



Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Ambientales
Ingeniería Ambiental

**Desarrollo de un bioplástico en base a biopolímeros para ser utilizado
en un potencial Sistema de Captura de Agua de Rocío y Niebla**

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniera Ambiental

Micaela Alejandra Castillo Vera

Profesores guía:

Ing. Juan Carlos Carrasco Prado

Dra. Mariela Yévenes Burgos

CONCEPCIÓN (Chile), 2025

Desarrollo de un bioplástico en base a biopolímeros para ser utilizado en un potencial Sistema de Captura de Agua de Rocío y Niebla

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniera Ambiental

Micaela Alejandra Castillo Vera

Profesores guía:

Ing. Juan Carlos Carrasco Prado

Dra. Mariela Yévenes Burgos

CONCEPCIÓN (Chile), 2025

“DESARROLLO DE UN BIOPLÁSTICO EN BASE A BIOPOLÍMEROS PARA SER UTILIZADO EN UN POTENCIAL SISTEMA DE CAPTURA DE AGUA DE ROCÍO Y NIEBLA.”

Profesor Guía: Dra. Mariela Yevenes Burgos



Profesor Guía: Dr. Juan Carrasco Prado



Profesor Comisión: Dra. Yannay Casas Ledón



Profesor Comisión: Dr. Mauricio Aguayo Arias



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- | | |
|----------------------------------|--------------------------|
| ✓ Aprobado por Unanimidad : | (En Escala de 4,0 a 4,9) |
| ✓ Aprobado con Distinción | (En Escala de 5,0 a 5,6) |
| ✓ Aprobado con Distinción Máxima | (En Escala de 5,7 a 7,0) |

Concepción, septiembre 2025

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	10
RESUMEN	11
1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. PROBLEMÁTICA	17
3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	17
4. OBJETIVOS	17
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	17
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
5. ANTECEDENTES GENERALES	19
5.1 DISPONIBILIDAD HÍDRICA	19
5.2 AGUA DE ROCÍO Y SU CAPTURA	20
5.3 AGUA DE NIEBLA Y SU CAPTURA.....	24
5.4 BIOPLÁSTICOS.....	25
6. METODOLOGÍA.....	30
6.1 ELABORACIÓN DE FORMULACIONES PLA-PEG/PBAT	30
6.2 CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS, FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LAS FORMULACIONES DE PLA-PEG/PBAT	31
6.3 ELABORACIÓN DE FORMULACIONES CON PLA-PEG/PBAT/JONCRYL	32
6.4 ELABORACIÓN DE FILMS A ESCALA LABORATORIO.....	32
6.5 CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS DE LOS FILMS	33
6.6 SELECCIÓN DEL FILM BIOPLÁSTICO.....	34
6.8 IMPLEMENTACIÓN DEL FILM BIOPLÁSTICO, EN UN POTENCIAL SISTEMA DE CAPTURA DE AGUA DE ROCÍO Y NIEBLA, EN CONDICIONES REALES DE USO.....	35
7. RESULTADOS	37
7.1 PLASTIFICACIÓN DEL PLA Y ELABORACIÓN DE FORMULACIONES DE PLA-PEG/PBAT.....	37
7.2 CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS FORMULACIONES DE PLA-PEG/PBAT.....	38
7.2.1 ENSAYO DE TRACCIÓN.....	38
7.3 CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS DE LAS FORMULACIONES CON PLA - PEG/PBAT.....	40
7.3.1 ENSAYO DE CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC).....	40
7.3.2 ENSAYO TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA).....	41
7.4 CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS FORMULACIONES DE PLA-PEG/PBAT.....	41
7.4.1 ENSAYO DE DENSIDAD	41
7.4.2 ENSAYO ÍNDICE DE FLUIDEZ (MFI).....	42
7.5 ELABORACIÓN DE FORMULACIONES CON PLA-PEG/PBAT/JONCRYL	42
7.6 CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS FORMULACIONES DE PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.....	43
7.6.1 ENSAYO DE TRACCIÓN.....	43
7.7 CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS DE LAS FORMULACIONES PLA- PEG/PBAT/JONCRYL.....	45
7.7.1 ENSAYO DE CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC).....	45

7.7.2	ENSAYO TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA).....	46
7.8	CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS FORMULACIONES PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.....	46
7.8.1	ENSAYO DE DENSIDAD.....	46
7.8.2	ENSAYO ÍNDICE DE FLUIDEZ (MFI).....	47
7.9	ELABORACIÓN FILMS A ESCALA LABORATORIO.....	47
7.10	CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS FILMS DE PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.....	48
7.10.1	ENSAYO DE TRACCIÓN DE LOS FILMS (SENTIDO EXTRUSIÓN).....	48
7.10.2	ENSAYO DE TRACCIÓN DE LOS FILMS (SENTIDO TRANSVERSAL).....	51
7.11	CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS FILMS DE PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.....	54
7.11.1	ENSAYO DE PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA.....	54
7.11.2	ENSAYO DE ÁNGULO DE CONTACTO	54
7.11.3	ENSAYO DE DESINTEGRACIÓN	55
7.12	SELECCIÓN Y ELABORACIÓN DEL FILM A ESCALA PILOTO	57
7.13	FABRICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CAPTURA DE ROCÍO Y NIEBLA.....	57
7.14	RENDIMIENTO DE CAPTURA DE AGUA DE ROCÍO Y NIEBLA DE LOS SISTEMAS INSTALADOS EN EL SECTOR DE PUAHÚN, COMUNA DE TREHUACO.....	58
8.	DISCUSIÓN.....	60
9.	CONCLUSIÓN.....	65
10.	CONTRIBUCIÓN A LOS ODS	67
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
12.	ANEXOS.....	80
12.1	ANEXO 1.....	80
12.2	ANEXO 2.....	94
12.3	ANEXO 3.....	94
12.4	ANEXO 4.....	95

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.	RENDIMIENTO DE ROCÍO PROMEDIO.	21
TABLA 2.	RENDIMIENTO DE NIEBLA.	25
TABLA 3.	FORMULACIONES ELABORADAS Y PROPORCIONES DE LAS MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS.....	30
TABLA 4.	FORMULACIONES ELABORADAS Y PROPORCIONES DEL PLA PLASTIFICADO, PBAT Y JONCRYL.....	32
TABLA 5.	FORMULACIONES PRENSADAS.	38
TABLA 6.	RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO DE LAS FORMULACIONES CON PLA-PEG/PBAT.	41
TABLA 7.	RESULTADOS DE ENSAYO TERMOGRAVIMÉTRICO DE LAS FORMULACIONES CON PLA-PEG/PBAT.	41
TABLA 8.	RESULTADOS DE DENSIDAD DE LAS FORMULACIONES CON PLA-PEG/PBAT.....	42
TABLA 9.	RESULTADOS DE ÍNDICE DE FLUIDEZ (MFI) DE LAS FORMULACIONES CON PLA-PEG/PBAT.	42

TABLA 10. FORMULACIONES OBTENIDAS PRODUCTO DEL MEZCLADO EN EXTRUSORA..	43
TABLA 11. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO DE LAS FORMULACIONES CON PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.	46
TABLA 12. RESULTADOS DE ENSAYO TERMOGRAVIMÉTRICO DE LAS FORMULACIONES CON PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.....	46
TABLA 13. RESULTADOS DE DENSIDAD DE LAS FORMULACIONES CON PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.....	47
TABLA 14. RESULTADOS DEL ÍNDICE DE FLUIDEZ (MFI) DE LAS FORMULACIONES DE PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.....	47
TABLA 15. RESULTADOS DE LA PERMEABILIDAD PROMEDIO DE LOS FILMS CON PLA-PEG/PBAT/JONCRYL Y DE POLIETILENO.....	54
TABLA 16. RESULTADOS DEL ÁNGULO DE CONTACTO PROMEDIO DE LOS FILMS CON PLA-PEG/PBAT/JONCRYL Y DE POLIETILENO.....	54
TABLA 17. RESULTADOS DE LA DEGRADACIÓN GRADUAL DE LOS FILMS MEDIANTE EL PASO DE LOS DÍAS.....	55
TABLA 18. CONTRIBUCIÓN DEL ESTUDIO A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE.....	67
TABLA 19. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FORMULACIONES DE PLA-PEG/PBAT.....	80
TABLA 20. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	80
TABLA 21. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FORMULACIONES DE PLA-PEG/PBAT.....	80
TABLA 22. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	81
TABLA 23. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FORMULACIONES DE FORMULACIONES DE PLA-PEG/PBAT.....	81
TABLA 24. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	81
TABLA 25. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FORMULACIONES DE PLA-PEG/PBAT.....	82
TABLA 26. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	82
TABLA 27. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FORMULACIONES DE PLA-PEG/PBAT.....	82
TABLA 28. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	83
TABLA 29. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FORMULACIONES DE PLA-PEG/PBAT.....	83
TABLA 30. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	83
TABLA 31. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FORMULACIONES DE PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.....	84
TABLA 32. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	84
TABLA 33. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FORMULACIONES DE PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.....	84
TABLA 34. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	84
TABLA 35. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FORMULACIONES DE PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.....	85

TABLA 36. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	85
TABLA 37. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FORMULACIONES DE PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.....	85
TABLA 38. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	85
TABLA 39. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FORMULACIONES DE PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.....	85
TABLA 40. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	86
TABLA 41. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FORMULACIONES DE PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.....	86
TABLA 42. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	86
TABLA 43. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FILMS.	86
TABLA 44. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	87
TABLA 45. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FILMS.	87
TABLA 46. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	88
TABLA 47. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FILMS.	88
TABLA 48. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	88
TABLA 49. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FILMS.	89
TABLA 50. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	89
TABLA 51. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FILMS.	89
TABLA 52. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	90
TABLA 53. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FILMS.	90
TABLA 54. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	90
TABLA 55. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FILMS.	91
TABLA 56. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	91
TABLA 57. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FILMS.	91
TABLA 58. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	92
TABLA 59. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FILMS.	92
TABLA 60. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	92
TABLA 61. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK DE FILMS.	93
TABLA 62. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE VARIANZAS.	93
TABLA 63. GRADOS DE DESINTEGRACIÓN DE LOS FILMS.	94
TABLA 64. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK	94
TABLA 65. ANÁLISIS ESTADÍSTICO T.....	94
TABLA 66. PRUEBA DE SHAPIRO-WILK.	94
TABLA 67. ANÁLISIS ESTADÍSTICO T.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EFICIENCIA DE RECOLECCIÓN DEL COLECTOR PASIVO.	22
FIGURA 2. CLASIFICACIÓN DE PLÁSTICOS.	26
FIGURA 3. LÍNEA DE EXTRUSIÓN DE PELÍCULA SOPLADA.	33
FIGURA 4. PROTOTIPO DE SISTEMA DE CAPTURA DE AGUA DE ROCÍO Y NIEBLA.	35
FIGURA 5. MAPA DE UBICACIÓN DE SISTEMAS DE CAPTURA DE AGUA DE ROCÍO Y NIEBLA INSTALADOS.	36
FIGURA 6. FORMULACIONES ELABORADAS CON PLA, PEG Y PBAT.	37
FIGURA 7. MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LAS FORMULACIONES CON PLA-PEG/PBAT.	39
FIGURA 8. ESFUERZO MÁXIMO DE LAS FORMULACIONES CON PLA-PEG/PBAT.	39
FIGURA 9. ALARGAMIENTO EN EL PUNTO DE ROTURA DE LAS FORMULACIONES CON PLA-PEG/PBAT.	40
FIGURA 10. ESFUERZO EN EL PUNTO DE ROTURA DE LAS FORMULACIONES CON PLA-PEG/PBAT.	40
FIGURA 11. MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LAS FORMULACIONES CON PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.	44
FIGURA 12. ESFUERZO MÁXIMO DE LAS FORMULACIONES CON PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.	44
FIGURA 13. ALARGAMIENTO EN EL PUNTO DE ROTURA DE LAS FORMULACIONES CON PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.	45
FIGURA 14. ESFUERZO EN EL PUNTO DE ROTURA DE LAS FORMULACIONES CON PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.	45
FIGURA 15. FILMS ELABORADOS A ESCALA LABORATORIO EN EXTRUSORA.	47
FIGURA 16. MÓDULO DE ELASTICIDAD DE FILMS DE PLA-PEG/PBAT/JONCRYL Y DE POLIETILENO EN SENTIDO EXTRUSIÓN.	49
FIGURA 17. ESFUERZO MÁXIMO DE FILMS DE PLA-PEG/PBAT/JONCRYL Y DE POLIETILENO EN SENTIDO EXTRUSIÓN.	49
FIGURA 18. ALARGAMIENTO EN EL PUNTO DE ROTURA DE FILMS DE PLA-PEG/PBAT/JONCRYL Y DE POLIETILENO EN SENTIDO EXTRUSIÓN.	50
FIGURA 19. ESFUERZO EN EL PUNTO DE ROTURA DE FILMS DE PLA-PEG/PBAT/JONCRYL Y DE POLIETILENO EN SENTIDO EXTRUSIÓN.	50
FIGURA 20. MÓDULO DE ELASTICIDAD DE FILMS DE PLA-PEG/PBAT/JONCRYL Y DE POLIETILENO EN SENTIDO TRANSVERSAL.	52
FIGURA 21. ESFUERZO MÁXIMO DE FILMS DE PLA-PEG/PBAT/JONCRYL Y DE POLIETILENO EN SENTIDO TRANSVERSAL.	52
FIGURA 22. ALARGAMIENTO EN EL PUNTO DE ROTURA DE FILMS DE PLA-PEG/PBAT/JONCRYL Y DE POLIETILENO EN SENTIDO TRANSVERSAL.	53

