



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
POSGRADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
QUÍMICA**

**“SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS NO
TEJIDAS DE PLA/QUITOSANO/ZnO Y EVALUACIÓN DE
PROPIEDADES”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**PRESENTA
ALBINEDA CANO ELIZABETH MERITXELL**

**DIRECTOR DE TESIS
DRA. ALMA GABRIELA PALESTINO ESCOBEDO**

**CO-DIRECTOR DE TESIS
DR. CÉSAR MANUEL DEL ÁNGEL OLARTE**



SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P., AGOSTO 2023

El programa de maestría en Ciencias en Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí pertenece al programa nacional de posgrados de calidad (SNP) del CONAHCYT, registro 000 896 en el nivel consolidado.

Agradecimiento a CONAHCYT por la Beca de Maestría, otorgada a Elizabeth Meritxell Albineda Cano con CVU No. 1143579 y el financiamiento del proyecto de CB A1-S-31287” “SÍNTESIS, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROPIEDADES DE COMPOSITOS FUNCIONALES DE NUEVA GENERACIÓN” otorgado a Dra. Alma Gabriela Palestino Escobedo, a través de los cuales fue posible llevar a cabo el trabajo de tesis que se presenta.



Mis documentos		Documentos	Compartir	Parámetros	página 1 de 1
<input type="checkbox"/>	Título	Informe	Autor	Procesados	Acciones
<input type="checkbox"/>	SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS NO TEJIDAS DE PLA/QUITOSANO/ZnO Y SU EVALUACIÓN DE PROPIEDADES ANTIBACTERIALES 1 part - 0 words	22%	Elizabeth Meritxell Albineda Cano	10 ago 2023 19:42:48	 



Síntesis y caracterización de fibras no tejidas de PLA/quitosano/ZnO y evaluación de propiedades por Albineda Cano Elizabeth Meritxell se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
POSGRADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
QUÍMICA**

**“SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE
FIBRAS NO TEJIDAS DE
PLA/QUITOSANO/ZnO Y EVALUACIÓN DE
PROPIEDADES”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA
ALBINEDA CANO ELIZABETH MERITXELL

DIRECTORA

DRA. ALMA GABRIELA PALESTINO ESCOBEDO

SINODALES

DR. VLADIMIR ALONSO ESCOBAR BARRIOS

M. C. RICARDO ISRAEL VÁZQUEZ LEYVA

DR. JOSÉ ELÍAS PÉREZ LÓPEZ



San Luis Potosí, S. L. P. México

Agosto, 2023

**Comité Académico del posgrado en Ciencias en Ingeniería Química
Facultad de Ciencias Químicas**

Presente:

Por medio de la presente comunicamos que la tesis llevada a cabo por la alumna de maestría I. Q. Elizabeth Meritxell Albineda Cano, titulada “SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS NO TEJIDAS DE PLA/QUITOSANO/ZnO Y EVALUACIÓN DE PROPIEDADES”, ha sido concluida y aprobada por el comité tutorial para iniciar los trámites correspondientes para su titulación, la cual tendrá lugar el próximo día 15 de agosto del 2023 a las 17:00 horas en el aula audiovisual de la hemeroteca.

Dra. Alma Gabriela Palestino Escobedo

Directora

Firma

Dr. Vladimir Alonso Escobar Barrios

Asesor

Firma

M.C. Ricardo Israel Vázquez Leyva

Asesor

Firma

Dr. José Elías Pérez López

Asesor

Firma

Por y para Dios, mis padres y mi familia que han estado conmigo a lo largo de todo el proceso de la obtención de mi grado de maestra en Ciencias en Ingeniería Química.

AGRADECMIENTOS ACADÉMICOS

A mi asesora Dra. Alma Gabriela Palestino Escobedo primeramente por brindarme la oportunidad de entrar a su grupo de investigación, por compartirme sus conocimientos, por cada reunión que teníamos en donde me ayudaba aterrizar mis ideas una mujer que admiro mucho y me siento muy feliz de estar en su grupo aprendiendo y desarrollándome en el área que me gusta.

A mi Co-asesor Dr. César Manuel Del Ángel Olarte por compartirme sus conocimientos, por orientarme desde el uso de los equipos y haberme al igual que mi asesora acompañado en todo mi proceso de aprendizaje y desarrollo.

A mis sinodales Dr. Vladimir Alonso Escobar Barrios, Dr. José Elías Pérez López y M.C. Ricardo Vázquez Leyva por sus comentarios en cada comité tutorial los cuales fueron muy valiosos para mí y contribuyeron en gran medida en mi proyecto de investigación.

A Dr. César Fernando Azael Gómez Durán por también siempre orientarme cuando tenía dudas sobre algo del laboratorio y por asesorarme en temas de química, a Dra. Cándida Anahy Cisneros Covarrubias por darme consejos sobre mi proyecto y también resolver siempre mis dudas, a I.Q. Ana Lourdes Rodríguez Villanueva por sus consejos, sus palabras de ánimo y su disposición al siempre querer ayudarme.

A M.C. Nancy Araceli Rivera García una persona que estimo mucho y me oriento en los comienzos de mi proyecto, por sus consejos y todo su ánimo en ayudarme.

A M.C. Laura Vázquez Ayala por haber estado siempre presente en el desarrollo de las pruebas antibacteriales, por enseñarme el procedimiento y asesorarme en la interpretación de resultados. A M.C. Ashanti Montes Ramírez por también haberme orientado en las pruebas antibacteriales.

A Dr. Miguel Alejandro Olvera Sosa porque cuando quería entrar a la maestría él me orientó, me mostró el laboratorio me explicó lo que hacían y me platicó sus proyectos, por darme un panorama de la investigación y por su disposición al orientarme cuando tenía alguna duda.

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

Al Laboratorio de Procesamiento de Polímeros perteneciente la Facultad de Ciencias Químicas, a I.Q. Ana Lourdes Rodríguez Villanueva por brindarme todo lo necesario para poder desarrollar mi proyecto.

Al Laboratorio de Biotecnología Aplicada perteneciente a la Facultad de Ciencias Químicas, de manera especial a la M.E. Perla Cristina Mayorga Colunga y L.Q. Sury Sarahí Salazar Martínez por brindarme su apoyo, compartirme sus conocimientos, por orientarme y siempre tener la mejor disposición de ayudarme en la realización de las pruebas antibacteriales.

Al Laboratorio de Rayos X del instituto de metalurgia a la técnico M.M.I.M Rosa Lina Tovar Tovar quien me apoyo en la caracterización de SEM.

Al Laboratorio de Biopolímeros y Nanoestructuras de la Facultad de Ciencias Químicas, por recibirme, darme un espacio por apoyarme con lo necesario para realizar mi proyecto de investigación

Por último, agradezco a la Facultad de Ciencias Químicas y al Posgrado en Ciencias en Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por otorgarme los conocimientos necesarios para llevar a cabo mi proyecto de tesis.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Primeramente, quiero agradecer a Dios por darme fuerzas e iluminar mi camino. A mi papá por siempre apoyarme y motivarme para realizar mis estudios de maestría. A mi mamá que también me ha apoyado, escuchándome y estando siempre pendiente de mí y a mi hermana por también ayudarme en lo que estaba a su alcance.

A mi abuelita porque también es uno de mis grandes motores, por escucharme y alentarme siempre al igual que mi tía que siempre me apoyaron y brindaron palabras de ánimo. A mi primo Gerardo quien también siempre ha estado para escucharme y motivarme. A mi mime que ya no está conmigo, pero que se me manda sus bendiciones desde el cielo.

A mis amigos y compañeros del laboratorio Ashanti, Fide, Uriel, Lau e Ileana por compartirme sus conocimientos y por los momentos que pasamos que hicieron más amena mi formación. A Issac por ser un increíble amigo y haberme ayudado en la realización de mis pruebas antibacteriales y por siempre darme palabras de ánimo.

A mis amigas de la casa de asistencia Keny, Line, Ale, Yadi, Clau, Mich y Penélope por escucharme y hacerme sentir acompañada durante mis estudios, le doy gracias a Dios por tener amigas como ellas, también a mi roomie Susi por siempre querer ayudarme y preocuparse por mí. A las religiosas de María Inmaculada por sus palabras de ánimo y preocuparse siempre por mí.

A mis amigas del posgrado Karen y Fabi con quienes compartí momentos de estrés, trabajo y sobre todo risas.

A los chicos del servicio, a Hilda por haberme ayudado a lo largo de todo un semestre por los momentos compartidos, a Iván por su entusiasmo de siempre querer ayudarme,

a Vero por estar en el momento más complicado de mi formación que fueron los días previos a la entrega de mi tesis por ayudarme en esos días tan difíciles.

A todo el laboratorio de Biopolímeros y Nanooestructuras por su recibimiento y por todas las bonitas convivencias que crearon en mi memoria momentos muy especiales.

A todas las personas que de alguna manera contribuyeron a que obtuviera mi grado de maestría.

RESUMEN

Los graves problemas de salud causados por bacterias que han generado resistencia ante los medicamentos y la creciente preocupación por la contaminación ambiental en todo el mundo ha motivado el desarrollo de telas no tejidas biodegradables con propiedades antibacterianas. El objetivo del presente trabajo consiste en fabricar fibras no tejidas de poli (ácido láctico) (PLA) mediante electrospinning incorporando agentes antibacteriales como lo son el quitosano y las nanopartículas (NP) de ZnO. El desarrollo de estos materiales se llevó a cabo mediante el estudio de diversos parámetros de procesamiento, como voltaje, velocidad de alimentación y distancia de aguja al colector, con el objetivo de obtener fibras no tejidas con buenas propiedades mecánicas y antibacteriales. Estos estudios se condujeron a través de metodologías de diseños de experimentos (DOE) con el fin de determinar la influencia de los parámetros de procesamiento en las propiedades de las fibras. La composición de las fibras se determinó mediante FTIR, obteniendo las señales características de los componentes orgánicos presentes en las fibras. Por otro lado, se detectó la presencia del ZnO mediante espectroscopía de absorción UV-vis.

