas de aire, tratamiento de aguas residuales industriales.

Ventajas: Eficaz para eliminar contaminantes orgánicos y gases, bajo costo operativo.

3.2 Resinas de Intercambio Iónico

Las resinas de intercambio iónico son materiales sintéticos que retienen iones presentes en los líquidos y los reemplazan por otros iones. Este proceso es utilizado para desmineralizar líquidos o eliminar ciertos contaminantes específicos.

Aplicaciones: Desmineralización de agua, tratamiento de aguas residuales, y en la industria de alimentos y bebidas.

Ventajas: Alta selectividad para iones específicos, adecuada para el tratamiento de aguas con altos contenidos de minerales.

4. Filtración por Gravedad

La filtración por gravedad se basa en el principio de permitir que un fluido pase a través de un medio filtrante bajo la acción de la gravedad. Es una técnica simple y efectiva para partículas grandes o cuando se requiere un proceso de filtración de bajo costo.

4.1 Filtros de Arena

Estos filtros utilizan una capa de arena de distintos tamaños para retener partículas grandes en su superficie. El fluido pasa lentamente a través de la capa de arena, lo que permite la eliminación de partículas.

Aplicaciones: Tratamiento de aguas en plantas de purificación de agua, procesos industriales.

Ventajas: Bajo costo de instalación y mantenimiento, adecuado para partículas grandes.

5. Filtración por Centrifugación

La centrifugación utiliza la fuerza centrífuga para separar partículas sólidas de un líquido. Las partículas más grandes o densas son desplazadas hacia el fondo del recipiente, mientras que el líquido filtrado se queda en la parte superior.

Aplicaciones: Separación de sólidos suspendidos en líquidos, como en la industria alimentaria, farmacéutica y química, y en el tratamiento de aguas.

Ventajas: Eficaz para partículas finas o cuando se necesita una separación rápida.

Anexo 9. Sectores Generadores de Emisiones de Nanopartículas contaminantes

Las emisiones de nanopartículas contaminantes provienen de una amplia gama de sectores industriales, desde la automotriz y energético, hasta la química, metalúrgica y alimentaria. [47] A continuación, se detallan los principales generadores de emisiones de nanopartículas contaminantes en diversos sectores industriales.

1. Industria Automotriz

La industria automotriz es una fuente importante de nanopartículas contaminantes debido a la producción de vehículos y las emisiones de los motores ^[48].

Generación de Nanopartículas: Durante los procesos de fabricación de vehículos, como soldadura, mecanizado y pintura, se liberan partículas metálicas finas al ambiente. En los motores de combustión interna, especialmente en los motores diésel, la quema de combustibles produce hollín y carbono negro, que son nanopartículas perjudiciales.

Impacto en la Salud y el Medio Ambiente: Las nanopartículas emitidas afectan la calidad del aire y pueden causar problemas respiratorios y cardiovasculares en los seres humanos, además de contribuir a la contaminación atmosférica.

2. Industria Energética

Las centrales térmicas de carbón y otras plantas de generación eléctrica emiten hollín, materiales metálicos y otros compuestos finos como subproductos de la combustión incompleta de los combustibles fósiles ^[48].

Impacto en la Salud y el Medio Ambiente: Las nanopartículas generadas contribuyen a la contaminación del aire y pueden ser inhaladas, lo que afecta la salud humana, causando afecciones respiratorias y cardiovasculares, así como un impacto negativo en la biodiversidad.

3. Industria Metalúrgica

La industria metalúrgica genera nanopartículas durante los procesos de fundición, soldadura y corte de metales.

Generación de Nanopartículas:

En la fundición de metales como el acero y el aluminio, se emiten partículas metálicas finas. Durante la soldadura y el corte de metales, especialmente metales pesados como plomo, cadmio y cromo, se liberan nanopartículas que pueden ser muy peligrosas para la salud ^[49].

Impacto en la Salud y el Medio Ambiente: La exposición prolongada a estas nanopartículas puede causar problemas respiratorios graves, como asma y enfermedades pulmonares crónicas, y también tienen efectos negativos sobre los ecosistemas cercanos.

4. Industria Química

La industria química es otra fuente de nanopartículas, generadas durante la síntesis de productos químicos y la fabricación de materiales ^[49].

Generación de Nanopartículas: La producción de nanomateriales como los nanotubos de carbono, nanopartículas de plata y óxidos metálicos genera emisiones de partículas finas. Durante procesos como la evaporación de disolventes y la reacción química en altas temperaturas, también se liberan nanopartículas.