FIGURA 23. ESFUERZO EN EL PUNTO DE ROTURA DE FILMS DE PLA-PEG/PBAT/JONCRYL Y DE POLIETILENO EN SENTIDO TRANSVERSAL.	53
FIGURA 24. FILM A ESCALA PILOTO.	57
FIGURA 25. PROTOTIPOS DE SISTEMAS DE CAPTURA DE AGUA DE ROCÍO Y NIEBLA.	58
FIGURA 26. RENDIMIENTOS DE CAPTURA DE AGUA DE ROCÍO Y NIEBLA EN EL PUNTO 1	59
FIGURA 27. RENDIMIENTOS DE CAPTURA DE AGUA DE ROCÍO Y NIEBLA EN EL PUNTO 2	59
FIGURA 28. INTERACCIÓN DE LOS MATERIALES CON EL AGUA.	95



AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todos los integrantes de mi familia por su apoyo incondicional, especialmente a mis padres, quienes me han brindado el amor y las herramientas necesarias para poder cumplir todas mis metas. A mi hermana Daniela, gracias por tu paciencia y consejos durante los momentos más difíciles. También, agradecer a mis amigas, quienes, con su motivación, alegría y compañía, hicieron que esta experiencia fuese más amena.

Agradezco a todas las personas que pude conocer y que amablemente me brindaron ayuda durante este proceso, tanto en UDT como en Puahún. También al tío Guille, del EULA, quien participó en la construcción e instalación de las bases de madera de los prototipos.

Por último, quiero darle mis más sinceros agradecimientos a la profesora Mariela y al profesor Juan Carlos, quienes, con paciencia y amabilidad, me guiaron y aconsejaron durante el desarrollo de esta tesis.

RESUMEN

En Chile, el aumento de la escasez hídrica en la última década está afectando a todo el territorio. En particular, Chile central ha enfrentado problemas de disponibilidad de agua, dadas las sequías cada vez más frecuentes, intensas y persistentes. En consecuencia, las personas y los ecosistemas naturales se han visto perjudicados, para sostener sus actividades y equilibrio natural.

Relativo a la población humana, las personas que habitan en los sectores rurales cuentan con una alta necesidad de agua para distintos usos esenciales, además del consumo humano, tales como el riego y consumo de agua por animales. Por lo mismo, ante la problemática de la disponibilidad hídrica, resulta imprescindible explorar nuevas alternativas de obtención de agua, que sean complementarias a las fuentes convencionales existentes. En este contexto, el agua de rocío y de niebla surgen como una de las alternativas. Para la obtención de agua de rocío y niebla se utilizan sistemas conocidos como colectores y atrapanieblas, que cuentan con superficies captadores que están elaboradas a partir de Polietileno, un plástico, derivado del petróleo, contaminante para el medio ambiente. No obstante, estas superficies de polietileno podrían ser potencialmente reemplazadas por superficies elaboradas a partir de materiales bioplásticos, que son más sostenibles con el medio ambiente, dada su biodegradabilidad.

Este estudio tiene como objetivo desarrollar un material bioplástico con potencial uso en prototipos de captación de agua de rocío y niebla. Para ello, se elaboraron formulaciones y films con distintas proporciones de Ácido Poliláctico (PLA) y Polibutilén adipato co-tereftalato (PBAT), dos biopolímeros biodegradables y compostables. Posteriormente, se caracterizaron sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas. Tras la etapa de laboratorio, el bioplástico desarrollado fue implementado en un prototipo instalado en la localidad rural de Puahún, comuna de Trehuaco, en la región de Ñuble. Esto con la finalidad de evaluar su potencial superficie captadora de agua de rocío y niebla.

Los resultados mostraron que el film bioplástico se caracteriza por su flexibilidad, resistencia y comportamiento hidrofóbico, propiedades que lo posicionan como una alternativa prometedora para sistemas de captación de agua no convencional. En particular, los prototipos instalados en

Puahún que utilizaron este bioplástico lograron recolectar entre 71.1 y 93.36 ml más de agua de rocío y niebla que aquellos con superficie de polietileno, demostrando un rendimiento superior.

En conclusión, el bioplástico desarrollado es biodegradable y más sostenible que los plásticos convencionales, y demostró un buen desempeño como componente de sistemas de captación de agua de niebla y rocío. Esto lo convierte en una alternativa prometedora para enfrentar la escasez hídrica en zonas rurales con alta demanda y baja disponibilidad de agua.

1. INTRODUCCIÓN

El agua representa el 70% de la superficie de la Tierra, no obstante, solo el 0,62% puede ser utilizado para el consumo humano, agricultura y actividades industriales. Este porcentaje de agua resulta imprescindible para la vida, sin embargo, es un bien muy escaso dado su alto consumo y distribución desigual (Escenarios Hídricos 2030, 2018). Se estima que el 30% de los grandes reservorios de aguas subterráneas se están agotando (UNESCO, 2021). Si bien, el descenso de la disponibilidad de agua dulce está afectando a todo el planeta, existen países con mayor afectación a la escasez hídrica, como Sudáfrica en donde se estima que el 14% de la población vive en condiciones de escasez hídrica, mientras que en los países árabes el 86% de la población vive con escasez absoluta de agua. En tanto, países como Israel y Corea cuentan con la disponibilidad hídrica per cápita más baja del mundo (OECD, 2015; UNESCO, 2021).

Producto del crecimiento poblacional y el desarrollo económico, se espera que la demanda de agua incremente en todo el planeta hasta un 55% para 2050, intensificando aún más los problemas de disponibilidad hídrica (WWAP, 2014; Greve et al., 2018). El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2008) indica además que los ecosistemas naturales que proveen agua son vulnerables y están siendo afectados por el continuo uso.

Relativo a Chile, distintos lugares del país se encuentran con problemas de disponibilidad hídrica dada las sequías cada vez más frecuentes, intensas y persistentes, que son ocasionadas tanto por la tendencia hacia la disminución de las precipitaciones como el aumento de las temperaturas y la pérdida de nieve (Garreaud et al., 2020). En particular, Chile central ha experimentado un déficit anual de lluvias de hasta un 45%, lo que influye directamente en la disponibilidad de recursos hídricos debido a que produce una disminución de los niveles de aguas subterráneas, los volúmenes de los embalses y el caudal de los ríos (Garreaud et al, 2017). Esta problemática afecta sobre todo a las zonas rurales y a los grupos en situación de pobreza debido a que, por lo general, cuentan con infraestructuras hídricas más precarias (ONU, 2021).

En las zonas rurales, el 46% de la población no cuenta con un abastecimiento formal de agua potable por lo que recurren a otras estrategias de abastecimiento. Dentro de las estrategias para obtener el recurso hídrico está la gestión individual donde extraen agua mediante pozos, punteras, ríos, vertientes, esteros y también la provisión de agua a través de camiones aljibes; y

la gestión comunitaria, donde se agrupan como comités de aguas potables rurales para obtener agua potable rural (Álvarez et al., 2023). Sin embargo, en zonas rurales que no están semiconcentradas, el acceso al agua puede ser más complicado. Además, cabe destacar que, si bien el agua potable en zonas rurales está destinada para el consumo humano, las personas no solo utilizan este recurso para su propio consumo, sino que también para el riego y la alimentación de mascotas y animales. Por ende, ante la necesidad alta en la ruralidad por obtener agua para otros usos, se abre paso la posibilidad de la búsqueda de otras alternativas, complementarias, a las fuentes convencionales de abastecimiento de agua.

Existen diferentes alternativas en la actualidad de obtención de agua, dentro de las cuales podemos encontrar sistemas no convencionales de abastecimiento de agua como sistemas de captación de aguas pluviales, obras de almacenamiento para aguas superficiales y sistemas de bombeo para aguas superficiales y subterráneas (FAO, 2011). No obstante, de acuerdo con las características geográficas de Chile, una de las alternativas potenciales puede ser el agua de niebla, donde se implementa un sistema conocido como atrapaniebla. Este es una estructura que captura el agua de niebla mediante un elemento de captación, el cual comúnmente corresponde a una malla raschel. Los atrapanieblas se han utilizado en zonas desérticas y/o semiáridas costeras. Por ejemplo, en la Serena, donde el clima se caracteriza por ser semiárido, el Instituto de Geografía de la Universidad Católica en conjunto con la Corporación Nacional Forestal (CONAF) e investigadores de la Universidad de La Serena instalaron atrapanieblas en la comunidad de Chungungo, con la finalidad de dotar con agua a viviendas del sector (Devetak, 2014).

Otra alternativa potencial es el agua de rocío. El rocío es un fenómeno natural que ofrece una cantidad de agua significativa en lugares con escasez hídrica, pudiendo verse como una fuente de abastecimiento no convencional de agua (Acosta & Herrera, 2021; Trosseille et al., 2021). La captación de agua de rocío se realiza mediante la utilización de colectores, los cuales corresponden a estructuras que cuentan con una superficie, que al enfriarse y al presentar una temperatura por debajo de la del punto de rocío, provoca que el vapor de agua atmosférico se condense al entrar en contacto con ella, generándose agua. Esta opción resulta prometedora dado que su construcción es sencilla, los materiales requeridos son de fácil adquisición y requiere de un bajo mantenimiento e inversión (Arias et al., 2022). Además, la recolección de rocío suele

ser muy estable lo que permite que el agua pueda utilizarse inmediatamente después de su producción. Esta representa una gran opción tanto en zonas que, durante las noches, presentan vientos menores, cielos despejados y una alta humedad relativa, como en sectores donde las precipitaciones son menos recurrentes. Un ejemplo de la versatilidad de los colectores es el estudio realizado en Combarbalá (Coquimbo, Chile), que es una zona que se caracteriza por ser un sector semiárido que cuenta con un clima estepario templado. En dicho estudio la superficie captadora de agua de rocío fue un techo galvanizado de una vivienda, mediante el cual se evaluó la productividad del sistema de captación de agua implementado, teniendo como resultado un rendimiento diario de 1.9 L d^{-1} (Carvajal et al., 2018).

En este contexto, en la región del Ñuble, ubicada en Chile central y caracterizada por presentar una temporada de lluvias (Junio-Agosto) y una temporada seca (Diciembre-Marzo), el rocío y la niebla podrían representar una alternativa promisorio, especialmente en la temporada seca. Esto producto de que en las zonas costeras de la región suele generarse niebla gracias a la vaguada costera, mientras que el rocío también suele estar presente en la zona con frecuencia, al no presentar grandes limitaciones geográficas, dado que el vapor de agua atmosférico siempre está presente en cualquier sector del mundo (Deuman, 2023; Verbrugghe & Khan, 2024).

Con respecto a los estudios cuya temática son los sistemas de abastecimiento de agua de rocío y niebla, cabe mencionar que gran parte de ellos se han realizado con superficies captadoras que están fabricadas a partir de materiales plásticos convencionales. Este tipo de plástico se ha vuelto fundamental en los últimos 40 años, principalmente debido a su versatilidad, resistencia y rentabilidad. No obstante, los residuos plásticos resultan problemáticos para el planeta, debido a su largo tiempo de degradación que supera los 100 años, lo que afecta la salud humana y ambiental (Jayalath et al., 2025; Zenner de Polanía & Peña Baracaldo, 2013). De acuerdo con diversos informes de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 2022), el consumo de plásticos alcanzará los 1231 millones de toneladas para 2060, lo cual incrementaría significativamente los problemas ambientales asociados a estos materiales.