Además, las fibras no tejidas obtenidas presentaron una degradación hidrolítica notable después de 100 días a un pH=10, propiedades antibacteriales de contacto contra las bacterias *E. Coli* y *S. Aureus*, resistencia al desgarramiento de 0.43 N y una capacidad de biodegradación por composta después de 18 días mayor a una muestra de celulosa. Estas fibras no tejidas tienen potencial aplicación en apósitos para heridas, textiles médicos, tratamiento de agua y filtros de aire.

Palabras clave: telas no tejidas, electrospinning, biodegradación, antibacterial.

ABSTRACT

Serious health problems caused by bacteria such as bacterial drug resistance as well as the growing concerns relating environmental pollution around the world have prompted the development of biodegradable non-woven fabrics with antibacterial properties. The objective of this work is to manufacture polylactic acid non-woven fibers by electrospinning incorporating antibacterial agents such as chitosan and ZnO nanoparticles. The development of these materials was carried out by studying various processing parameters, such as voltage, feeding speed and distance from needle to collector, with the aim of obtaining non-woven fibers with good mechanical and antibacterial properties. These studies were conducted through Design of Experiments (DOE) methodologies in order to determine the influence of processing parameters on fiber properties. The composition of the fibers was determined by FTIR, obtaining the characteristic signals of the organic components present in the fibers. On the other hand, the presence of ZnO was detected by UV-vis absorption spectroscopy.

In addition, the obtained non-woven fibers exhibited remarkable hydrolytic degradation after 100 days at pH=10, contact antibacterial properties against *E. Coli* and *S. Aureus* bacteria, tear strength of 0.43 N, and biodegradation capacity by composting after 18 days greater than a cellulose sample. These nonwoven fibers have potential applications in wound dressings, medical textiles, water treatment, and air filters.

Keywords: non-woven fabrics, electrospinning, biodegradation, antibacterial.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	21
1. INTRODUCCIÓN	21
CAPÍTULO 2	25
2. ANTECEDENTES	25
2.1 ESTUDIOS PREVIOS	25
2.2 POLI (ÁCIDO LÁCTICO)	29
2.2.1 Propiedades mecánicas	30
2.2.2 Propiedades físicas	30
2.2.3 Degradación	31
2.2.4 Aplicaciones.....	34
2.3 QUITOSANO	36
2.3.1 Propiedades fisicoquímicas	36
2.3.2 Propiedades antibacteriales.....	38
2.3.3 Degradación	38
2.3.4 Aplicaciones.....	39
2.4 ÓXIDO DE ZINC	40
2.4.1 Propiedades antibacteriales.....	41
2.4.2 Aplicaciones.....	41
2.5 FIBRAS NO TEJIDAS	43
2.5.1 Procesos de fabricación	43
2.5.2 Aplicaciones.....	48
CAPÍTULO 3	¡Error! Marcador no definido.
3. JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	¡Error! Marcador no definido.
3.1 JUSTIFICACIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
3.2 HIPÓTESIS.....	¡Error! Marcador no definido.
3.3 OBJETIVOS.....	¡Error! Marcador no definido.
3.3.1 Objetivo general	¡Error! Marcador no definido.
3.3.2 Objetivos específicos	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO 4	¡Error! Marcador no definido.
4. MATERIALES Y MÉTODOS	¡Error! Marcador no definido.
4.1 Materiales.....	¡Error! Marcador no definido.

4.2 Fibras PLA/quitosano/ZnO mediante electrospinning.....	¡Error! Marcador no definido.
4.2.1 Diseño de experimentos (DOEA)	¡Error! Marcador no definido.
4.2.2 Diseño de experimentos B (DOE B)	¡Error! Marcador no definido.
4.3 Técnicas de caracterización	¡Error! Marcador no definido.
4.3.1 Microscopía óptica	¡Error! Marcador no definido.
4.3.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	¡Error! Marcador no definido.
4.3.3 Espectrofotometría infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR)	¡Error! Marcador no definido.
4.3.4 Espectroscopia de absorción Ultravioleta Visible	¡Error! Marcador no definido.
4.3.5 Viscosidad.....	¡Error! Marcador no definido.
4.3.6 Resistencia mecánica	¡Error! Marcador no definido.
4.3.7 Calorimetría diferencial de barrido	¡Error! Marcador no definido.
4.3.8 Degradación hidrolítica	¡Error! Marcador no definido.
4.3.9 Propiedades antibacteriales.....	¡Error! Marcador no definido.
4.3.9.1 Preparación del medio de cultivo.....	¡Error! Marcador no definido.
4.3.9.2 Pruebas antibacteriales	¡Error! Marcador no definido.
4.3.9.3 Inoculación de placas de agar mediante hisopo	¡Error! Marcador no definido.
4.3.10 Biodegradabilidad	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO 5	¡Error! Marcador no definido.
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	¡Error! Marcador no definido.
5.1 Experimentos preliminares	¡Error! Marcador no definido.
5.1.1 Determinación de la concentración del polímero en solución y nanopartículas de ZnO.....	¡Error! Marcador no definido.
5.1.2 Determinación de la distancia.....	¡Error! Marcador no definido.
5.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS A.....	¡Error! Marcador no definido.
5.2.1 Viscosidad.....	¡Error! Marcador no definido.
5.2.2 Morfología (microscopía óptica)	¡Error! Marcador no definido.
5.2.3 Caracterización química superficial (FTIR)	¡Error! Marcador no definido.
5.2.4 Propiedades ópticas (Espectroscopia de absorción UV-Vis)	¡Error! Marcador no definido.
5.2.5 Resistencia mecánica	¡Error! Marcador no definido.

5.2.6 Propiedades térmicas (DSC)	¡Error! Marcador no definido.
5.2.7 Estabilidad hidrolítica	¡Error! Marcador no definido.
5.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS B	¡Error! Marcador no definido.
5.3.1 Desarrollo de fibras no tejidas de PLA-Q-ZnO DOEB	¡Error! Marcador no definido.
5.3.2 Morfología (microscopía óptica)	¡Error! Marcador no definido.
5.3.3 Morfología superficial (Microscopia electrónica de barrido)	¡Error! Marcador no definido.
5.3.4 Propiedades ópticas (Espectroscopía de absorción Ultravioleta Visible)	¡Error! Marcador no definido.
5.3.5 Propiedades antibacteriales.....	¡Error! Marcador no definido.
5.3.6 Resistencia mecánica	¡Error! Marcador no definido.
5.3.7 Biodegradabilidad	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO 6	¡Error! Marcador no definido.
6. CONCLUSIONES	¡Error! Marcador no definido.
7. PERSPECTIVAS	¡Error! Marcador no definido.
8. BIBLIOGRAFÍA	¡Error! Marcador no definido.
9. ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.
9.1 Cálculo de la viscosidad de las soluciones.....	¡Error! Marcador no definido.
9.2 Datos empleados en las pruebas mecánicas.....	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Ensamble del sistema de electrospinning (Asmatulu 2016).....	46
Fig. 2. Aplicaciones de las nanofibras poliméricas (Vigneswaran et al. 2014).....	49
Fig. 3. Diagrama del camino óptico de un microscopio (Chen et al. 2011).....	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 4 Configuración de un espectrofotómetro FTIR (Omidi et al. 2017).....	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 5. Sistema para la medición de la viscosidad.	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 6. Muestras recortadas para las pruebas mecánicas.;	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 7. Sistema para pruebas mecánicas.	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 8. Esquema de un equipo DSC.	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 9. Esquema del procedimiento empleado en las pruebas antibacterianas. .	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 10. Placas inoculadas con S. Aureus antes de la incubación.;	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 11. Placas inoculadas con E. Coli antes de la incubación.;	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 12. Esquema del procedimiento de inoculación mediante hisopo.	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 13. Sistema para pruebas de biodegradabilidad.	¡Error! Marcador no definido.