Impacto en la Salud y el Medio Ambiente: Las nanopartículas producidas en este sector pueden tener efectos tóxicos para el ser humano y los animales, afectando el sistema respiratorio y otras funciones biológicas, además de contribuir a la contaminación del aire.

5. Industria de la Construcción

La industria de la construcción también es responsable de la liberación de nanopartículas, principalmente durante las fases de molienda, demolición y soldadura.

Generación de Nanopartículas:

Los procesos de corte, pulido y soldadura de metales y materiales de construcción, como el concreto y el asfalto, generan partículas finas.

En la fabricación de cemento, el proceso de horneado y molienda también libera nanopartículas.

Impacto en la Salud y el Medio Ambiente: Las nanopartículas generadas pueden ser inhaladas, provocando problemas respiratorios y aumentando el riesgo de enfermedades pulmonares y cardiovasculares en los trabajadores de la construcción y en la población cercana a las obras.

6. Industria Alimentaria

La industria alimentaria ha comenzado a generar emisiones de nanopartículas, especialmente con el uso de nanotecnología en algunos procesos de producción.

Generación de Nanopartículas:

Durante la molienda de ingredientes, especialmente en la producción de harinas, azúcares y otros productos en polvo, se pueden liberar nanopartículas.

Los envases alimentarios que utilizan nanomateriales para mejorar la conservación o el empaque también pueden generar partículas finas.

Impacto en la Salud y el Medio Ambiente: Si bien muchas nanopartículas generadas en la industria alimentaria están reguladas, existe preocupación sobre los efectos potenciales a largo plazo de la exposición a estas partículas, especialmente en el sistema respiratorio.

7. Industria Textil

La industria textil también genera nanopartículas en sus procesos de producción y tratamiento de materiales.

Generación de Nanopartículas:

Durante los procesos de teñido, lavado y tratamiento de tejidos, se liberan nanopartículas de productos químicos utilizados, como los nanomateriales aplicados en telas para darles propiedades específicas (impermeabilidad, resistencia, etc.).

En la fabricación de fibras sintéticas, como el poliéster y el nylon, también pueden liberarse pequeñas partículas.

Impacto en la Salud y el Medio Ambiente: Las nanopartículas generadas en la industria textil pueden ser inhaladas por los trabajadores y, eventualmente, liberadas al medio ambiente, afectando la calidad del aire y la salud pública.

8. Industria Electrónica

La industria electrónica es otra fuente importante de nanopartículas, especialmente en la fabricación de semiconductores y otros dispositivos electrónicos.

Generación de Nanopartículas:

Durante la producción de semiconductores, procesos como litografía, soldadura y grabado pueden liberar partículas de silicio, cobre, y otros materiales conductores.

La fabricación de pantallas y otros componentes electrónicos también involucra procesos que liberan nanopartículas finas.

Impacto en la Salud y el Medio Ambiente: La exposición a estas nanopartículas puede causar problemas respiratorios y efectos a largo plazo en la salud de los trabajadores de la industria electrónica, además de contribuir a la contaminación del aire.

Anexo 10. Normas Aplicables a la membrana compuesta

El estudio y desarrollo de sistemas de membranas, como el propuesto en este caso de quitosano soportado en alfa alúmina, para la separación y retención de nanopartículas en humos y gases, debe basarse en un marco normativo y técnico que garantice su eficacia, seguridad y viabilidad.

A continuación, se detallan las normas aplicables a dicho estudio, abarcando aspectos relacionados con los materiales, el diseño, las pruebas experimentales y los estándares de seguridad.

1. Normas Internacionales sobre Materiales y Membranas

- **ISO 9001:2015 – Sistemas de gestión de la calidad**
Esta norma proporciona los requisitos para un sistema de gestión de calidad en la fabricación y desarrollo de membranas. Su cumplimiento asegura que el proceso de desarrollo y producción sea controlado, garantizando la calidad del sistema de membrana en todo momento ^[59].
- **ISO 13485:2016 – Dispositivos médicos**
Si la membrana propuesta se utiliza para aplicaciones en la industria de la salud o biotecnología, esta norma establece los requisitos para sistemas de gestión de calidad relacionados con la fabricación de dispositivos médicos, lo cual es relevante en caso de que el sistema se aplique en procesos que involucren contacto con seres vivos ^[60].
- **ASTM D751-18 – Métodos de prueba de permeabilidad de membranas**
Proporciona estándares para evaluar la permeabilidad y otras propiedades de las membranas utilizadas en la filtración de gases y partículas, esencial para evaluar la efectividad del sistema de membrana de quitosano soportada en alfa alúmina ^[61].
- **ISO 12500-3:2012 – Filtros de aire de alta eficiencia**
Esta norma es pertinente si se requiere evaluar la capacidad de la membrana para separar nanopartículas en sistemas de aire o gas. Ofrece directrices sobre pruebas de eficiencia y resistencia al paso de partículas en filtros de alta eficiencia ^[62].