En respuesta a la problemática ambiental de los plásticos derivados de recursos fósiles, los bioplásticos, que son materiales de origen natural y/o biodegradables, han surgido como una alternativa más respetuosa y sostenible con el medio ambiente, puesto que se ha identificado que pueden degradarse con mayor rapidez en el entorno, producto de actividades enzimáticas

microbianas (Abang et al., 2023; Chauhan et al., 2024). Existen distintos tipos de bioplásticos, dentro de los cuales podemos encontrar el Ácido poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés), Poli Butilen adipato co-tereftalato (PBAT, por sus siglas en inglés), Policaprolactona, polímeros de celulosa, polímeros basados en almidón, polihidroxialcanoatos, poliuretanos, entre otros (Costa et al., 2023; REMAR, 2011). Estos son aplicados para diversos fines, como la industria cosmetológica, automovilística, el envasado de alimentos y la agricultura (Chauhan et al., 2024). La creciente demanda del mercado por establecer productos más sostenibles ha ocasionado un incremento en la producción de bioplásticos en los últimos años (Jayakumar et al., 2023). La organización European Bioplastics (2021) estima que el mercado mundial de bioplásticos alcanzará los 7.59 millones de toneladas para el 2026.

Producto del progreso emergente de estos materiales, en la actualidad es posible desarrollar bioplásticos que pueden competir con los plásticos convencionales, debido a sus similitudes funcionales (Jayakumar et al., 2023). Esto se debe, principalmente, a la mejora continua de sus propiedades mecánicas, térmicas y físicas. En particular, la combinación de PLA y PBAT ha sido ampliamente estudiada, ya que su mezcla permite obtener mejores propiedades (Chen et al., 2021). Según la literatura, de esta combinación se obtienen productos biodegradables, térmicamente estables, flexibles y resistentes a la tracción (Pietrosanto et al., 2020; Yu et al., 2024).

De acuerdo al conocimiento de la escasez de agua en zonas rurales no concentradas de Chile central y a la necesidad de encontrar alternativas que puedan fortalecer el abastecimiento de agua en dichas zonas, resulta relevante estudiar alternativas no convencionales de abastecimiento de agua, como los sistemas de captura de agua de rocío y niebla. No obstante, gran parte de estos sistemas utilizan superficies captadoras elaboradas a partir de plásticos que son contaminantes. Es por ello, que la presente investigación tiene como finalidad desarrollar un bioplástico en base a materiales biodegradables para su aplicación en un sistema de captura de agua de rocío y niebla, el cual se implementará en Puahún, zona rural de Chile central.

2. PROBLEMÁTICA

En Chile central, el uso intensivo del agua, junto con la creciente frecuencia e intensidad de sequías ha provocado una disminución en la disponibilidad hídrica. En consecuencia, los ecosistemas, los acuíferos y las personas se ven afectadas, dado que la disponibilidad hídrica resulta insuficiente para sostener los procesos ecosistémicos, productivos y necesidades básicas de la población. En las zonas rurales, las personas no solo utilizan el agua para el consumo humano, sino que también para la alimentación de mascotas o animales y el riego de jardines y huertos, por lo que existe una necesidad alta en la ruralidad por contar con mayor disponibilidad hídrica. Los sistemas de abastecimiento de agua más comunes son los camiones aljibes, la compra de bidones, el acarreo desde vertientes y la extracción de aguas subterráneas. No obstante, estas alternativas suelen ser poco sostenibles y costosas (Garreaud et al., 2020; Amulén, 2019). De acuerdo con lo anterior, la pregunta de investigación y objetivos son los siguientes:

3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuáles son las principales características mecánicas, térmicas y físicas de un bioplástico elaborado en base a biopolímeros como el PLA y PBAT, para ser utilizado en un sistema de captura de agua de rocío y niebla?

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Desarrollar un bioplástico en base a biopolímeros como PLA y PBAT para ser utilizado en un potencial sistema de captura de agua de rocío y niebla.

4.2 Objetivos específicos

- 1) Elaborar formulaciones termoplásticas compuestas por materiales biodegradables de PLA y PBAT, utilizando distintas proporciones de estos biopolímeros.
- 2) Caracterizar las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de las formulaciones y films compuestos por distintas proporciones de PLA y PBAT.
- 3) Implementar el film bioplástico, desarrollado en el laboratorio, en un potencial sistema de captura de agua de rocío y niebla, en condiciones reales de uso.

5. ANTECEDENTES GENERALES

5.1 Disponibilidad hídrica

El agua es un recurso vital fundamental para satisfacer las distintas necesidades humanas básicas, el desarrollo industrial, la producción de alimentos, y el mantenimiento de los ecosistemas (Córdoba et al., 2010). En las últimas décadas, han ocurrido cambios en la disponibilidad hídrica, producto del crecimiento poblacional, el aumento significativo en la extracción de agua y el calentamiento global, que han ocasionado situaciones de estrés hídrico en varios lugares del mundo (Shen et al., 2014). Un estudio realizado sobre el estado de la disponibilidad hídrica indica que 87 de 180 países presentarán condiciones de escasez de agua para el año 2050 (Baggio et al., 2021).

Chile cuenta con una disponibilidad hídrica de aproximadamente 54000 m³/hab/año, sin embargo, su distribución es muy heterogénea, siendo menor en el norte del país y mayor en el sur (Banco mundial, 2021). Además, desde el 2010 el país ha enfrentado una megasequía, producto de la disminución de las precipitaciones, el aumento de las temperaturas y la sobreexplotación del agua, factores que comienzan a limitar su uso (CR2, 2015; Escenarios Hídricos 2030, 2019).

Una de las principales zonas del territorio afectadas por las prolongadas sequías son las zonas rurales, debido a que son generalmente áreas semiconcentradas o incluso aisladas que no tienen acceso directo al agua como las zonas urbanas. Según la encuesta CASEN del 2017, más de 2.2 millones de personas habitan en sectores rurales en Chile (Chloé et al., 2022). Álvarez et al. (2023) mencionan que, en zonas rurales, las personas se han visto afectadas por detenciones en el suministro de agua, producto de la disminución de las aguas subterráneas, lo que les ha dificultado realizar sus necesidades básicas y actividades agrícolas. En consecuencia, las personas se han visto obligadas a buscar fuentes de abastecimiento de agua complementarias y/o alternativas como los camiones aljibes y la compra de bidones, lo cual resulta difícil de mantener, logísticamente complejo y costoso (Amulén, 2019). En este contexto, áreas de Chile Central como el Valle del Itata, donde gran parte de la población vive en zonas rurales, la problemática de la disminución de la disponibilidad de agua afecta el bienestar de sus habitantes. Este sector se caracteriza por una intensa actividad agrícola de medio escala como también de

subsistencia, lo que aumenta la demanda de agua tanto para el consumo humano como para irrigación. Para reducir la brecha, en el acceso a este recurso vital, el Estado de Chile ha implementado el traslado de agua potable mediante camiones aljibe, una medida que abastece al 25% de la población rural. Sin embargo, el costo mensual de esta medida es elevado, alcanzando aproximadamente los 581 millones de pesos (DGA, 2018).

En la Región del Ñuble, donde se alberga gran parte del Valle del Itata, se han realizado diversos estudios como consecuencia de la disminución gradual de los recursos hídricos subterráneos y superficiales. Un ejemplo de ello, es el estudio realizado sobre la cuenca del río Itata, que indica que esta cuenca presenta al menos dos meses consecutivos de la estación de verano con déficit hídrico. Además, en este estudio se destaca la importancia del río Itata, dado los distintos usos hidrográficos que este entrega, tales como el riego, la captación para agua potable, la generación eléctrica, la actividad minera, la actividad industrial, la biodiversidad y los usos ancestrales (DGA, 2004). En otra investigación, se revela que el agua superficial de la zona proviene de los ríos y se transporta mediante canales, donde es utilizada principalmente para la irrigación. Sin embargo, estas aguas han disminuido, por lo que la disponibilidad del recurso hídrico es de gran preocupación en el territorio. En este escenario y con la finalidad de solucionar las necesidades hídricas de la zona, el Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP) y la Comisión Nacional de Riego (CNR) han promovido como potencial solución la construcción de pequeños tranques de agua (Uribe, 2020). Por su parte, en el estudio realizado por la consultora Aquaterra Ingeniero (2011) se identificaron varios acuíferos presentes en la región que son explotados, en gran medida, para el riego y el consumo de agua potable. Sin embargo, a largo plazo su uso puede verse limitado producto de la alta demanda. En este contexto, resulta relevante estudiar fuentes no convencionales de abastecimiento de aguas dado que, tal como se puede evidenciar en los estudios mencionados, las fuentes convencionales están siendo constantemente utilizadas, por lo que cada vez resulta imprescindible contar con fuentes complementarias de agua, para garantizar el suministro necesario y cubrir todas las necesidades hídricas de la región.

5.2 Agua de rocío y su captura

El rocío es un fenómeno natural, físico y meteorológico que se forma cuando el vapor de agua de la atmósfera se condensa al entrar en contacto con una superficie cuya temperatura es menor

que la temperatura del punto de rocío (Ritter et al., 2019). El mejor escenario para que ocurran eventos de rocío es durante la noche, con una alta humedad relativa, idealmente superior a 80%, con poca nubosidad y con velocidades de vientos menores a 4 m/s (Carvajal et al., 2018). La formación de rocío es muy habitual, incluso en las zonas más secas del mundo, debido a la frecuencia de ocurrencia que tienen las condiciones que permiten la generación de los eventos de rocío (Beysens, 1995). Por lo mismo, la captación de agua de rocío podría representar una oportunidad para aprovechar una fuente de abastecimiento de agua alternativa. Además, la recolección de rocío resulta prometedora debido a que el agua recolectada no tiene costo, salvo la inversión inicial (Arias et al., 2022).

Relativo al rendimiento de rocío, la recolección máxima teórica registrada ha sido de 0,8 L/m²/día (Muselli et al., 2009). Sin embargo, los rendimientos pueden variar dependiendo de las características geográficas y condiciones climáticas del territorio. A continuación, en la tabla 1 se presentan algunos estudios que reportan resultados de rendimientos de captura de agua de rocío promedio.

Tabla 1. Rendimiento de rocío promedio.

Contexto	Zona en la que se realizó el estudio	Resultados de rendimiento de rocío promedio	Autor
Internacional	Costa Dálmeta, Croacia	0,043-0,108 L/m ² /día	Muselli et al., 2009
	Islas tropicales	0,102-0,068 L/m ² /día	Clus et al., 2008
	Beiteddine, Líbano	0,13 L/m ² /día	Tomaszkiewicz et al., 2017
Nacional	Combarbalá, Coquimbo	0,056 L/m ² /día	Carvajal et al., 2018
	Santiago	0,127 L/m ² /día	Rubio et al., 2002

Nota. Tabla elaborada en base a información encontrada en la literatura.

Fuente: Muselli et al., 2009; Clus et al., 2008; Tomasziewicz et al., 2017; Carvajal et al., 2018; Rubio et al., 2002.

En cuanto a la captura de rocío, para realizarlo existen dos tipos de colectores: los colectores de rocío pasivo y los colectores activos. Los colectores activos son aquellos que utilizan una fuente

de energía adicional. Mientras que los pasivos son sistemas diseñados para recolectar rocío sin la necesidad de utilizar un suministro energético adicional, debido a que el proceso de captura solo depende de las condiciones ambientales y las propiedades físicas del sistema (Khalil et al, 2016). Con respecto a los colectores pasivos, se registran diversos colectores inspirados principalmente en la biomímesis, en donde se imitan ciertas especies que poseen la capacidad de recolectar agua de rocío para su subsistencia. Ejemplos destacados incluyen los cactus que utilizan sus espinas, los escarabajos del desierto con sus caparazones y las arañas que con sus telas captan el rocío (Fu et al., 2023). También, se han desarrollado estructuras bidimensionales y tridimensionales como placas, redes o varillas para capturar las gotas de rocío (Harrer, 2022).

En relación con el rendimiento de captura de agua de rocío de los colectores pasivos, para que este sea efectivo es necesario tener en cuenta ciertos parámetros que pueden influir en su eficiencia. Dichos parámetros son: los impuestos y los variables. Los parámetros impuestos corresponden a las condiciones meteorológicas, como la emisividad, la humedad relativa y el viento. Mientras los parámetros variables son los componentes del colector, tales como su posición en el terreno, el material del que está hecho, su forma y tamaño (Ver figura 1).