Fig. 14. Mezcla de polímero en solución en cloroformo al 15%p/v con PLA (80%p/p), quitosano (10%p/p) y a) ZnO (10%p/p) b) ZnO (1%p/p). **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 15. Muestra obtenida con una concentración de ZnO del a) 10% (EXPPREC1) b) 1% (EXPPREC2). **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 16. Muestras obtenidas en la determinación de la distancia experimentos a) EXPPRED1 b) EXPPRED2 c) EXPPRED3 d) EXPPRED4. **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 17. Micrografías de las fibras obtenidas mediante electrospinning a diferentes distancias aguja-colector y concentraciones de ZnO: a) 0.5%ZnO a una distancia de 10 cm b) 0.5%ZnO a una distancia de 15 cm c) 0.8%ZnO a una distancia de 10 cm y d) 0.5%ZnO a una distancia de 15 cm. **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 18. Viscosidad promedio en función de la concentración de ZnO de las diferentes soluciones preparadas para el DOEA (Pa. s). **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 19. Micrografías de las fibras obtenidas en el DOEA. **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 20. Espectro FTIR de las fibras a)100%PLA, b)90%PLA-10%Q, c)90%PLA-10%Q-0.2%ZnO, d)90%PLA-10%Q-0.8%ZnO. **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 21. Interacciones por puentes de hidrógeno entre el grupo hidroxilo del quitosano (OH^-) y el grupo carbonilo del PLA ($\text{C}=\text{O}$) (círculo azul). Interacciones dipolo-dipolo entre el grupo amino del quitosano ($-\text{NH}_2$) y el grupo carbonilo del PLA ($\text{C}=\text{O}$) (círculo morado). **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 22. Enlace de coordinación entre el PLA y el ZnO... **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 23. Espectro de absorción UV-Vis de las fibras con a) 100%PLA, b) 90%PLA-10%Q, c) 90%PLA-10%Q-0.2%ZnO, d) 90%PLA-10%Q-0.8%ZnO, e) 90%PLA-10%Q-1%ZnO. **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 24. Gráfica del porcentaje de la concentración ZnO (%) vs absorbancia UV-Vis de las fibras. **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 25. Gráfica de valores predichos vs valores reales del análisis de la carga máxima DOEA. **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 26. Superficie de respuesta de la carga máxima de las fibras (kN) en función del voltaje (kV) y la velocidad de alimentación (ml/h). **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 27. Superficie de respuesta de la carga máxima de las fibras (kN) en función de la concentración de ZnO (%) y el voltaje (kV). **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 28. Termograma obtenido de la muestra DOEA1 **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 29 Termograma obtenido de la muestra PLA **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 30. Gráfica de valores predichos vs valores reales del análisis del índice de cristalinidad del DOEA. **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 31. Superficie de respuesta del índice de cristalinidad de las fibras en función del voltaje (kV) y el %ZnO. **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 32. Gráfica de la pérdida de peso (%) de las muestras en un pH= 3 durante 100 días. **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 33. Gráfica de la pérdida de peso (%) de las muestras en un pH= 7 durante 100 días. **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 34. Gráfica de la pérdida de peso (%) de las muestras en un pH= 10 durante 100 días. **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 35. Muestras obtenidas a las condiciones del punto máximo 17.5 kV, 3 ml/h y 15 cm. Con diferentes composiciones a) 94.75%PLA-5%Q-0.25%ZnO b) 99.75%PLA-0.25%ZnO c) 99.5%PLA-0.5%ZnO **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 36. Micrografías de las muestras obtenidas a 0.89 ml/h, 18 kV y 15 cm a diferentes composiciones a) 94.75%PLA/5%Q/0.25%ZnO b) 99.75%PLA-0.25%ZnO c) 99.5%PLA-0.5%ZnO d) 95%PLA-5%Q e) 100%PLA f) 89.75%PLA-10%Q-0.25%ZnO g) %PLA-10%Q h) 92.25%PLA-7.5%Q-0.25%ZnO i) 89.5%PLA-10%Q-0.5%ZnO j) 97.25%PLA-2.5%Q-0.25%ZnO k) 94.5%PLA-5%Q-0.5%ZnO;**¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 37. Micrografías con una magnificación de x500 de las fibras a diferentes composiciones de PLA, Q y ZnO a) 94.75%PLA-5%Q-0.25%ZnO b) 99.75%PLA-0.25%ZnO c) 99.5%PLA-0.5%ZnO, d) 95%PLA-5%Q, e) 90%PLA-10%Q f) 89.5%PLA-10%Q-0.5%ZnO g) 94.5%PLA-5%Q-0.5% ZnO;**¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 38. Micrografías con una magnificación de x1400 de las fibras a diferentes composiciones de PLA, Q y ZnO a) 94.75%PLA-5%Q-0.25%ZnO b) 99.75%PLA-0.25%ZnO c) 99.5%PLA-0.5%ZnO d) 95%PLA-5%Q e) 90%PLA-10%Q f) 89.5%PLA-10%Q-0.5% ZnO g) 94.5%PLA-5%Q-0.5% ZnO. **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 39. Micrografías con una magnificación de x4000 de las fibras a diferentes composiciones de PLA, Q y ZnO a) 94.75%PLA-5%Q-0.25%ZnO c) 99.5%PLA-

0.5%ZnO d) 95%PLA-5%Q e) 90%PLA-10%Q f) 89.5%PLA-10%Q-0.5% ZnO g) 94.5%PLA-5%Q-0.5% ZnO..... **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 40. Espectro de absorción UV-Vis de las fibras a diferentes composiciones a) 97.25%PLA-2.5%Q-0.25%ZnO b) 89.75%PLA-10%Q-0.25%ZnO c)99.5%PLA-10%Q-0.5%ZnO **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 41. Placas Petri Inoculadas con S. Aureus observadas a las 24 h de incubación. Muestras B1, B2, B3 y B4 por triplicado. Control positivo (antibiótico). Control negativo (papel filtro)..... **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 42. Placas Petri Inoculadas con S. Aureus observadas a las 48 h de la incubación. a) muestras B1, B2, B3 y B4 b) muestras B5, B6, B7 y B8 c) muestras B9, B10, B11 y B12. Control positivo (antibiótico). Control negativo (papel filtro).**¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 43. Placas Petri Inoculadas con E. Coli observadas a las 24 h de la inoculación. Muestras B5, B6, B7 y B8 por triplicado. Control positivo (antibiótico). Control negativo (papel filtro) (círculos rojos)..... **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 44. Placas Petri Inoculadas con E. Coli observadas a las 48 h de la inoculación. a) muestras B1, B2, B3 y B4 b) muestras B5, B6, B7 y B8 c) muestras B9, B10, B11 y B12. Control positivo (antibiótico). Control negativo (papel filtro).**¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 45. Muestra DOEB12 extraída de las pruebas antibacteriales realizadas contra E. Coli después de 24 h de incubación empleando el método de inoculación mediante hisopo. **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 46. Muestra DOEB3 extraída de pruebas antibacteriales realizadas contra S. Aureus después de 24 h de incubación empleando el método de inoculación mediante hisopo. **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 47. Gráfica de valores predichos vs valores reales del análisis de la carga máxima del DOEB. **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 48. Esquema del espacio muestral y zona de análisis delimitada por un triángulo (círculo rojo)..... **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 49. Gráfica de contorno de la carga máxima en función de los componentes de la mezcla. **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 50. Superficie de respuesta de la carga máxima en función de la concentración de los componentes de la mezcla. **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 51. Gráfica de valores predichos vs valores reales del análisis del módulo de Young del DOEB..... **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 52. Superficie de respuesta del módulo de Young en función de la concentración de los componentes de la mezcla..... **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 53. Muestras sometidas a pruebas de biodegradación en el día 0. **¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 54. Muestras sometidas a pruebas de biodegradación en el día 18..... **¡Error! Marcador no definido.**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Telas no tejidas en aplicaciones desechables y duraderas (Pourmohammadi 2013).....50

Tabla 2. Materiales **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 3. Niveles del diseño de superficie de respuesta central compuesto **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 4. Corridas del diseño de experimentos central compuesto (DOEA)..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 5. Niveles del diseño de mezclas..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 6. Corridas del diseño de experimentos de mezclas (DOEB) ... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 7. Especificaciones de los experimentos preliminares. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 8. Análisis de varianza (ANOVA) de la carga máxima DOEA...**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 9. Temperaturas características de las muestras analizadas por DSC..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 10. Temperaturas características de las fibras de PLA, promedio y desviación estándar de las temperaturas del resto de las fibras **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 11. Análisis de varianza (ANOVA) del índice de cristalinidad DOEA. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 12. Entalpías de fusión DOEA..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 13. Análisis de varianza (ANOVA) de la carga máxima del DOEB..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 14. Análisis de varianza (ANOVA) del análisis del módulo de Young del DOEB.
..... **¡Error! Marcador no definido.**

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La infección bacteriana es un riesgo potencial para la vida humana (Budama et al. 2013). Desde el descubrimiento de la penicilina, los antibióticos han salvado incontables vidas y han aliviado un sufrimiento inconmensurable. Sin embargo, el uso excesivo de antibióticos podría resultar en una disminución de la resistencia humana a las enfermedades por supresión inmunológica así como un aumento de la resistencia antimicrobiana de las bacterias (Li et al. 2014).

Se ha encontrado que muchos de los patógenos como bacterias y virus, pueden sobrevivir en diversas superficies de textiles, metales y plásticos durante varios días e incluso semanas, lo que origina la transmisión posterior a nuevos huéspedes (Y. Ma et al. 2021).

Dentro de los textiles que son susceptibles a ataques bacterianos se encuentran las telas no tejidas las cuales constan de fibras o filamentos unidos (M. Zhang et al. 2021). Los no tejidos encuentran numerosas aplicaciones en higiene, toallitas, indumentaria, medicina, cuidado de la salud, cuidado personal, automotriz, electrónica, filtración, agricultura, horticultura, muebles, construcción y empaques.

Dado que las telas no tejidas se encuentran en todas partes resulta conveniente dotarlas de una función biocida de acción rápida con el fin de reducir la propagación de patógenos a través de la muerte por contacto (Y. Ma et al. 2021).

En la industria textil, la nanotecnología se puede utilizar para proporcionar características funcionales tales como propiedades antimicrobianas y antiestáticas, resistencia a los rayos UV, resistencia a las manchas, resistencia a las arrugas, entre otros más. Recientemente se han desarrollado tecnologías avanzadas para permitir la producción de nanofibras, nanotubos y nanovarillas de polímeros

sintéticos y naturales. Las fibras se pueden modificar mediante la introducción de nanopartículas que le aporten una funcionalidad, como partículas superparamagnéticas, agentes antimicrobianos, enzimas, etc. Estas nanofibras de "valor agregado" pueden ser empleadas de manera efectiva en ropa protectora, administración de medicamentos, ingeniería de tejidos, etc. (Bonaldi 2017).

Entre los agentes antimicrobianos, el Óxido de Zinc (ZnO) ha atraído mucha atención debido a la percepción general de que es una sustancia segura, ecológica y biocompatible (Mizelińska et al. 2018). Tiene aplicaciones potenciales como agente degradante fotocatalítico, agente bacteriostático bajo luz visible, además de protector UV por lo que es uno de los semiconductores más importantes (Liu et al. 2019).

Los tejidos con propiedades antibacterianas pueden inhibir el crecimiento de bacterias y microbios o incluso matarlos, reduciendo así la transmisión de enfermedades infecciosas (Mao et al. 2019). Estos pueden utilizarse para el tratamiento de agua en el punto de uso para la esterilización, apósitos para heridas y textiles médicos para tratamientos antibacterianos tópicos y profilácticos, y filtros de aire antimicrobianos para evitar la acumulación de bioaerosoles en los sistemas de ventilación, calefacción y aire acondicionado (Li et al. 2014).