2. Normas Ambientales y de Seguridad

- **ISO 14001:2015 – Sistemas de gestión ambiental**
Es fundamental que el estudio del sistema de membranas se realice bajo un enfoque de sostenibilidad. Esta norma establece los requisitos para implementar un sistema de gestión ambiental que permita minimizar el impacto de las operaciones de separación de nanopartículas en el ambiente ^[63].
- **OSHA 29 CFR 1910.1000 – Normas de salud y seguridad ocupacional**
Relativa a la protección de los trabajadores expuestos a nanopartículas durante el proceso de filtración y separación. Las normas OSHA regulan los límites de exposición ocupacional a las partículas, lo que garantiza un entorno seguro durante la investigación y fabricación ^[64].

- **Reglamento REACH (EC) 1907/2006 – Control de sustancias químicas**

Esta regulación europea tiene como objetivo garantizar que los materiales utilizados en el desarrollo del sistema de membrana (como el quitosano y la alfa alúmina) no representen riesgos para la salud humana y el medio ambiente, asegurando que sean evaluados y gestionados adecuadamente ^[65].

3. Normas de Ensayo y Caracterización de Nanopartículas

- **ISO 13321:1996 – Técnicas de dispersión de partículas**

Este estándar proporciona procedimientos para la caracterización de partículas dispersas, aplicable al análisis de nanopartículas presentes en los humos y gases. Permite determinar el tamaño, distribución y concentración de las partículas, crucial para evaluar la capacidad de retención de la membrana ^[66].

- **ASTM E2523-08 – Métodos de medición de la concentración de nanopartículas en aire**

Norma que describe los métodos para medir la concentración de nanopartículas en el aire, lo que es fundamental para evaluar la eficiencia de la membrana en la retención de partículas en un entorno controlado de humos y gases ^[67].

4. Normas Relativas a Materiales de Membranas

- **ISO 2781:2018 – Determinación de la densidad aparente de las partículas**

En el estudio de la **alfa alúmina** y el **quitosano** como materiales de soporte y membrana, esta norma es crucial para evaluar las propiedades físicas de las partículas utilizadas, como la densidad, lo que afecta el rendimiento de la membrana en la separación de nanopartículas ^[68].

- **ASTM F329-05(2020) – Caracterización de materiales compuestos para filtración**

Proporciona directrices para la evaluación de materiales compuestos, como el quitosano soportado en alfa alúmina, usados en sistemas de filtración. Esta norma asegura que los materiales sean adecuados para la retención de partículas a nivel nanométrico ^[69].

5. Normas para Evaluación de Desempeño

- **ISO 16890 – Filtros de aire para la purificación del aire**

Esta serie de normas describe cómo probar la eficiencia de los filtros de aire en la retención de partículas de diferentes tamaños. Es aplicable para evaluar la efectividad de la membrana en la captura de nanopartículas de los humos y gases ^[70].

- **ISO 14644-1:2015 – Clases de limpieza del aire**

En el caso de que se utilice el sistema de membrana en un entorno controlado, como una sala limpia, esta norma define las clases de limpieza del aire, lo cual es relevante para evaluar la eficiencia de la membrana en términos de calidad del aire y control de partículas en entornos críticos ^[71].

6. Normas de Validación y Ensayo de Membranas

- **ASTM F1605-14 – Evaluación del rendimiento de membranas en procesos de separación**

Esta norma proporciona los métodos para validar el rendimiento de las membranas en aplicaciones de separación de partículas. Es fundamental para asegurar que el sistema de membrana de quitosano soportada en alfa alúmina cumpla con los requisitos de eficiencia de separación de nanopartículas en gases ^[72].

- **ISO 10787:2018 – Determinación de la eficiencia de separación de membranas**

Especifica los procedimientos para la evaluación de la eficacia de membranas en la separación de partículas finas, aplicable a los ensayos de rendimiento de la membrana en la retención de nanopartículas en humos y gases ^[73].