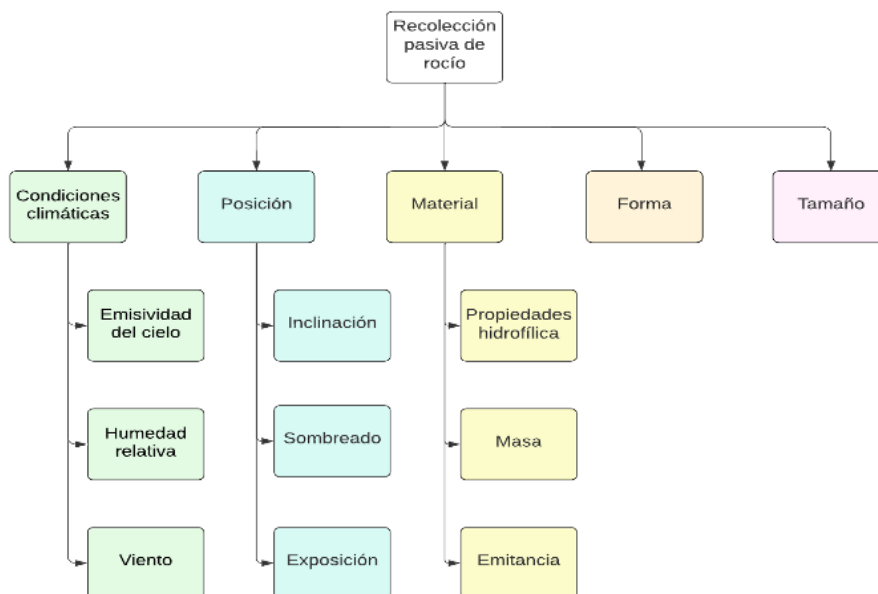


Figura 1. Factores que influyen en la eficiencia de recolección del colector pasivo.

Nota. Figura elaborada en base a información encontrada en la literatura.

Fuente: Khalil et al., 2016.

Referente a las condiciones meteorológicas, la emisividad del cielo está relacionada con la formación de rocío, debido a que una mayor emisividad es ideal para que se produzca la condensación del vapor de agua de la atmósfera (Khalil et al., 2016). Por su parte, en cuanto a la humedad relativa, varios estudios han identificado una relación logarítmica entre el rendimiento de rocío y la humedad relativa. Con respecto a la velocidad del viento, es fundamental que esta sea baja para que el vapor de agua de la atmósfera sea transportado naturalmente a la superficie del colector (Khalil et al., 2016).

Por otro lado, relativo a los componentes del colector, estudios han descubierto que el tamaño del colector influye en el rendimiento de rocío. Por ejemplo, se encontró que un colector de 900 m² presentó una reducción de captación de rocío de un 42% en comparación con cuatro colectores planos de 1m² (Sharan et al., 2007). También, se ha estudiado la relación del rendimiento de la captación de rocío con la forma del colector. En los Países Bajos, se instaló una pirámide invertida con un ángulo de 30°, y se encontró que este sistema recogía un 20% más de agua que un colector de rocío plano estándar de 1m² (Jacobs et al., 2008). La posición del colector, en cuanto a inclinación, exposición y sombreado también influye en la formación de rocío. En el caso de una investigación realizada en la India se reveló que la condensación de agua de rocío era un 35% mayor para un colector que estaba más tiempo en la sombra que uno expuesto al sol (Sharan et al., 2007). Además, un estudio realizado en Francia evidenció que un colector inclinado a 30° aumentaba el rendimiento de rocío hasta un 20% (Beysens et al., 2003). Por su parte, la materialidad y la masa de la superficie captadora de rocío influyen en el rendimiento de recolección. Alnaser y Barakat (2000) concluyeron que una superficie pulida mejora la captación de rocío, al permitir que el agua fluya por la superficie fácilmente.

En investigaciones sobre captura de rocío, los colectores pasivos comúnmente utilizados son aquellos que cuentan con tres partes principales: panel, marco y canalón de recolección. Estos sistemas cuentan con una lámina de plástico, generalmente, de polietileno, dado a que es el material que se recomienda utilizar debido a su alta emisividad (rango de 8-13 μ m) y baja absorción de longitud de onda corta (Beysens et al., 2003). Esta lámina va montada en un marco con una superficie de alrededor de 1 $\times$ 1 m². Dicho marco va inclinado a 30° alrededor de la horizontal. El ángulo mencionado, se considera óptimo para la recolección de rocío, puesto que

proporciona un equilibrio entre el intercambio radiactivo atmosférico y el desprendimiento asistido por gravedad (Tuure et al., 2020).

5.3 Agua de niebla y su captura

La niebla es un fenómeno geofísico que se produce cuando, a causa de la disminución de la temperatura, el vapor de agua se condensa, transformándose en pequeñas gotas de aguas que se mantienen suspendidas en el aire, a nivel de la superficie terrestre (Peñaloza & Peñaloza, 2020). La captación de niebla se ha implementado en zonas montañosas costeras, que presentan vientos constantes y alturas medias entre los 500 y 1200 metros sobre el nivel del mar (Carvajal et al., 2020).

Relativo a la captura de agua de niebla, esta puede recolectarse mediante captadores que pueden ser bidimensionales o tridimensionales. Generalmente, la estructura estándar consta de un bastidor metálico que otorga el soporte estructural, y una malla que corresponde a la superficie que capta el agua de niebla. La recolección de agua de niebla resulta una alternativa prometedora debido a que el sistema que se utiliza es un sistema pasivo, de bajo costo y poco mantenimiento (Galán, 2023).

Referente al rendimiento de captura de agua de niebla, se ha reportado que los sistemas estándar pueden recolectar entre 3 a 5 L/m²/día. No obstante, los rendimientos pueden variar dependiendo del tipo de sistema y las características geográficas y climáticas del territorio, por lo que también se han registrado captaciones de niebla de hasta 30 L/m²/día (Lopez, 2021). A continuación, en la tabla 2 se presentan algunos estudios que reportan resultados de rendimientos promedios de captura de agua de niebla.

Tabla 2. *Rendimiento de niebla.*

Contexto	Zona en la que se realizó el estudio	Resultados de rendimiento de niebla promedio	Autor
Internacional	Colombia, desierto de La Guajira	1.4 l/m ² /d	Simón, 2009
	España, Islas Canarias	0.2 l/m ² /d	Simón, 2009
Nacional	Parque Nacional del Bosque de Fray Jorge, Coquimbo	3 l/m ² /d	Simón, 2009
	Cerro Falda Verde (Atacama)	1.43 l/m ² /d	Larrain et al., 2002
	El tofo, Coquimbo	2.98 l/m ² /d	Larrain et al., 2002
	Desierto de Atacama	0.8 l/m ² /d	Cereceda et al., 2008

Nota. Tabla elaborada en base a información encontrada en la literatura.

Fuente: *Cereceda et al., 2008; Larrain et al., 2002; Simón, 2009.*

Existen ciertos parámetros principales que determinan la eficiencia del rendimiento de captura de agua de niebla. Dichos parámetros son la niebla, el viento y la materialidad de la superficie de recolección del sistema. En cuanto a la niebla como parámetro, la recolección de agua de niebla, en un sistema de captura, dependerá de su densidad, el tamaño de sus gotas y su distribución. Por su parte, el viento también es un parámetro importante en la eficiencia de captura agua de niebla dado que, a una mayor velocidad del viento, una mayor cantidad de gotas de agua de niebla intentarán atravesar el colector y serán capturadas. Por último, la materialidad de los sistemas es fundamental, debido a que dependiendo del material del que esté compuesta la malla, la eficiencia de recolección será mayor o menor. Por lo general, las mallas son de polietileno, de fibra o metálicas (Rodríguez, 2022).

5.4 Bioplásticos

Los bioplásticos se definen, según la organización European Bioplastics, como “plásticos que son biobasados, biodegradables, o que reúnen ambas características” (2022). Respecto a esto, es importante señalar que el hecho de que un plástico sea de origen biobasado no garantiza que sea biodegradable, aunque existen bioplásticos que cumplen con ambas características. A

continuación, en la figura 2 se presenta la clasificación de diferentes plásticos según su biodegradabilidad y su procedencia.

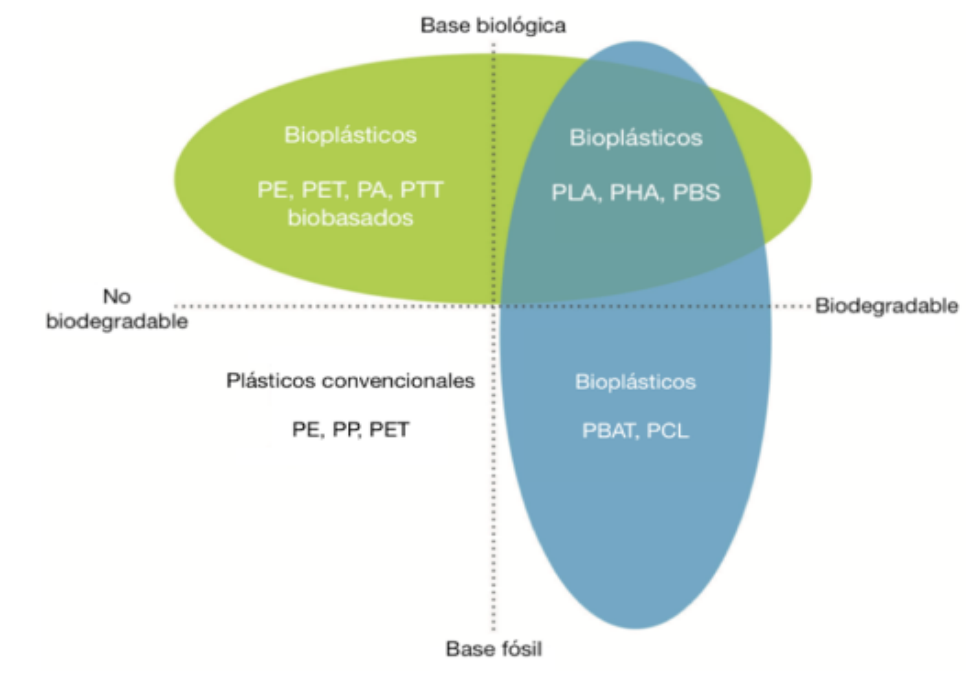


Figura 2. Clasificación de plásticos.

Fuente: Nuñez, 2019.

En relación con los plásticos biobasados y biodegradables, las materias primas que se pueden utilizar para originar estos bioplásticos son principalmente oligo y polisacáridos como, por ejemplo, almidón, celulosa, azúcar, proteínas, ligninas, entre otros (Endres, 2017). Dentro de este grupo de bioplásticos podemos encontrar el Ácido poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés), el cual corresponde a un poliéster alifático biodegradable obtenido a partir de la polimerización química del monómero de ácido láctico. El ácido láctico se produce mediante la fermentación anaerobia de sustratos que contienen carbono como la glucosa, la lactosa, la melaza y el almidón. Cabe destacar, que diferentes microorganismos pueden llevar a cabo el proceso de fermentación, entre ellos géneros como *Lactobacillus*, *Carnobacterium*, *Pediococcus* y *Streptococcus*. También es posible utilizar cepas de hongos como *Rhizopus*, que son capaces de producir ácido L (+) láctico (Serna et al., 2003; Remar, 2011).

En cuanto a sus propiedades del PLA, este es un material relativamente frágil con un alargamiento a la rotura de 7%. Por su parte, la resistencia flexional alcanza los 106 MPa, mientras que su resistencia a la tracción es de 59 MPa (Núñez, 2019). La fuerza de tensión del PLA varía entre 40-60 MPa y su módulo de tensión se encuentra en un rango entre 3-4 GPa. Sus propiedades mecánicas son comparables con las de algunos polímeros derivados de materias primas petroquímicas, como el PET (Serna et al., 2003). Por su parte, la temperatura de reblandecimiento es relativamente baja, pues oscila entre 50 y 60°C, por lo que cuando el PLA se expone a temperaturas superiores a los grados mencionados, en condiciones de alta humedad, el material se degrada rápidamente (Remar, 2011). En cuanto a la biodegradabilidad del PLA, este es totalmente biodegradable cuando está compostado, a gran escala, a temperaturas mayores o iguales a 60°C. Por el contrario, si la temperatura es inferior a 60 °C la degradación suele ser más compleja, dado que ese es el grado mínimo necesario para que el material pueda comenzar a descomponerse adecuadamente (ECOEMBES, 2008). Además, es importante mencionar que, en base a estudios realizados, para utilizar el PLA es necesario, por sus características y propiedades, plastificarlo. De acuerdo a lo reportado en la literatura, el Polietilenglicol (PEG) es uno de los plastificantes utilizados para plastificar este biopolímero, dado que la combinación de ambos mejora el alargamiento a la ruptura y aumenta la suavidad del material resultante, lo que permite que este material sea menos frágil y pueda ser mezclado con mayor facilidad con otros biopolímeros (Hu et al., 2003).