Por otro lado la creciente contaminación ambiental continua siendo un serio problema por lo que en las últimas décadas ha existido una creciente demanda de productos amigables con el medio ambiente, promoviendo el desarrollo de materiales biodegradables los cuales han sido considerados como una alternativa a los materiales no biodegradables, debido a su naturaleza y bajo costo (Rendon 2016).

Entre los polímeros biodegradables, el poli (ácido láctico) (PLA) se considera un polímero sintético, comercial y relativamente barato (Łatwińska et al. 2016).

El PLA es un poliéster alifático derivado de fuentes naturales como el maíz y la remolacha azucarera (Sreekumar et al. 2021) y está siendo ampliamente utilizado en la producción industrial de envases, vasos para bebidas, botellas y telas no tejidas utilizadas para diversos fines (Łatwińska et al. 2016).

Otro polímero que se encuentra entre los polímeros biodegradables es el quitosano (Q) el cual es un polisacárido catiónico obtenido de la quitina por desacetilación en presencia de álcali. Además de su biodegradabilidad y biocompatibilidad, el quitosano se ha reportado que es un polímero con buenas propiedades antimicrobianas (Bonilla et al. 2013).

En los últimos años, se han empleado varios enfoques para producir nanofibras poliméricas para fabricar telas no tejidas tales como el soplado en estado fundido, la síntesis de plantillas, la separación de fases, el autoensamblaje y el electrospinning. Entre estos métodos, el electrospinning o hilado electrostático se reconoce como la técnica más barata y sencilla para fabricar nanofibras continuas con diámetros que van desde varios micrómetros hasta decenas de nanómetros (Alghoraibi and Alomari 2020).

El presente estudio se centró en el desarrollo de fibras no tejidas a base de poli (ácido láctico), quitosano y nanopartículas de ZnO empleando cloroformo como disolvente por medio de la técnica de electrospinning. En la primera etapa del proyecto se llevó a cabo un primer diseño de experimentos donde se buscó obtener los parámetros de procesamiento adecuados para la obtención de las fibras no tejidas. El presente estudio se centró en el desarrollo de fibras no tejidas a base de poli (ácido láctico), quitosano y nanopartículas de ZnO empleando cloroformo como disolvente por medio de la técnica de electrospinning. En la primera etapa del proyecto se llevó a cabo un diseño de experimentos de superficie de respuesta donde se estudiaron los parámetros de procesamiento de electrospinning y se definieron las condiciones para obtener fibras no tejidas. Además, se midió la viscosidad de las soluciones poliméricas para determinar su influencia en la

fabricación de las fibras. Posteriormente, se analizó la morfología de las fibras mediante microscopía óptica, se realizó un análisis químico mediante FTIR para observar las interacciones intermoleculares y la presencia de los compuestos. Se corroboró la presencia de las NP de ZnO mediante espectroscopia UV-Vis y se realizaron pruebas mecánicas con el fin de evaluar la resistencia mecánica de las fibras.

En la segunda etapa del proyecto se desarrolló un diseño de experimentos de mezclas con el fin de encontrar las composiciones adecuadas para la obtención de las fibras no tejidas con las mejores propiedades analizadas. Se realizaron pruebas mecánicas, además de pruebas de degradación hidrolítica, antibacteriales y de biodegradación vía composta. A lo largo de esta tesis se describirán los procesos de preparación, las técnicas empleadas en la caracterización de las fibras, así como los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 2

2. ANTECEDENTES

2.1 ESTUDIOS PREVIOS

En la literatura se ha reportado un estudio acerca del uso del PLA en la fabricación de una máscara de seguridad empleando nanofibras de este compuesto. Wang et al en el año 2021 fabricaron nanofibras de PLA mediante electrospinning empleando cloruro de tetrabutilamonio (TBAC) con N,N dimetilformamida y carbonato de dimetilo con concentraciones de 0.5 y 7% en peso de TBAC. Las nanofibras fueron fabricadas con a una distancia de 18 cm, un voltaje de 25 kV y velocidades de alimentación de 5 ml/min y 10 ml/min. Encontraron buenas propiedades mecánicas e hidrofóbicas. Se encontró una mayor eficiencia de filtración una mayor transpirabilidad y un peso base bajo en comparación con una máscara comercial de 3M. Además, se destacaron sus propiedades de biodegradabilidad al degradarse por completo después de 180 días en condiciones de suelo (Wang et al. 2022).

Se han reportado además algunos estudios de la fabricación de materiales a base de PLA-quitosano, por ejemplo, en el 2016 Claro et al fabricaron películas de PLA-quitosano y PLA-acetato de celulosa por medio de una máquina de extrusión, evaluaron sus características morfológicas, propiedades térmicas y mecánicas. Con respecto a la mezcla PLA-quitosano manejaron relaciones de composición en peso de (100:0, 90:10, 80:20 y 70:30). Encontraron por medio de microscopia películas con buena dispersión de quitosano en PLA para las composiciones de 100:0 y 90:10 a medida que se aumentó la concentración de quitosano (80:20, 70:30) encontraron poca dispersión del quitosano. Con respecto a las propiedades mecánicas los autores reportaron una resistencia a la tracción de 40 ± 7 MPa, un módulo elástico de 1.6 ± 0.2 GPa y un alargamiento a la rotura de 4.7 ± 0.5 % dichos valores fueron superiores a los obtenidos para la película de PLA puro. En cuanto a sus propiedades térmicas observaron que al incrementar la concentración de quitosano la temperatura de transición vítrea aumentaba. Para el índice de cristalinidad el

efecto fue similar ya que al aumentar la concentración de quitosano el índice de cristalinidad también aumentó. Los autores sugirieron el uso de este compuesto para envases de comida principalmente por las buenas propiedades mecánicas demostradas (Claro et al. 2016).

Otro estudio reportado sobre materiales compuestos por PLA-quitosano fue descrito por Hardiansyah et al en 2015 quienes fabricaron nanofibras de PLA-Q a través de la técnica de electrohilado emplearon un solvente compuesto por etanol, ácido acético y cloroformo. Emplearon una concentración de quitosano de 0, 0.8, 2, 3.2, 4, 6, 8, 12, 16 y 100% en peso. Por medio de microscopía óptica observaron que al agregar etanol las mezclas se veían más claras ya que la adicción de este compuesto volvió la mezcla resultante miscible. Los autores encontraron que la conductividad eléctrica de la solución aumentaba con la adicción de quitosano, además que el diámetro de las fibras disminuía con el aumento de la concentración de quitosano. Sus estudios mostraron buenas propiedades antibacteriales con respecto a *E. Coli* sobre todo a concentraciones de quitosano superiores al 3.2%. Realizaron pruebas de citotoxicidad con células L-929 de donde encontraron que las nanofibras compuestas de PLA-Q no presentaban riesgo por lo que resultaron citocompatibles. Los autores por tanto recomendaron el uso de este material para aplicaciones biomédicas (Hardiansyah et al. 2015).

Otro estudio sobre películas de PLA-Q fabricadas mediante extrusión fue el presentado por Bonilla et al. en el 2013. En este estudio analizaron la cantidad de quitosano incorporado a la matriz de PLA, así como el tamaño de partícula del mismo sobre las propiedades fisicoquímicas y antibacteriales del compuesto PLA-Q. La relación en peso de los compuestos que emplearon los autores fue PLA-Q (95:5) y PLA-Q (90:10) el tamaño de partícula analizado de quitosano fue de 715 y 180 μm . Los autores encontraron una mayor rugosidad en las películas compuestas por PLA-Q que las películas de PLA puro. Encontraron además irregularidades en la estructura de los compuestos al adicionar quitosano los cuales aumentaron con la cantidad y el tamaño de las partículas de quitosano. El comportamiento térmico

del PLA no se vio modificado con la incorporación de quitosano. Encontraron una disminución en las propiedades mecánicas con la presencia de quitosano. Denotaron que las propiedades de barrera de vapor de agua eran mejores en las películas de PLA puro. Se mostró una reducción en los recuentos microbianos en las películas de PLA-Q por lo que se comprobó una buena actividad antibacteriana de los compuestos frente a microorganismos coliformes totales y aerobios mesófilos (Bonilla et al. 2013).

Con respecto a PLA-ZnO han surgido también algunos estudios. Goncharova et al en 2020 fabricaron membranas a base de PLA y nanopartículas (NP) de ZnO con una concentración de 5-40% en peso mediante electrohilado. Las NP de ZnO se obtuvieron como nanopulvos mediante la técnica de ablación con láser pulsado en aire ello con el fin de generar una superficie pura y activa. Los parámetros de procesamiento que se emplearon en el estudio fueron velocidad de la solución de 1 ml/min, voltaje de 27 kV, velocidad del colector de 50 rpm y distancia de aguja-colector de 17 cm. Los autores encontraron que el aumento de la concentración de ZnO afectó la cristalinidad de las NP disminuyendo esta propiedad con el aumento de la cantidad de NP. Encontraron además propiedades humectantes mejoradas en las membranas de PLA con un 40% de ZnO. Con un 10% de NP denotaron que la resistencia mecánica de la membrana compuesta aumentó en 1.4 veces en comparación con la membrana de PLA puro. Por lo que encontraron que las fibras con mejores propiedades mecánicas fueron las constituidas por PLA con concentraciones de ZnO del 5-10%. Realizaron pruebas antibacterianas donde evaluaron las bacterias *E. Coli* y *S. Aureus*. Se mostró que la capacidad antibacteriana aumentó con el aumento de la concentración de NP. Además, la mayor actividad antibacteriana encontrada fue con respecto a *S. Aureus* (Goncharova et al. 2021).

Otro estudio sobre la fabricación de fibras mediante electrospinning fue descrito por Zhang et al en el 2020 quienes fabricaron membranas fibrosas constituidas por PLA y NP de ZnO dispersas ultrasónicamente. Los parámetros que emplearon en

electrospinning fueron voltaje de 18 kV, velocidad de alimentación de 0.5 cm/h y una distancia de 18-20 cm. Además, variaron el tiempo en el que las muestras se sometieron al ultrasonido de 0-60 min. Emplearon un rango de concentración de NP de ZnO de 0-1 % en peso. Encontraron una disminución en el diámetro de las fibras compuestas de PLA-ZnO en comparación con las membranas constituidas por PLA puro además notaron un aumento en la resistencia a la tracción debida al incremento en la concentración de NP teniendo el valor de resistencia más alto la membrana compuesta por PLA y 0.5% ZnO a una concentración mayor encontraron una disminución en la resistencia. El alargamiento a la rotura disminuyó con el ZnO. Con respecto a las propiedades antibacteriales contra las bacterias *E. Coli* y *S. Aureus* estas mejoraron para las membranas con un tratamiento ultrasónico en un 25.% y un 13.% con respecto a las no tratadas (R. Zhang et al. 2021).

Con respecto a los materiales constituidos por PLA-Q-ZnO también han surgido algunos trabajos. En el 2020 Rihayan et al. realizaron un estudio con el fin de mejorar las propiedades de los compuestos PLA-Q-ZnO. Fabricaron películas con un 10% en peso de PLA en cloroformo con una concentración de quitosano de 1, 3 y 6% y 1, 2 y 3% de ZnO. Encontraron que la resistencia a la tracción y la extensión a la rotura aumentaron con la concentración de NP hasta un 2%. La estabilidad térmica se vio afectada negativamente con la adicción de NP de ZnO (Rihayat et al. 2020).

En el año 2018 Rahman et al. prepararon membranas poliméricas a base de quitosano, poli (ácido láctico) y NP de ZnO. La concentración en peso empleada fue de 10% para PLA, 5% para quitosano, y de 1-3% para ZnO, empleando la técnica de fundición de solución en caja Petri. Se encontró que la resistencia mecánica disminuyó al agregar quitosano al PLA. Con respecto a la adicción de ZnO se observaron propiedades mecánicas mejoradas hasta una concentración de 2% ya que a un 3% se observó una disminución. Se halló además que la estabilidad térmica mejoró con la adicción de NP. Reportaron buenas propiedades de barrera contra el agua añadiendo ZnO (Rahman et al. 2018).

A pesar de que se han descrito algunos trabajos sobre fibras obtenidas mediante electrospinning y sobre películas de PLA, quitosano y ZnO, aún no se han reportado estudios sobre la fabricación de fibras de PLA-Q-ZnO mediante electrospinning. Los tres materiales poseen buenas características las cuales se pueden aprovechar para fabricar productos de gran utilidad. Además, el uso de la técnica de electrospinning puede ser muy provechoso ya que se pueden fabricar fibras no tejidas a través de electrospinning al mismo tiempo que se emplea una técnica fácil de operar y de bajo costo.

2.2 POLI (ÁCIDO LÁCTICO)

El poli (ácido láctico) (PLA) es un polímero termoplástico sintético proveniente de fuentes naturales. Es un poliéster alifático generado a partir de diversos procesos de polimerización de su monómero el ácido láctico como: polimerización por apertura de anillo, policondensación y métodos como polimerización enzimática y deshidratación azeotrópica (Farah et al. 2016).

El ácido láctico se puede obtener a través de la fermentación de productos naturales como la remolacha azucarera y el maíz. El PLA es un polímero semicristalino reconocido por ser biocompatible, biodegradable y no tóxico. Es ampliamente usado en la industria para diversas aplicaciones, dentro de ellas destaca en la industria textil y de embalaje. Además, se está empleando como material en el área de la bioingeniería. Las características sobresalientes del PLA han llevado a la creación de prototipos y la fabricación eficiente en construcciones impresas en 3D (DeStefano et al. 2020).

El PLA presenta ventajas como fácil producción, compostabilidad y además se caracteriza por ser amigable con el medio ambiente. Los productos a base de PLA no se han reportado como nocivos para la salud incluso su uso ha sido aprobado por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) para el contacto directo

con fluidos biológicos. Por lo que es un material que no presenta amenazas hacia los seres humanos ni al medio ambiente (DeStefano et al 2020).

A pesar de sus buenas propiedades presenta desventajas como una alta hidrofobicidad, una tasa de degradación lenta y una baja tenacidad. Debido además a su baja tasa de cristalización, el PLA tiene un ciclo de moldeo por inyección largo y una gran sensibilidad a la humedad (Ramezani et al. 2023).

2.2.1 Propiedades mecánicas

El PLA semicristalino posee un módulo de tracción de aproximado de 3 GPa, una resistencia a la tracción de 50-70 MPa y un módulo de flexión de 5 GPa (Farah et al. 2016).

Sin embargo, las propiedades mecánicas del PLA pueden ser afectadas conforme su peso molecular y su grado de cristalinidad (DeStefano et al 2020). Existe una relación proporcional entre el módulo de tracción y el peso molecular del PLA. Es además un material muy poco resistente ya que resiste menos del 10% de elongación antes de fracturarse por lo que se considera un material frágil (Farah et al. 2016).

2.2.2 Propiedades físicas

El PLA posee propiedades de un polímero termoplástico. Este tipo de polímeros logran calentarse o recalentarse y enfriarse para modificar su morfología.

El PLA semicristalino posee una temperatura de transición vítrea (T_g) de 58 °C y una temperatura de fusión (T_m) entre 130-230 °C (dependiendo de su estructura) (Farah et al. 2016).

Las temperaturas características del PLA deben ser consideradas para enunciar sus propiedades físicas como la reología, la densidad y la capacidad calorífica (DeStefano, Khan, and Tabada 2020). Es importante tomar en cuenta las propiedades del PLA para su uso en diversas aplicaciones.

La cristalinidad afecta algunas propiedades de los polímeros como la dureza, la resistencia a la tracción, rigidez, pliegue y sus puntos de fusión (DeStefano et al. 2020).

El PLA puede reducir sus temperaturas características (T_g , T_m) y su cristalinidad al mezclarlo con ciertos aditivos plásticos.

Un polímero se puede clasificar como semicristalino mediante el porcentaje en peso por unidad de volumen. El PLA con un 90% p/v se considera como semicristalino. La entalpía de fusión para el PLA 100% cristalino mayormente reportado en la literatura es de 93 /g (Farah et al. 2016).

2.2.3 Degradación

El proceso de degradación de cualquier polímero ocurre de tres formas; rompimiento de su cadena lateral, rompimiento de su cadena principal y rompimiento de su cadena interseccional (Ranakoti et al. 2022).

La tasa de degradación de los polímeros aumenta incrementando sus propiedades hidrofílicas, por el contrario, disminuye con el incremento del peso molecular lo que conlleva en el caso de PLA a una menor cantidad de grupos carboxilos (DeStefano et al. 2020).

El PLA de mayor peso molecular tiene una tasa de degradación relativamente lenta ya que este puede permanecer in vivo en un lapso aproximado de 3-5 años (DeStefano et al. 2020).

Se ha reportado que la tasa de degradación del PLA puede mejorarse con la temperatura y el nivel de acidez (DeStefano et al. 2020).

La degradación del PLA ocurre con el rompimiento de la cadena principal en unidades más cortas como oligómeros, dímeros y monómeros, estas unidades penetran la membrana celular rompiéndola y provocando su degradación bioquímica.

Existen parámetros que afectan la degradación del PLA como la temperatura de fusión, la temperatura de transición vítrea, la cristalinidad, el peso molecular, la afinidad química, el área superficial, etc. El PLA con un peso molecular alto puede

degradarse más lentamente, asimismo el PLA con una temperatura de fusión alta es capaz de degradarse más rápidamente (Ranakoti et al. 2022).

2.2.3.1 Degradación hidrolítica

La degradación hidrolítica del PLA comienza por la absorción de agua de sus moléculas siendo más rápida en las zonas amorfas ya que absorben mayor cantidad de agua (Avérous 2008).

Después de la absorción comienza la escisión molecular con la degradación hidrolítica del enlace éster ello conlleva a una fracturación del polímero y a una disminución de su peso molecular. El rompimiento del enlace éster está influenciado por algunos parámetros como la constante de velocidad, la cantidad de agua absorbida, el coeficiente de difusión de los fragmentos y la solubilidad de los componentes en la molécula (Elsawy et al. 2017).

Los grupos carboxilos terminales actúan como catalizadores en la hidrólisis del enlace éster ya que estos aumentan la acidez lo que promueve la degradación. La degradación hidrolítica puede asociarse con la degradación térmica y abiótica del PLA.

En términos generales la degradación hidrolítica del PLA se puede enunciar en 4 etapas que son: 1) absorción de agua 2) pérdida de las propiedades mecánicas 3) disminución del peso 4) pérdida completa de la masa de la muestra (Klein et al 2014).

La degradación hidrolítica está determinada por varios factores como lo son la distribución y el peso molecular, la cristalinidad, las condiciones de hidrólisis y su historial térmico (Avérous 2008).

2.2.3.2 Degradación térmica

La estabilidad térmica del PLA no es considerada alta por lo que limita su uso en ciertas aplicaciones. La degradación del PLA oscila entre los 230°C y 260°C (Elsawy et al. 2017).

Se ha informado en diferentes estudios que la degradación térmica del PLA se debe a una serie de acontecimientos que comienzan por la escisión de la cadena principal seguida de una despolimerización, una degradación termo-oxidativa y reacciones de transesterificación (Signori et al. 2009).

2.2.3.3 Degradación biótica

El PLA se puede degradar mediante degradación biótica cuando sus monómeros son obtenidos a partir de la fermentación de carbohidratos (DeStefano et al. 2020). Respecto a la biodegradación existen algunos parámetros que pueden afectar esta propiedad como su estructura química, número de compuestos aditivos y las condiciones ambientales.