Por su parte, los bioplásticos desarrollados con materias primas petroquímicas son similares a los plásticos convencionales, sin embargo, sus enfoques son distintos. Los plásticos convencionales se centran en la durabilidad del material, mientras que los bioplásticos de origen fósil tienen como propósito la descomposición y degradación del biopolímero, a partir de las influencias ambientales (Endres, 2017). El Polibutilen Adipato Tereftalato (PBAT, por sus siglas en inglés) es un tipo de plástico biodegradable de origen fósil, producido a través de la reacción de policondensación de Ácido Adípico, 1.4-Butanodiol y Ácido Tereftálico (Bartolucci et al., 2023). Este se caracteriza por presentar una gran flexibilidad, no obstante, su resistencia es relativamente baja en comparación con otros bioplásticos, como el PLA y el PBS (Roy, 2024). Según KINGFA, las propiedades típicas de PBAT incluyen una resistencia a la tracción de 21 MPa, una elongación a la rotura del 670 %, una resistencia a la flexión de 7.5 MPa y un módulo de elasticidad de flexión de 126 MPa (Jian et al., 2020). Otra característica notable del PBAT es

su estabilidad térmica, en donde la temperatura de fusión puede alcanzar hasta los 125 °C. Con respecto a la biodegradabilidad, se ha encontrado que este material tiene una tasa de biodegradación del 90% en 3 meses (Jian et al., 2020).

Relativo a las mezclas de biopolímeros, esta es una de las estrategias utilizadas actualmente para mejorar y lograr las propiedades mecánicas, térmicas y físicas deseadas en un material bioplástico, para su aplicación final. En particular, la combinación de los biopolímeros de PLA y PBAT ha sido estudiada para mejorar las propiedades de ambos biopolímeros y obtener un producto final con mejores características. Según Pietrosanto et al. (2020) el material resultante de esta mezcla puede pasar de un material rígido y quebradizo a uno más dúctil y flexible, dependiendo de las proporciones de los biopolímeros de PLA y PBAT. Por su parte, a partir de una revisión realizada por Krishnan et al. (2016) se confirmó que los biopolímeros de PLA y PBAT se complementan bien entre sí, dado que la mezcla de ambos presenta una buena flexibilidad y resistencia, sin afectar la biodegradabilidad del material. No obstante, esta mezcla se considera inmisible, por lo que para abordar esta condición, Al-Itry et al. (2012) estudiaron la compatibilidad de las mezclas PLA/PBAT utilizando el epóxido multifuncional JONCRYL como extensor de cadena, donde se demostró que la presencia del extensor mejoró significativamente la compatibilidad del PLA con el PBAT.

Estos materiales, por ser biobasados y/o biodegradables, ofrecen beneficios ambientales que no se encuentran en los plásticos convencionales. Los bioplásticos, en comparación con los plásticos convencionales, se degradan en menos tiempo, lo que contribuye a reducir la cantidad de residuos. Al biodegradarse ayudan a minimizar el relleno de vertederos al desviar los residuos a instalaciones compostables lo que, a su vez, aliviana las cargas ambientales asociadas a estos lugares. Además, la capacidad de compostarse en zonas de suelo árido, supone que el compost resultante pueda ser utilizado como fertilizante (Olagunju & Kiambi, 2024; Remar, 2011). Por otro lado, la gestión de residuos plásticos convencionales es más compleja, dado que la eliminación de estos residuos se realiza mediante vertederos, incineradoras o instalaciones de reciclaje (Seewoo, 2024), métodos que son insuficientes para mitigar la contaminación que producen (Naderi Kalali et al., 2023), debido a que, por ejemplo, la incineración plástica genera cenizas o lodos altamente tóxicos que pueden contaminar suelos agrícolas, vertederos y ríos, creando nuevos problemas y amenazas a largo plazo para el medio ambiente y la salud de las personas.

Por su parte, el reciclaje solo pospone la disposición final del residuo, puesto que cada vez que se recicla plástico su calidad se degrada, por lo que después de un cierto número de ciclos, este termina en un relleno sanitario o incinerado (Schächtele, 2020). Además, referente a los recursos energéticos, los bioplásticos necesitan un 65% menos de energía en su producción que los plásticos convencionales, por lo que son más sostenibles ambientalmente, dado que otorgan una menor dependencia de los distintos recursos no renovables que se utilizan para generar la energía necesaria para la producción del material (Venkatachalam & Palaniswamy, 2020; Melnyk et al., 2019). En cuanto a las emisiones atmosféricas, la organización Centro para el Derecho Ambiental Internacional estima que “la producción de plásticos por sí sola podría generar alrededor de 53.5 mil millones de toneladas de emisiones de CO₂ para el año 2050”. Mientras que la producción de bioplásticos emite menos CO₂, logrando una reducción de las emisiones de entre 0.8 y 3.2 toneladas (Castillo et al., 2015; Schächtele, 2020).

6. METODOLOGÍA

6.1 Elaboración de formulaciones PLA-PEG/PBAT

Las materias primas que se consideraron para el desarrollo del bioplástico en la actividad inicial son el Ácido Poliláctico (PLA), el Poli Butilen Adipato co-Tereftalato (PBAT) y el Polietilenglicol (PEG). A partir de estas materias, se realizaron 3 formulaciones en el Laboratorio de Formulaciones Termoplásticas de la Unidad de Desarrollo Tecnológico (UDT) de la Universidad de Concepción (UDEEC).

Para la elaboración de las formulaciones, primero se plastificó el PLA con Polietilenglicol, al 7.5% del porcentaje en peso con respecto al PLA. Esto se realizó en un reómetro de torque a una temperatura de 170 °C y un tiempo de 10 minutos. Posteriormente, se mezcló el PLA plastificado con PBAT en el reómetro de torque a 160 °C, variando en las proporciones de los biopolímeros. A continuación, en la tabla 3 se presentan las formulaciones elaboradas y sus proporciones.

Tabla 3. *Formulaciones elaboradas y proporciones de las materias primas utilizadas.*

Muestra	Formulación	Proporción (%)
PLA-PEG	PLA 4032D	92.5
	PEG 1500	7.5
PLA-PEG 10/PBAT 90	PLA 4032D -PEG 1500	10
	PBAT	90
PLA-PEG 20/PBAT 80	PLA 4032D -PEG 1500	20
	PBAT	80
PLA-PEG 30/PBAT 70	PLA 4032D -PEG 1500	30
	PBAT	70

La selección de las proporciones utilizadas para la elaboración de las formulaciones se definieron de acuerdo a lo reportado en la literatura. La proporción del PEG para la plastificación del PLA se eligió conforme a lo reportado por Çelebi & Özdoğan (2021) quienes destacaron que la combinación de PLA con PEG, al 7.5 y 92.5%, respectivamente, mejora las propiedades mecánicas y térmicas del PLA, lo que contribuye a disminuir su fragilidad y mejorar su procesamiento con otros biopolímeros. Relativo a las proporciones que se utilizaron de los biopolímeros, estas se basaron en lo reportado por Su et al. (2020) quienes estudiaron la mezcla de PLA con PBAT para la elaboración de films en distintas proporciones e indicaron que las mezclas que cuentan con una mayor proporción de PBAT son levemente más miscibles que las

mezclas con un alto porcentaje en peso de PLA. Además, indicaron que, para la producción de los films mediante el método de extrusión de película soplada, el PBAT debe presentarse en la mezcla en un porcentaje en peso de al menos el 60%, mientras que el PLA es recomendable que se presente en un porcentaje en peso de un 10 al 30%. Esto se sugiere debido a que, cuando el PLA aumenta al 40%, el proceso de extrusión se vuelve inestable y suelen generarse arrugas en el film.

6.2 Caracterización de propiedades térmicas, físicas y mecánicas de las formulaciones de PLA-PEG/PBAT

La caracterización de las propiedades térmicas, físicas y mecánicas de las formulaciones se llevaron a cabo en el laboratorio de Materiales Plásticos de la UDT-UDEC.

La caracterización de las propiedades térmicas se realizó mediante dos ensayos: el de calorimetría de barrido diferencial (DSC, por sus siglas en inglés) y el termogravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés). El ensayo de calorimetría de barrido diferencial permite determinar la temperatura de fusión mediante la utilización de un calorímetro. Este ensayo se realizó según la norma ASTM E-3418, que establece que el método a seguir consiste en cambiar la temperatura del material termoplástico (enfriar y calentar) a una velocidad controlada, bajo una atmósfera de nitrógeno. Por otro lado, el ensayo termogravimétrico se realizó mediante un equipo NETZSCH modelo TG 209F3, siguiendo la norma ASTM E-1131. El ensayo consiste en medir la masa del material en función de la temperatura y el tiempo, a una atmósfera y temperatura controlada.

Por su parte, para la caracterización de las propiedades físicas de las formulaciones se realizaron dos ensayos: el de índice de fluidez y el de densidad. El ensayo de densidad se realizó con una balanza analítica y un kit de medición de densidad según la norma ASTM D-792, la cual establece que la determinación de la densidad se lleva a cabo a 23 °C mediante el pesaje y el cálculo del volumen de las muestras. Mientras que, el ensayo de índice de fluidez (MFI, por sus siglas en inglés) mide la cantidad de material que se extruye en 10 minutos, a través del orificio de un plastómetro, a una temperatura de 190°C y una carga de 2.16 kg. Esto se realizó según la norma ASTM D-1238, con un plastómetro marca INSTRON.

En cuanto a la caracterización de las propiedades mecánicas, esta se realizó mediante un ensayo de tracción, según la norma ASTM D-638, donde se determinan variables como el módulo de elasticidad, esfuerzo en el punto de rotura, esfuerzo máximo y alargamiento en el punto de rotura. Este ensayo consiste en aplicar una carga constante a una probeta tipo IV que está fijada a los cabezales de una máquina universal (Buñay et al., 2023). En este caso la máquina que se utilizó es un equipo SmarTens.

6.3 Elaboración de formulaciones con PLA-PEG/PBAT/JONCRYL

Posteriormente, se seleccionaron dos de las tres formulaciones desarrolladas anteriormente para la incorporación del JONCRYL, una emulsión acrílica utilizada comúnmente para mejorar la compatibilidad entre los biopolímeros (PLA y PBAT). Para ello, se elaboraron muestras prensadas y se realizó una revisión cualitativa de ellas al tacto, con la finalidad de apreciar qué tan flexibles o rígidas resultaron ser las formulaciones. Además, se compararon las propiedades mecánicas, térmicas y físicas de las formulaciones mediante un análisis estadístico de varianzas (ANOVA) y un test estadístico post-hoc (TUKEY). Posteriormente, se elaboraron las dos formulaciones más promisorias con PLA-PEG, PBAT y JONCRYL (Ver tabla 4), mediante la utilización de una extrusora de doble tornillo. Luego se caracterizaron sus propiedades térmicas, físicas y mecánicas, repitiendo los mismos ensayos realizados anteriormente.

Tabla 4. *Formulaciones elaboradas y proporciones del PLA plastificado, PBAT y JONCRYL.*

Muestra	Formulación	Proporción (%)
PLA-PEG 10/PBAT 90/ JONCRYL	PLA 4032D -PEG 1500	10
	PBAT	90
	JONCRYL	2
PLA-PEG 20/PBAT 80/ JONCRYL	PLA 4032D -PEG 1500	20
	PBAT	80
	JONCRYL	2

6.4 Elaboración de films a escala laboratorio

Los films correspondientes a las muestras de PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL, PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL fueron elaborados mediante el proceso de extrusión de soplado en una máquina extrusora (Ver figura 3). Durante el proceso, el material en estado sólido ingresa a la extrusora y se transforma en un material fundido, debido al calor y esfuerzo generado entre el

tornillo y el cilindro del equipo. Luego, este material fundido entra al cabezal de extrusión y se forma una burbuja que se va enfriando, por efecto del aire, mientras va ascendiendo. Finalmente, la burbuja enfriada pasa por unos rodillos que van aplanándola, transformándola en un film (Beltrán, 2011).

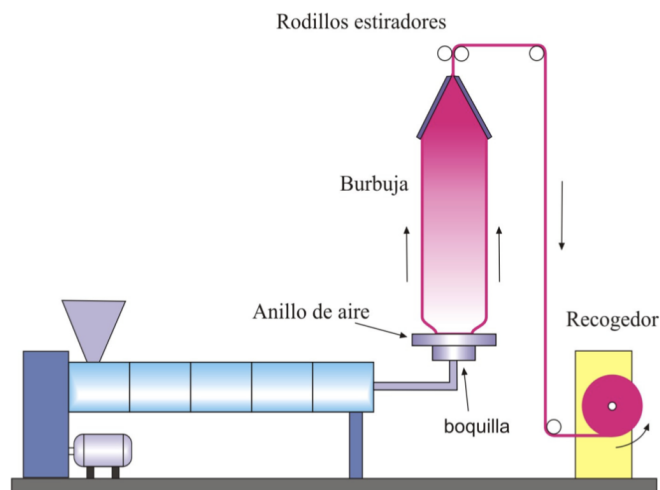


Figura 3. Línea de extrusión de película soplada.

Fuente: Beltrán, 2011.

6.5 Caracterización de propiedades mecánicas y físicas de los films

Para caracterizar las propiedades mecánicas de los films se realizó un ensayo de tracción, según la norma ASTM D-882, en un equipo SmarTens. En esta prueba se determinaron las mismas variables de los ensayos de tracción previamente realizados.

Por otro lado, para la caracterización de las propiedades físicas de los films se realizaron tres ensayos: el de permeabilidad al vapor de agua, el de ángulo de contacto y el ensayo de desintegración. El ensayo para determinar la permeabilidad al vapor de agua de cada film se realizó conforme a la norma ASTM E-96. Para ello, se utilizó el método del agua, que consiste en colocar las muestras sobre copas que contienen agua y fijarlas con selladores. Estas copas se introducen a una estufa bajo condiciones de temperatura y humedad controladas. Por su parte, el ensayo del ángulo de contacto se llevó a cabo mediante la norma ASTM D-5946-04. Esta prueba permitió determinar qué tan hidrofílicos o hidrofóbicos son los films. Un ángulo de contacto menor a 90° indica que el material es más hidrofílico, mientras que con un ángulo mayor

a 90° el film será más hidrofóbico (Fransiska, 2024). El ensayo de desintegración se realizó conforme a la normativa internacional, ISO 20200, para evaluar el grado de desintegración de los films bajo condiciones simuladas de compostaje controlado.

6.6 Selección del film bioplástico

Para la selección del film bioplástico más promisorio para su elaboración a escala piloto, se realizó un análisis estadístico de varianzas (ANOVA) y un test estadístico post-hoc (TUKEY), para comparar los resultados obtenidos de las propiedades, utilizando como material de referencia el polietileno, dado que este se implementa comúnmente en las superficies de los sistemas de captura de agua de rocío y niebla. Se eligió el film cuyas características presentaron mayores similitudes al material de referencia. Además, para su selección se tuvieron en especial consideración las características mecánicas y la hidrofobicidad del material, dado que en condiciones reales de uso resultan fundamentales para asegurar su funcionalidad.

6.7 Elaboración del prototipo con el film

Luego de ello, se elaboró el film a escala piloto mediante el proceso de extrusión de soplado. Posteriormente se fabricaron cuatro prototipos de sistemas de captura de agua de rocío y niebla, que contaron con tres partes principales: la superficie captadora, el marco y el canalón de recolección. La superficie captadora (film de 1.2 m²) se instaló sobre un marco de madera, sujetándose por los bordes a través de tornillos. En el borde inferior del marco se posicionó el canalón de recolección, el cual también se fijó mediante tornillos. Cada vértice del marco se sujetó a un pilar de madera, que fue de 1 metro adelante y 1.65 m atrás, de tal modo que este se posicionó inclinado a 60° con respecto a la horizontal (Ver figura 4).

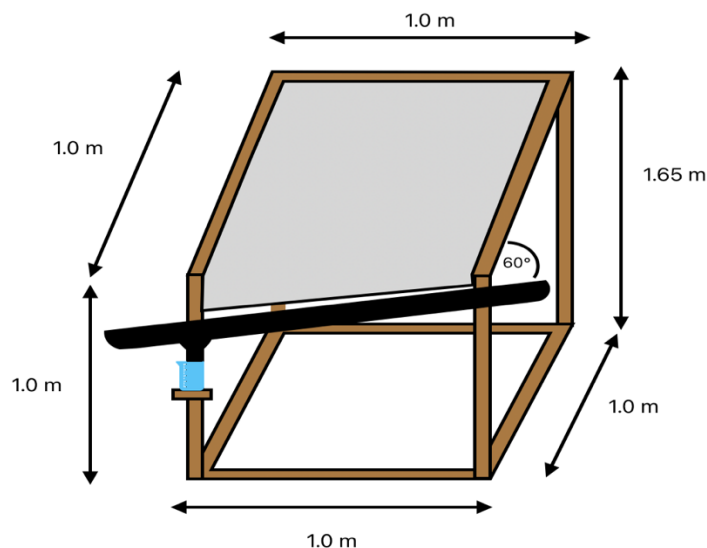


Figura 4. Prototipo de sistema de captura de agua de rocío y niebla.

Nota. Figura elaborada en base a lo reportado en la literatura.

Fuente: Tuure et al., 2020.

6.8 Implementación del film bioplástico, en un potencial sistema de captura de agua de rocío y niebla, en condiciones reales de uso

Una vez fabricados los prototipos con film bioplástico, se instalaron los cuatro prototipos en dos sectores de Puahún, ubicado en la comuna de Trehuaco (Ver figura 5). Se midieron, en cada punto, las cantidades de agua de rocío y niebla recolectadas por un prototipo de sistema con el film bioplástico y otro con un film de polietileno, con la finalidad de comparar los rendimientos de captura de cada material. Para la realización de las mediciones se contó con la colaboración voluntaria de los residentes, Sr. Hidalgo Ceballos y la Sra. Carmen Roa, quienes utilizaron vasos precipitados para almacenar el agua y probetas para medir con mayor precisión. Estas mediciones ellos las realizaron durante un periodo de 14 días, entre las 09:00 y 11:00 de la mañana, y los datos obtenidos los fueron registrando en un formulario y respaldándolos con fotografías.

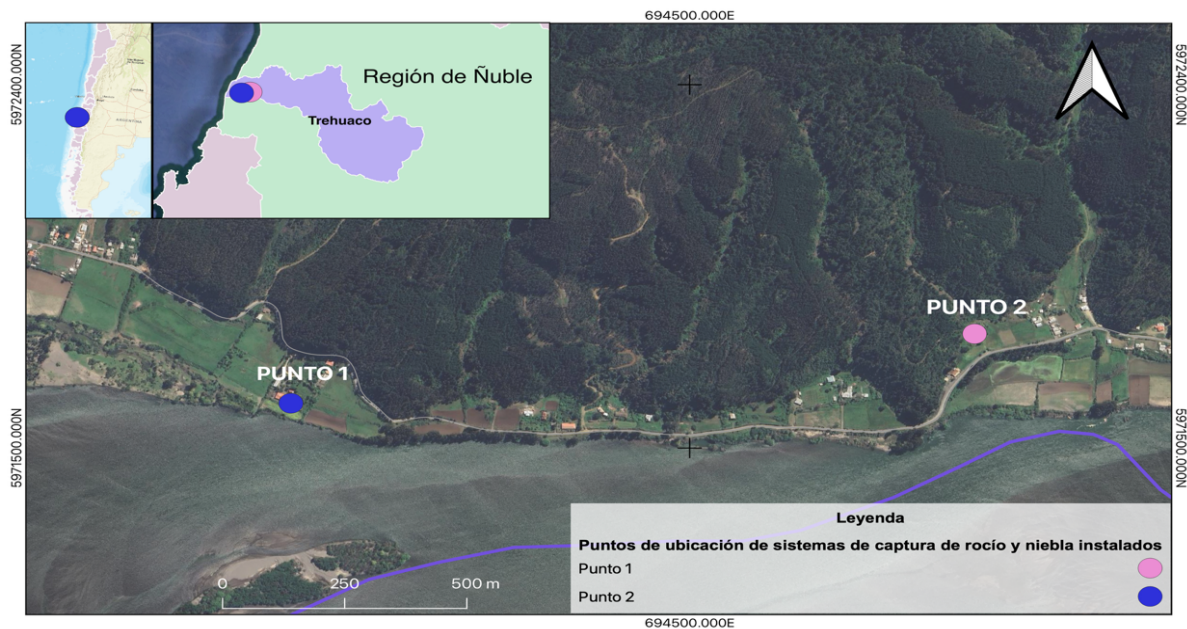


Figura 5. Mapa de ubicación de sistemas de captura de agua de rocío y niebla instalados.

Nota. Mapa elaborado a través de QGIS.

Además, con los datos obtenidos sobre los rendimientos de captura de agua de rocío y niebla se realizó un análisis estadístico descriptivo. También, se determinó la existencia de diferencias significativas entre los materiales mediante la realización del test de Shapiro-Wilk y la prueba t de Student.

7. RESULTADOS

7.1 Plastificación del PLA y elaboración de formulaciones de PLA-PEG/PBAT

Como resultado de esta actividad, primero se obtuvo la plastificación del PLA con PEG y, posteriormente, se obtuvieron tres formulaciones termoplásticas con distintas proporciones de los biopolímeros de PLA y PBAT (Ver figura 6), que se utilizaron para la realización de ensayos de caracterización térmica, mecánica y física.

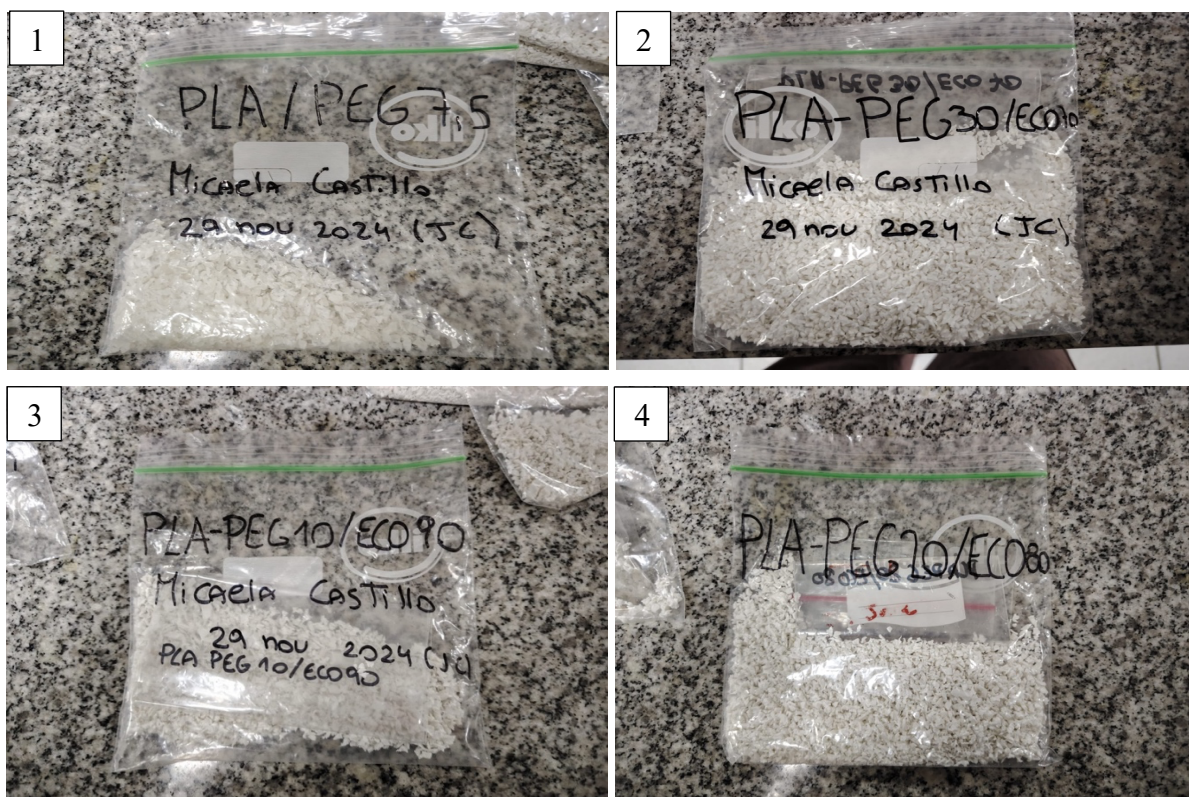


Figura 6. Formulaciones elaboradas con PLA, PEG y PBAT.

Nota. Muestras obtenidas a partir de la elaboración de las formulaciones, correspondientes a: 1) PLA-PEG, 2) PLA-PEG 30/PBAT 70, 3) PLA-PEG 10/PBAT 90 y 4) PLA-PEG 20/PBAT 80.

Además, mediante la elaboración de las formulaciones, se produjeron muestras prensadas, las cuales se pueden observar en la tabla 5. En esta tabla es posible apreciar, cualitativamente, que la formulación termoplástica PLA-PEG 30/PBAT 70 resultó ser la más rígida de las tres formulaciones, mientras que la formulación PLA-PEG 10/PBAT 90 fue la menos rígida.