Existen condiciones que deben tomarse en cuenta en la biodegradación por composta para el crecimiento de los microorganismos como lo es el control de la humedad (50-60%), temperatura (hasta 60°C), cantidad de oxígeno (mayor al 5%) y una relación de carbón/nitrógeno (20:1-40:1) (Folino et al. 2020).

El proceso de biodegradación de PLA consta de dos etapas que son la degradación hidrolítica y la asimilación microbiana.

Se ha denotado que el PLA se biodegrada fácilmente a través de compostaje y tarda más en descomponerse en condiciones de suelo natural.

La biodegradación del PLA se mejora cuando la temperatura se aproxima a la temperatura de transición vítrea (60 °C aprox.). El PLA es capaz de descomponerse mediante composta convirtiéndose hasta en un 90% en CO₂ después de 6 meses (Ramezani et al. 2023).

El PLA puede degradarse en condiciones anaeróbicas y aeróbicas. Se han reportado muy pocos estudios de la degradación del PLA en condiciones anaeróbicas.

La biodegradación del PLA en condiciones aérobicas ocurre en dos pasos el primero consiste en la difusión del agua en la cadena y el segundo en el ataque microbiano a las moléculas cortas y débiles del polímero (Ranakoti et al. 2022).

2.2.4 Aplicaciones

El PLA tiene diversas aplicaciones dadas sus buenas propiedades. Sin embargo, existen 3 mercados en los cuales ha tenido un mayor desarrollo los cuales son en el área textil, en el área de embalaje y biomédica.

2.2.4.1 Aplicaciones biomédicas

Dadas sus propiedades de biocompatibilidad y reabsorción el PLA está siendo utilizado para la administración de fármacos y dispositivos médicos. En este sentido el PLA se ha empleado en aparatos para fijación de fracturas aprovechando sus propiedades mecánicas.

El PLA además se está usando en la administración de fármacos aprovechando sus ventajas de biocompatibilidad, degradación y no toxicidad.

Se ha demostrado que los andamios a base de PLA pueden resultar de gran utilidad en la reestructuración de órganos y tejidos dañados (Avérous 2008).

2.2.4.2 Aplicaciones de embalaje

Se ha reportado que el uso de PLA como material de embalaje resulta económicamente viable por lo que a nivel industrial está siendo ampliamente utilizado. Con el consumo actual de empaques se convierte en uno de los mercados más importantes para el PLA.

Debido a la creciente contaminación ambiental las propiedades de degradación del PLA pueden ser muy provechosas para la fabricación de empaques amigables con el medio ambiente.

El PLA combinado con un agente antimicrobiano puede resultar en empaques capaces de inhibir el crecimiento bacteriano y antifúngico por lo que este tipo de materiales se puede emplear en frutas, alimentos perecederos, etc.

Durante los últimos años el empleo del PLA se ha extendido por Europa, EE.UU., y Japón. Donde el PLA se ha utilizado mayormente para recubrir los alimentos tratando de prolongar la vida útil de estos. El PLA además se ha utilizado ampliamente para empaques, contenedores, vasos, bolsas, cucharas, tenedores, etc.

A pesar de las buenas propiedades del PLA que hacen que tenga diversas aplicaciones se deben considerar algunas de sus desventajas como sus propiedades mecánicas, su resistencia al calor y sus propiedades de barrera de agua para hacer más eficiente su uso.

2.2.4.3 Aplicaciones textiles

El PLA es también utilizado en la fabricación de fibras para aplicaciones textiles. Dadas sus propiedades de degradación se ha considerado el PLA como un compuesto prometedor capaz de suplir compuestos como el Nylon, PET, Polipropileno, Poliéster entre otros provenientes de fuentes no renovables empleados en la fabricación de fibras.

Las fibras de PLA poseen resistencia biológica inherente, buena resistencia a los rayos UV y buenas propiedades anti-llama (Yang et al. 2021).

Las aplicaciones de las fibras de PLA van desde la industria farmacéutica y medica hasta aplicaciones en el desarrollo de películas y fibras para envasado de alimentos y productos textiles.

En la actualidad las fibras de PLA han sido empleadas mayormente en la industria de embalaje. Se ha reportado que solo el 2% de su producción se ha utilizado en aplicaciones textiles (Balla et al. 2021).

El PLA en forma de fibras se utiliza en la fabricación de telas no tejidas para productos de higiene, agrícolas y geotextiles. Dado su buen control de la humedad

las fibras de PLA también se han utilizado en la producción de ropa de protección, ropa deportiva, ropa interior etc. (Balla et al. 2021).

2.3 QUITOSANO

El quitosano (Q) es un polisacárido catiónico de origen natural que ha tomado mucha relevancia en distintas aplicaciones debido a que es una sustancia no tóxica y abundante que además posee características destacables como biodegradabilidad y biocompatibilidad. Este biopolímero se obtiene a partir de la desacetilación de la quitina en presencia de álcali. Al alcanzar la quitina un grado de desacetilación del 50% se obtiene quitosano. La quitina se obtiene principalmente del exoesqueleto de los crustáceos como camarones y cangrejos por lo que el quitosano es un polímero amigable con el medio ambiente

2.3.1 Propiedades fisicoquímicas

Existe una relación directa entre las propiedades fisicoquímicas y de estructura y el uso del quitosano (Rinaudo 2006).

Las propiedades más importantes del quitosano son el peso molecular y el grado de acetilación ya que estos influyen la mayoría de sus propiedades (Aranaz et al. 2021).

La densidad de carga del quitosano depende del grado de acetilación y el pH del medio (Aranaz et al. 2021).

2.3.1.1 Solubilidad

El quitosano solo es soluble en medios ácidos, esta solubilidad es debida a la protonación de $-NH_2$ en la posición C-2 de la unidad D-glucosamina (Rinaudo 2006).

Los grupos amino primarios del quitosano tienen un valor de pKa de 6.5 (Alemu et al. 2023).

Cuando el quitosano se disuelve en un medio ácido su grupo amino se protona lo que genera la solubilidad. A partir de un pH de 6 el grupo amino pierde su carga y por tanto se vuelve insoluble. La solubilidad del quitosano se ve influenciada por algunos parámetros como su peso molecular, la temperatura, el grado de desacetilación y la cristalinidad (Alemu et al. 2023).

2.3.1.2 Peso molecular

El peso molecular del quitosano debe ser un parámetro considerado ya que influye en sus propiedades fisicoquímicas y biológicas.

El peso molecular del quitosano puede variar conforme al procesamiento del mismo. Algunos factores como su fuente de extracción, la manera en que se extrajo y se procesó influyen en el peso molecular del quitosano. Con un aumento en el peso molecular el quitosano aumenta su viscosidad y disminuye su solubilidad.

Para fines industriales y biológicos se prefiere el quitosano de bajo peso molecular ya que este tiene una mejor solubilidad y estabilidad.

2.3.1.3 Grado de desacetilación

Otra de las características que afecta las propiedades del quitosano y por consiguiente sus aplicaciones es el grado de desacetilación. La solubilidad y la viscosidad están correlacionadas con el grado de desacetilación.

El grado de desacetilación representa la relación entre el número de grupos glucosamina y el número total de grupos N-acetilglucosamina más los de glucosamina (Gzyra-Jagięła et al. 2019).

El grado de desacetilación puede ser evaluado por diferentes técnicas como espectroscopia infrarroja, espectroscopia UV, resonancia magnética, etc. (Gzyra-Jagięła et al. 2019).

2.3.2 Propiedades antibacteriales

Se ha reportado que el quitosano es capaz de inhibir el crecimiento de diferentes hongos, levaduras y bacterias.

Existen varios mecanismos antibacteriales propuestos en la literatura, sin embargo, el más predominante y simple es la unión del quitosano cargado positivamente a la pared celular cargada negativamente provocando el rompimiento de la célula y alterando la permeabilidad de la célula microbiana para posteriormente unirse al DNA y así evitar la replicación del DNA resultando en la muerte celular (Jana 2019).

El quitosano de naturaleza policatiónica es capaz de inhibir el crecimiento tanto de bacterias Gram-negativas como Gram-positivas. Su mecanismo de acción para cada tipo de bacteria es diferente.

En las bacterias Gram-negativas el quitosano interactúa con estructuras aniónicas como lipopolisacáridos y proteínas presentes en su superficie. Con respecto a las bacterias Gram-positivas el quitosano interactúa con la capa de pared celular de las bacterias cargadas negativamente por el peptidoglicano y los ácidos teicoicos.

La actividad antimicrobiana del quitosano al igual que algunas otras propiedades depende del grado de desacetilación y el peso molecular. Además, algunos parámetros experimentales como la temperatura y el pH también pueden influir (Guarnieri et al. 2022).

2.3.3 Degradación

La degradación de los polímeros se puede originar por reacciones enzimáticas, hidrólisis y oxidación (Islam et al. 2019). La degradación del quitosano está influenciada por la distribución de los grupos acetamida dentro del quitosano.

La degradación del quitosano mediante hidrólisis se basa en el paso del agua a la matriz polimérica mediante reacciones de los enlaces débiles del polímero con el agua.

Se ha demostrado que algunos parámetros como el peso molecular y el grado de acetilación están correlacionados con el proceso de biodegradación, ya que se ha encontrado que un peso molecular alto disminuye la tasa de degradación tanto en vivo como en vitro (Islam et al. 2019).

2.3.4 Aplicaciones

El quitosano al ser un polímero abundante y disponible es utilizado en diversos sectores como biomedicina, cosmética, agricultura, productos de farmacéuticos entre otros.

2.3.4.1 Aplicaciones biomédicas

Dadas las propiedades del quitosano de no toxicidad, actividad antibacteriana, antifúngica y además al ser biorreabsorbible se ha empleado en numerosas aplicaciones dentro del sector biomédico para la liberación controlada de fármacos, ingeniería de tejidos, vendaje para heridas, anticoagulante, regeneración ósea, entre otros (Muxika et al. 2017).

El quitosano tiene propiedades que lo hacen un buen candidato para ser empleado en la administración de fármacos esto debido a sus características de gelificación, mucoadhesión, permeación e hidrofilia.

El quitosano en el vendaje de heridas también ha sido muy destacado ya que la infección durante la curación de las heridas es un aspecto que se debe cuidar, el quitosano al contar con buenas propiedades antimicrobianas lo hace interesante en esta aplicación.

2.3.4.2 Protección de alimentos

Se ha encontrado que el quitosano para envasado de alimentos resulta ser muy beneficioso ya que se ha reportado que este es capaz de retener el color y la textura de los alimentos (Muxika et al. 2017).

Además, se ha encontrado que mantiene la calidad de los alimentos por periodos largos de tiempo y es capaz de protegerlos de la fotooxidación (Muxika et al. 2017).

2.3.4.3 Textil

El desarrollo de materiales biocompatibles y ecológicos está atrayendo mucho la atención debido a la necesidad de producción de textiles antimicrobianos. Por lo que el quitosano para el acabado textil está siendo muy necesario en este sector. Se han reportado estudios donde el quitosano al incorporarlo con algodón resulta en telas con propiedades antibacteriales los cuales pueden ser empleados eficientemente como textiles médicos (Muxika et al. 2017).

2.3.4.4 Tratamiento de agua

El quitosano es uno de los biopolímeros más estudiados en el tratamiento de agua debido a su reconocida capacidad como absorbente de contaminantes orgánicos e inorgánicos, su naturaleza biodegradable, biocompatible, no tóxica, bajo costo, etc. Se han reportado estudios donde el quitosano se ha empleado para eliminar colorantes presentes en el agua y contaminantes como Cd^{2+} .

Además, el quitosano también está siendo empleado como soporte sólido de catalizadores con la intención de evitar la aglomeración y controlar la formación de nanopartículas (Muxika et al. 2017).

2.4 ÓXIDO DE ZINC

El óxido de zinc (ZnO) es un compuesto inorgánico respetuoso con el medio ambiente que se puede usar como aditivo para mejorar las propiedades de algunos polímeros gracias a sus distintivas cualidades de absorción ultravioleta visible y de agente antimicrobiano. Además, se ha encontrado que mejora las propiedades mecánicas, térmicas y de estabilidad (Espitia et al. 2016).

2.4.1 Propiedades antibacteriales

El ZnO es una sustancia eficaz contra bacterias, microbios y hongos. Los materiales que contienen ZnO son capaces de generar una protección contra diversos patógenos incluso sin la necesidad de luz. Existen algunas condiciones que pueden afectar el rendimiento del ZnO como lo es el medio ambiente y la concentración de ZnO. Dependiendo de la concentración de ZnO este puede provocar efectos nocivos en los organismos vivos.

El mecanismo antimicrobiano de las NP de ZnO aún no es muy claro, ya que no se ha podido establecer alguno. En la literatura existen diversas propuestas de mecanismos de acción del ZnO reportadas como:

1. Generación de especies reactivas de oxígeno (ROS)
2. Rompimiento y deterioro de la membrana celular tras la interacción entre las NP de ZnO y la pared celular
3. Liberación de los iones Zn^{2+} y ataque a la pared celular
4. Internalización de las NP de ZnO en la célula

(Silva et al. 2019)

2.4.2 Aplicaciones

En los últimos años ha surgido un creciente interés en la investigación científica por las NP de ZnO debido a sus características singulares principalmente para su aplicación en la industria farmacéutica, alimentaria, cosmética, medicinal, hospitalaria, entre otras (Zhou et al. 2023).

2.4.2.1 Envasado de alimentos

El ZnO en la industria alimentaria juega un papel muy importante ya que al incorporar NP de ZnO en una matriz polimérica es posible fabricar envases con propiedades antibacterianas y antifúngicas capaces de conservar los alimentos. Además, la incorporación de NP de ZnO le provee al empaque propiedades mecánicas, de barrera y de estabilidad mejoradas (Espitia et al. 2016).

Las NP de ZnO se han logrado incorporar en polímeros sintéticos como LDPE, PU y PE así como en biopolímeros. Se ha encontrado que la adición de NP de ZnO en biopolímeros les confiere a estos propiedades mejoradas capaces de competir con los polímeros provenientes de recursos no renovables presentes en el mercado (Espitia et al. 2016).

Otra de las características destacables del ZnO en la industria alimentaria es que es un compuesto no tóxico que ha sido aprobado por la Administración de Drogas y Alimentos de los EE. UU. (FDA) por lo que se afirma que es seguro para su aplicación con alimentos.

2.4.2.2 Farmacéutica y Cosmética

El ZnO al ser un agente antimicrobiano, desinfectante y secante se ha utilizado en gran medida en la fabricación de algunos medicamentos. Además, es utilizado para la fabricación de productos dermatológicos para evitar la inflamación y picor dadas sus propiedades de aceleración de cicatrización.

El ZnO también se emplea en el área de la odontología para la fabricación de pastas dentales y empastes.

Su propiedad de absorción de rayos UV le permite ser uno de los principales componentes en la producción de cremas contra radiaciones UVA y UVB.

Diversos trabajos han señalado al ZnO como el componente idóneo en la fabricación de cremas solares ya que estas cremas son capaces de proteger la piel de los rayos UV, no provocan irritación y son de fácil absorción (Kolodziejczak-Radzimska et al. 2014).

2.4.2.3 Textil

Se ha reportado que las nanoestructuras de ZnO son mayormente permeables al aire y más eficientes contra la protección de rayos UV. Por lo que las NP de ZnO son preferidas para el recubrimiento de textiles en la búsqueda de materiales textiles contra rayos UV. Se han realizado estudios de incorporación de nanoestructuras de ZnO en telas de algodón y se han encontrado una buena barrera contra los rayos UV (Kolodziejczak-Radzimska et al. 2014)

Al poseer el ZnO además propiedades antibacteriales es posible diseñar textiles con propiedades antibacteriales y contra rayos UV. Este tipo de textiles se puede emplear en ropa deportiva, material hospitalario, etc.

2.5 FIBRAS NO TEJIDAS

Las telas no tejidas están formadas por fibras, hilos o filamentos los cuales se unen mediante diferentes métodos y forman una estructura de red. Los procesos de unión pueden ser mecánicos, químicos y/o térmicos. Las fibras se pueden fabricar a partir de compuestos sintéticos y naturales.

La facilidad en la formación de las telas no tejidas junto con su alta productividad permite que estas contengan en aplicaciones industriales con las telas tejidas y de punto debido además a su bajo costo (Pourmohammadi 2013).

2.5.1 Procesos de fabricación

Los métodos de producción de telas no tejidas se dividen principalmente en tres: hilado húmedo (wet-laid), seco (dry-laid), y fundido.

La hilatura en húmedo consiste en extruir una solución de polímero seguida de un baño químico para posteriormente obtener las fibras mediante la precipitación

inducida por el efecto de la dilución o reacción química (Xue et al. 2019). Los materiales fabricados en húmedo son principalmente productos de papel.

En la hilatura en seco la solución extruida de polímero se seca al aire. Con esta técnica se obtiene principalmente textiles. Las fibras se obtienen mediante la evaporación del solvente con una corriente de aire caliente (Pourmohammadi 2013). Para el hilado por fusión un polímero fundido se extruye en una hilera y las fibras son obtenidas al enfriarse (Xue et al. 2019).

Para la fabricación de los no tejidos mediante dry-laid se emplean máquinas especiales para fibras textiles en estado seco. Este método puede inducir aperturas de fibras, cardado y/o formación aerodinámica de fibras. La técnica wet-laid permite usar fibras sintéticas cortas, así como pulpas de madera para diseñar telas no tejidas sumergiendo las fibras en agua. El método de hilado por fusión es empleado para polímeros termoplásticos y se divide en tres técnicas que son: hilado por unión (spun-bond), soplado en fusión (meltblown) e hilado instantáneo (flash spinning). Esta técnica de fabricación de telas no tejidas ofrece una alta relación resistencia-peso (spunbonds) y un área de superficie alta (meltblown) (Pourmohammadi 2013).

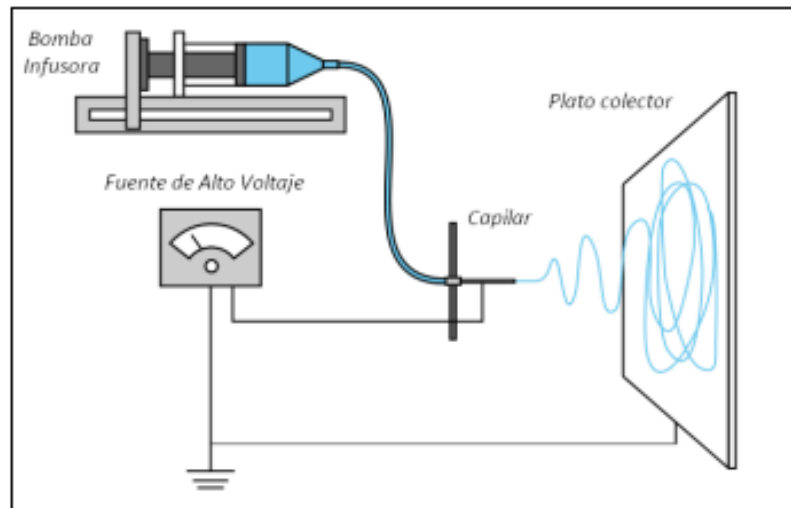
2.5.1.1 Spund-bond

Esta técnica se lleva a cabo mediante dos fases la primera consta de la fusión de los gránulos de polímero, seguida de la extrusión del polímero fundido y la generación de hilos de polímero que son estirados en frío o caliente para la obtención de la fibra. La segunda fase consiste en la deposición de las fibras en un transportador para la obtención de una tela uniforme.

Las telas no tejidas obtenidas mediante esta técnica son más resistentes y menos flexibles que las obtenidas con las otras técnicas.