Tabla 5. *Formulaciones prensadas.*

PLA-PEG 20/PBAT 80	PLA-PEG 10/PBAT 90	PLA-PEG 30/PBAT 70

7.2 Caracterización de propiedades mecánicas de las formulaciones de PLA-PEG/PBAT

7.2.1 Ensayo de tracción

Los resultados obtenidos de la caracterización de las propiedades mecánicas de las formulaciones de PLA-PEG/PBAT son variables. En la figura 7 se puede observar que el módulo de elasticidad disminuyó a medida que las proporciones de las formulaciones presentaron un mayor porcentaje de PBAT y uno menor de PLA. La mezcla de PLA-PEG 10/PBAT 90 resultó ser la menos rígida, con un módulo de elasticidad de 90.3 MPa. En cambio, la muestra de PLA-PEG 20/PBAT 80 presentó una elasticidad de 100.6 MPa y la muestra de PLA-PEG 30/PBAT 70 una de 162.6 MPa. Esta última mostró la diferencia más significativa ($p < 0.05$, Ver anexo 1), siendo la más rígida de las tres. Por su parte, el esfuerzo máximo resultó mayor en la muestra de PLA-PEG 10/PBAT 90, seguido por la muestra de PLA-PEG 30/PBAT 70 y menor en la muestra de PLA-PEG 20/PBAT 80, correspondientes a los esfuerzos máximos 18.5, 18.3 y 14.8

MPa, respectivamente. (Ver figura 8). Con respecto al alargamiento en el punto de rotura, en la figura 9 se puede observar que la muestra de PLA-PEG 10/PBAT 90 presentó un porcentaje de alargamiento notablemente mayor en comparación con las otras formulaciones, siendo este superior al 100%. En la figura 10 es posible apreciar la variabilidad de las formulaciones respecto a los valores del esfuerzo en el punto de rotura, donde los resultados muestran que este fue mayor en la muestra de PLA-PEG 10/PBAT 90, con 10.3 MPa, y menor en la de PLA-PEG 20/PBAT 80, con un valor de 6.1 MPa.

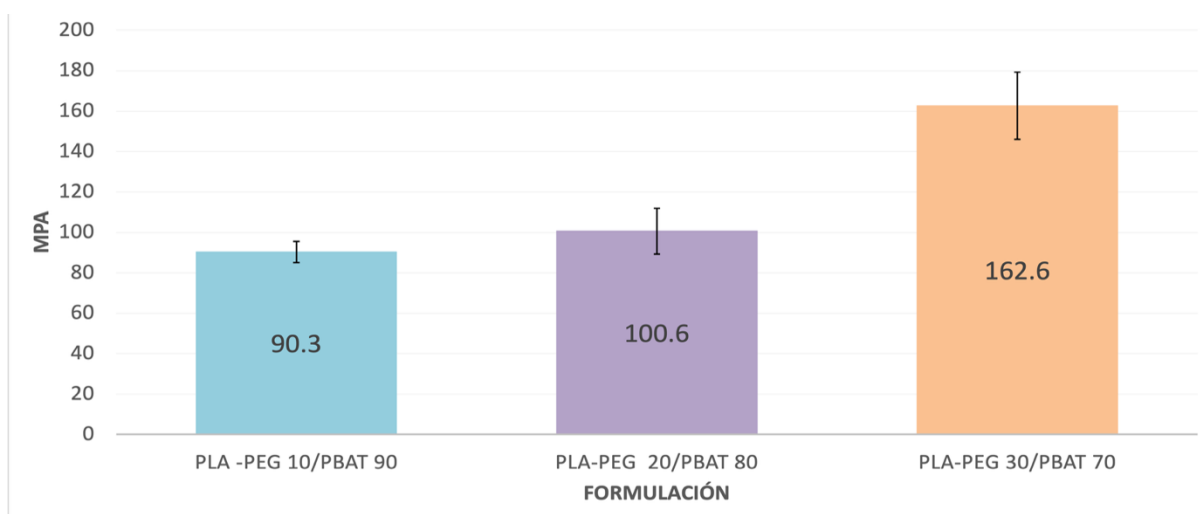


Figura 7. *Módulo de elasticidad de las formulaciones con PLA-PEG/PBAT.*

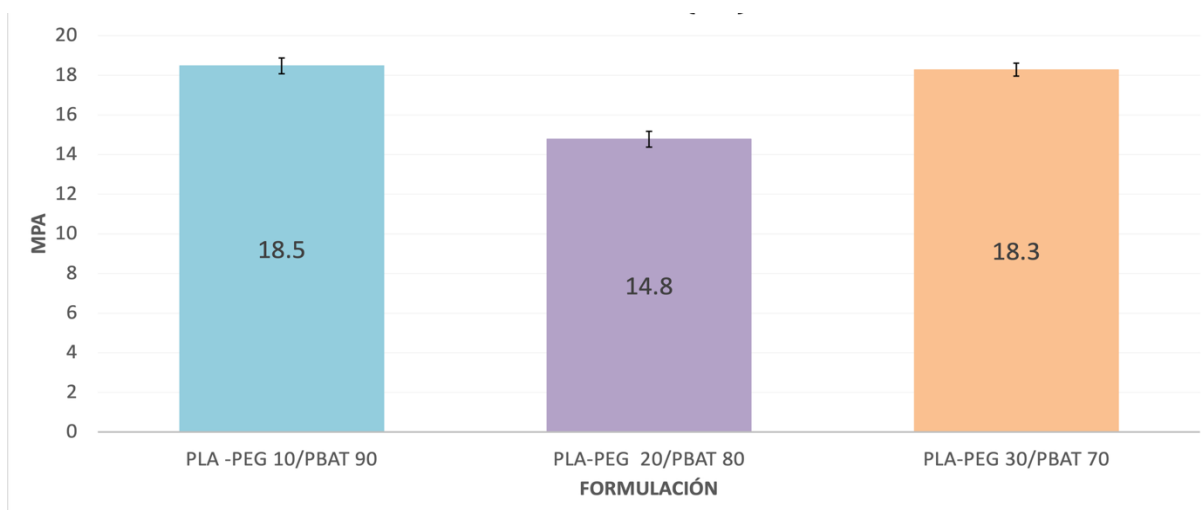


Figura 8. *Esfuerzo máximo de las formulaciones con PLA-PEG/PBAT.*

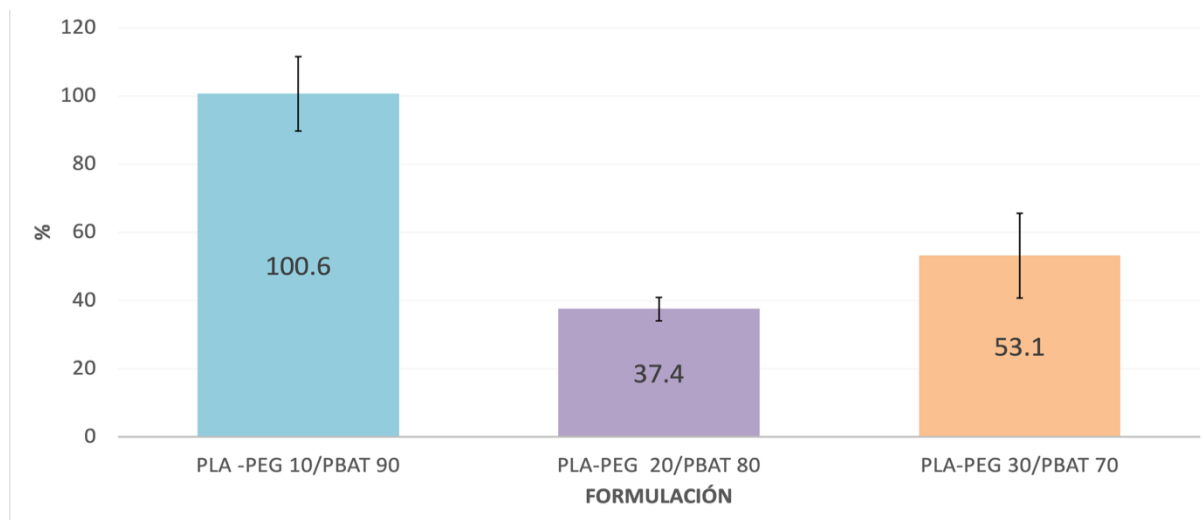


Figura 9. Alargamiento en el punto de rotura de las formulaciones con PLA-PEG/PBAT.

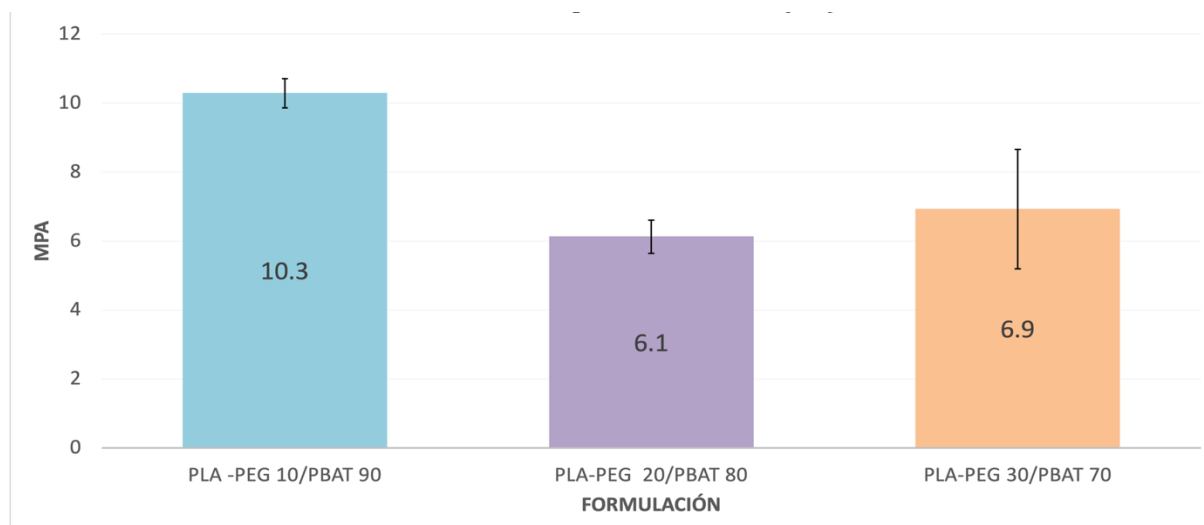


Figura 10. Esfuerzo en el punto de rotura de las formulaciones con PLA-PEG/PBAT.

7.3 Caracterización de propiedades térmicas de las formulaciones de PLA - PEG/PBAT

7.3.1 Ensayo de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

El ensayo calorimétrico determinó la temperatura de fusión de las formulaciones. En la tabla 6 se puede observar que las temperaturas de las formulaciones de PLA - PEG 20/ PBAT 80 y PLA - PEG 30/PBAT 70 resultaron con valores cercanos entre sí, siendo estos 169.2 °C y 169.3 °C,

respectivamente, mientras que la temperatura de fusión de la formulación de PLA- PEG 10/ PBAT 90 fue menor, siendo esta de 166.3 °C. En consecuencia, la muestra de PLA- PEG10/ PBAT 90 resultó más sensible al calor, por lo que se transformó con mayor rapidez de estado sólido a líquido.

Tabla 6. Resultados de los análisis de Calorimetría Diferencial de Barrido de las formulaciones con PLA-PEG/PBAT.

Formulaciones	Temperatura de fusión (Tm) °C
PLA - PEG 20/PBAT 80	169.2 °C
PLA - PEG 10/PBAT 90	166.3 °C
PLA - PEG 30/PBAT 70	169.3 °C

7.3.2 Ensayo termogravimétrico (TGA)

En la tabla 7 se puede observar la temperatura de degradación de las formulaciones. La mezcla de PLA - PEG 10/PBAT 90 presentó la temperatura más alta, siendo esta de 404.1 °C, seguido de la formulación de PLA - PEG 20/ PBAT 80, que mostró una temperatura de 399.4 °C. Mientras que la mezcla de PLA- PEG 30/ PBAT 70 presentó la temperatura de degradación más baja, con un valor de 351.1 °C.

Tabla 7. Resultados de ensayo termogravimétrico de las formulaciones con PLA-PEG/PBAT.

Formulaciones	Temperatura degradación (pick)
PLA - PEG 20/PBAT 80	399.4 °C
PLA - PEG 10/PBAT 90	404.1 °C
PLA - PEG 30/PBAT 70	351.1 °C

7.4 Caracterización de propiedades físicas de las formulaciones de PLA-PEG/PBAT

7.4.1 Ensayo de densidad

Se estimó la densidad de las formulaciones mediante la realización de un ensayo de densidad. En la tabla 8 se puede observar que las densidades de las formulaciones de PLA - PEG 20/ PBAT 80 y PLA - PEG 10/PBAT 90 resultaron diferentes, siendo estas 1.33 g/cm³ y 1.34 g/cm³, respectivamente. Mientras, que la densidad de la formulación de PLA - PEG 30/ PBAT 70 fue significativamente menor, con un valor de 1.30 g/cm³.