2.5.1.2 Melt blown

En esta técnica los gránulos de polímero fundido de baja viscosidad son llevados mediante una corriente de aire a través de la boquilla del extrusor, posteriormente el polímero se estira por medio de la corriente de aire y se transforma en microfibras las cuales se enfrían en el colector y forman una red. La temperatura del aire debe ser igual o ligeramente mayor a la temperatura de fusión del polímero.



mayor a
de fusión

2.5.1.3
Flash
spinning

En esta técnica las fibras son obtenidas mediante tres fases, la primera consta de la dilución del polímero en un disolvente, en la segunda ocurre la pulverización del polímero contenido en un recipiente de baja presión y en la última fase el disolvente se evapora y se crea una red de fibras (KM and L 2017).

2.5.1.4 Electrospinning

Existe otro método empleado en la obtención de telas no tejidas que se conoce como electrospinning o electrohilado. En esta técnica el polímero es disuelto en un disolvente y después es inyectado en una jeringa. La solución del polímero en la jeringa se hace pasar por un campo eléctrico generado al aplicar voltaje de una fuente. Los chorros de polímero son entonces enviados desde la aguja de la jeringa a un plato colector. Finalmente, el disolvente se evapora y las fibras son depositadas al azar en el colector. La técnica se basa en aplicar fuerzas eléctricas que superen las fuerzas de tensión del polímero en la punta de la jeringa. El sistema de electrospinning se muestra en la Fig. 1.

Fig. 1. Ensamble del sistema de electrospinning (Asmatulu 2016).

Parámetros importantes

Existen diversos parámetros que influyen directamente en las propiedades y características de las fibras obtenidas mediante electrospinning por lo que su control durante el proceso es de suma importancia.

Estos parámetros se dividen en dos categorías: parámetros de solución y parámetros del proceso, los cuales se anuncian a continuación:

Parámetros de la solución

- Conductividad de la solución

Una solución con una alta conductividad podrá transportar mejor las cargas de la solución. Cuando la conductividad es baja no se logra un alargamiento suficiente del chorro lo que resulta en fibras no uniformes.

- Concentración de la solución

Una baja concentración de solución resulta en una baja viscosidad por lo que los chorros de polímero cargados pierden sus interacciones y se rompen en gotas. Una concentración alta provocara la obtención de fibras con defectos.

- Tensión superficial

Para que las fibras se puedan formar es necesario romper la tensión superficial de la solución. Las soluciones de polímero con baja tensión superficial pueden formar fibras sin defectos, el aumento de esta conlleva a la inestabilidad de los chorros. Cuando se tiene una tensión superficial pequeña existe una mejor interacción entre el polímero y el disolvente por lo que la dispersión se mejora y por tanto se evita la formación de defectos. Sin embargo, no todas las soluciones de polímero siguen esta tendencia.

Para disminuir la tensión superficial se debe añadir un surfactante o un disolvente con baja tensión superficial.

- Viscosidad de la solución

La viscosidad de la solución es un parámetro importante ya que al tener una alta viscosidad las cargas eléctricas no serán capaces de vencer la tensión superficial, además no se puede lograr el electrohilado debido a la inestabilidad del flujo que presenta en estas condiciones. El diámetro de las fibras y los defectos también aumentan teniendo una alta viscosidad. Tener una baja viscosidad tampoco favorece la formación de fibras, ya que el flujo del fluido tiene a romperse en gotitas. Una solución de hilado con una viscosidad de 1-20 poises y una tensión superficial de 35-55 dyn/cm² se considera una solución válida para fabricar fibras en el proceso de electrohilado (Amariei et al. 2017).

- Efecto dieléctrico del disolvente

La constante dieléctrica del disolvente juega un papel muy importante dentro de la técnica de electrospinning. Una solución con buenas propiedades dieléctricas disminuye la formación de defectos y el diámetro de las fibras.

Parámetros del proceso

- Voltaje

Un voltaje alto puede provocar un mayor estiramiento de chorro y una mayor fuerza de campo eléctrico lo que podría causar una disminución en el diámetro de las fibras, sin embargo, el voltaje depende de las propiedades viscoelásticas, por lo que se debe realizar un estudio sobre los efectos de este parámetro en el proceso de electrospinning, considerando el polímero y el disolvente empleado.

- Velocidad de alimentación

Una velocidad baja podría resultar beneficiosa ya que se obtendrían fibras sin defectos, debido a que el disolvente tendría más tiempo de evaporarse. Una velocidad alta provoca un aumento en el diámetro de las fibras y en los defectos. Se debe mantener una velocidad mínima para lograr obtener fibras mediante electrospinning.

- Distancia aguja-plato colector

La distancia entre la aguja y el colector puede o no afectar la morfología y el tamaño de las fibras, su influencia depende de las propiedades de la solución. Sin embargo, la influencia de este parámetro no es tan significativa con respecto a los otros parámetros. Una distancia pequeña podría provocar defectos en las fibras ya que el tiempo que tendría el disolvente para evaporarse sería más corto. Una distancia muy grande tampoco sería muy benéfica ya que las fibras se podrían romper debido a su propio peso, trabajar con distancias muy grandes o muy pequeñas podría generar defectos o fibras húmedas.

- Parámetros ambientales

La humedad relativa puede delimitar la velocidad de evaporación del disolvente. Con una humedad baja un disolvente volátil puede evaporarse más rápidamente. La temperatura puede también aumentar la evaporación del disolvente y causar una reducción en la viscosidad de la solución.

2.5.2 Aplicaciones

Las telas no tejidas se pueden utilizar eficientemente en áreas como: ropa protectora, filtros, telas de uso médico y aislantes.

Además, dada su versatilidad los no tejidos ha logrado que su uso se extienda para utilizarse en geotextiles. materiales de construcción, agricultura, aeroespacial y filtración.

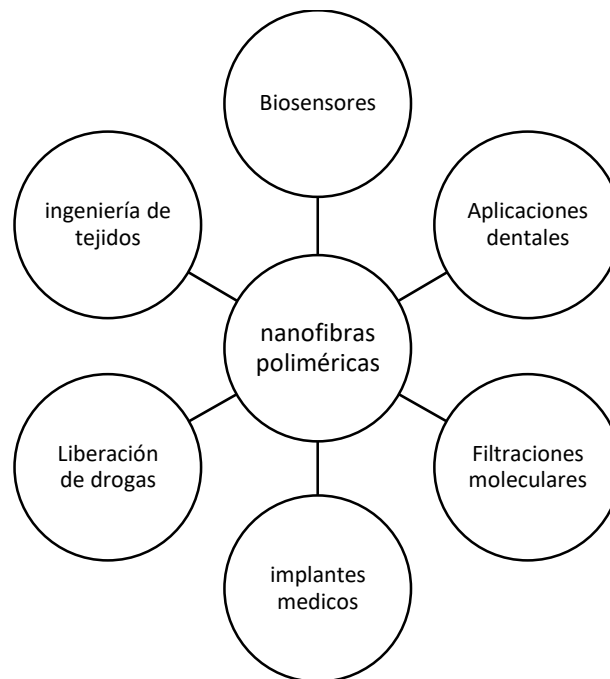


Fig. 2. Aplicaciones de las nanofibras poliméricas (Vigneswaran et al. 2014).

2.5.2.1 Aplicación de uso final

Las telas no tejidas se han empleado en diversos sectores dadas sus propiedades de rigidez, permeabilidad, resistencia química, entre otras. Las aplicaciones de las telas no tejidas se dividen en desechables y duraderas. Las telas no tejidas desechables son de un solo uso y de poca duración. Las telas no tejidas duraderas por su parte son de usos múltiples y larga duración.

Tabla 1. Telas no tejidas en aplicaciones desechables y duraderas (Pourmohammadi 2013).

Telas no tejidas en aplicaciones desechables	Telas no tejidas en aplicaciones duraderas
Pañales para bebés, femeninos, etc.	Prendas (prendas de protección para salas limpias)
Médico (paños, batas, apósitos, etc.).	Entretelas
Toallitas de consumo (toallitas para bebés, toallitas de limpieza para el hogar, toallitas para el cuidado personal).	Calzado y marroquinería
Toallitas industriales.	Mobiliario y ropa de cama
	Revestimientos para el suelo
	Filtración de aire y líquidos
	Construcción y techado
	Geotextiles e ingeniería civil
	Automotor
	Electrónica y electricidad (separador de batería)

2.5.2.2 Aplicaciones en la higiene personal

Las telas no tejidas al ser caracterizadas por su bajo costo de producción, poca pelusa, versatilidad, etc. Se han utilizado para aplicaciones médicas, debido además a que disminuyen la infección cruzada y por tanto permiten altos niveles de higiene.

Como material absorbente poseen características como gran volumen para absorber y retener una gran cantidad de fluido y bajo costo de producción.

El producto final consta de varios componentes en general, los cuales deber cubrir las funciones de absorber rápidamente los líquidos y mantenerlos durante un periodo de tiempo, mantener seca la piel de quien lo use, fácil manejo, evitar olores, etc. Es necesario que el producto contenga una capa de tela absorbente.

Las características deseadas para la fabricación de productos de higiene y salud son un bajo costo, una gran productividad y un bajo peso sin disminuir sus propiedades. Actualmente se busca además que los productos tengan una vida útil más larga y sean amigables con el medio ambiente (Ajmeri and Ajmeri 2010).

2.5.2.3 Aplicaciones biomédicas

Actualmente una diversa gama de polímeros son empleados en aplicaciones biomédicas. Estos polímeros son generalmente procesados mediante electrospinning para generar fibras y sus propiedades mecánicas y biométricas son manipuladas. Como material biomédico las telas no tejidas se utilizan en ingeniería de tejidos, vasos sanguíneos, tejidos neurales y además se emplean para regenerar matrices extracelulares que son dañadas por diversos factores como lesiones o enfermedades (M. S. Islam et al. 2019).