Tabla 8. Resultados de densidad de las formulaciones con PLA-PEG/PBAT.

Formulaciones	Densidad (g/ cm ³)	Desviación estándar
PLA - PEG 20/PBAT 80	1.33	0.003
PLA - PEG 10/PBAT 90	1.34	0.007
PLA - PEG 30/PBAT 70	1.30	0.002

7.4.2 Ensayo índice de fluidez (MFI)

Los resultados del ensayo de índice de fluidez indicaron que la utilización de distintas proporciones de PLA-PEG y PBAT, en las mezclas, influye en el incremento de la fluidez de las formulaciones. En la tabla 9 se puede observar que la formulación de PLA - PEG 10/PBAT 90 presentó el índice de fluidez más bajo, siendo este de 8.45 g/10 min. En comparación, la mezcla de PLA - PEG 20/ PBAT 80 mostró una fluidez de 11.16 g/10 min, mientras que la formulación de PLA - PEG 30/ PBAT alcanzó un índice de fluidez significativamente más alto, con un valor de 15.32 g/10 min.

Tabla 9. Resultados de índice de fluidez (MFI) de las formulaciones con PLA-PEG/PBAT.

Formulaciones	Promedio (g/10 min)	Desviación estándar
PLA - PEG 10/PBAT 90	8.45	0.3
PLA - PEG 20/PBAT 80	11.16	0.3
PLA - PEG 30/PBAT 70	15.32	0.6

7.5 Elaboración de formulaciones con PLA-PEG/PBAT/JONCRYL

Se obtuvieron las dos formulaciones seleccionadas para la adición del JONCRYL en forma de gránulos: PLA - PEG 10/PBAT 90/JONCRYL y PLA - PEG 20/PBAT 80/JONCRYL (Ver tabla 10).

Tabla 10. Formulaciones obtenidas producto del mezclado en extrusora.

PLA-PEG 10/PBAT 90/ JONCRYL	PLA-PEG 20/PBAT 80/ JONCRYL

7.6 Caracterización de propiedades mecánicas de las formulaciones de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL

7.6.1 Ensayo de tracción

Los resultados obtenidos, a partir del ensayo de tracción para la caracterización de las propiedades mecánicas de las formulaciones, fueron diferentes en cada variable. En la figura 11 se puede observar que el módulo de elasticidad fue significativamente más bajo en la mezcla de PLA-PEG10/PBAT 90/JONCRYL, con un valor 79.3 MPa. Mientras que la muestra de PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL presentó un módulo de elasticidad de 96.1 MPa. En consecuencia, la mezcla de PLA-PEG10/PBAT 90/JONCRYL resultó ser menos rígida. Por su parte, el esfuerzo máximo fue mayor en la muestra de PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL y menor en la de PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL, con esfuerzos máximos de 18.2 y 16.7, respectivamente (Ver figura 12). En cuanto al alargamiento en el punto de rotura, en la figura 13 se puede observar que la muestra de PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL presentó un porcentaje de elongación significativamente más alto que la formulación de PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL, siendo esta mayor al 100%. Con respecto al esfuerzo en el punto de rotura, los resultados obtenidos no presentaron diferencias significativas entre las formulaciones, no obstante, el esfuerzo en el punto de rotura fue ligeramente mayor en la muestra de PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL que en la de PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL, con valores de 9.8 MPa y 8.3 MPa, respectivamente (Ver figura 14).

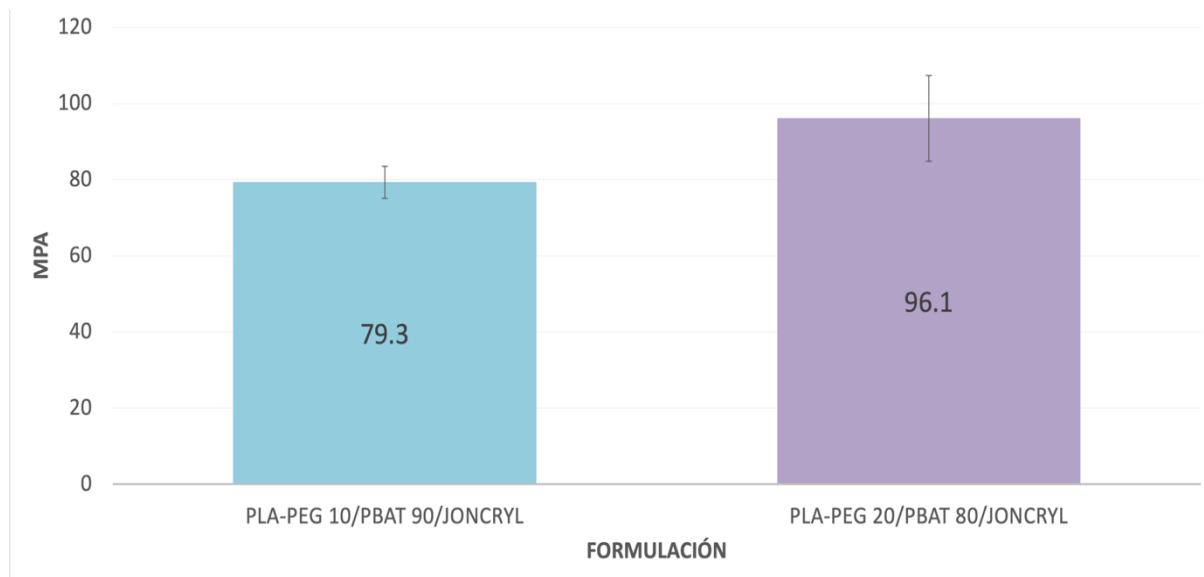


Figura 11. *Módulo de elasticidad de las formulaciones con PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.*

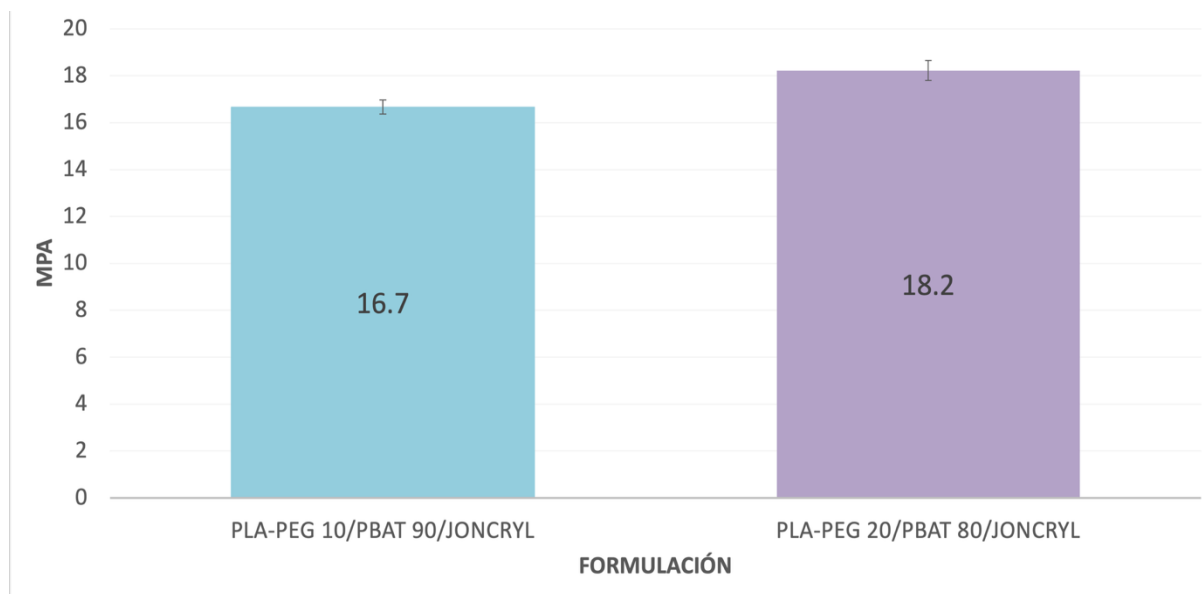


Figura 12. *Esfuerzo máximo de las formulaciones con PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.*

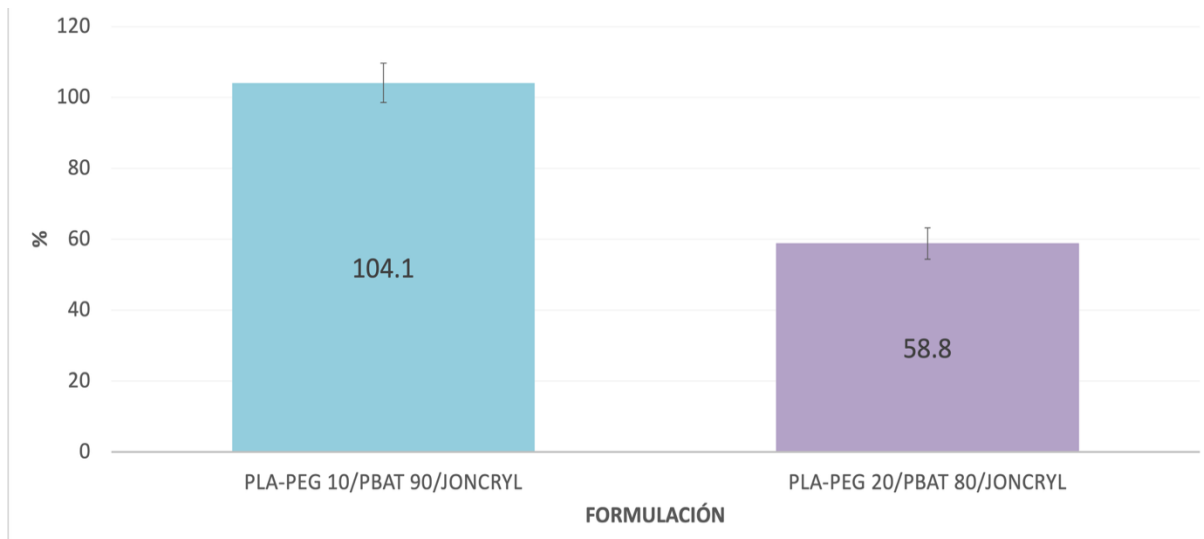


Figura 13. Alargamiento en el punto de rotura de las formulaciones con PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.

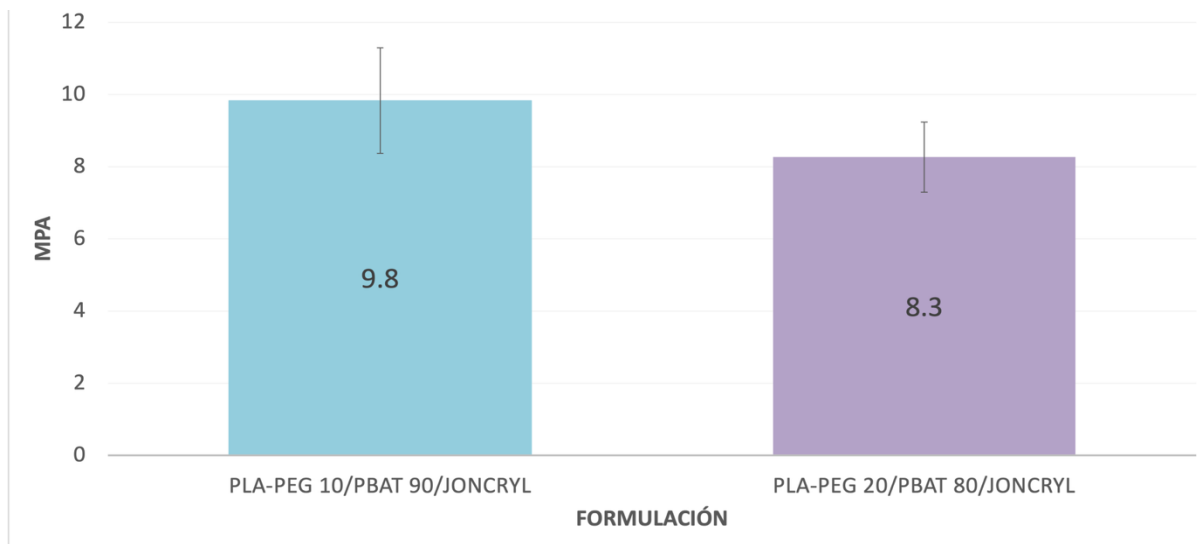


Figura 14. Esfuerzo en el punto de rotura de las formulaciones con PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.

7.7 Caracterización de propiedades térmicas de las formulaciones PLA-PEG/PBAT/JONCRYL

7.7.1 Ensayo de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

En la tabla 11 se puede observar la temperatura de fusión de las formulaciones. La muestra de PLA- PEG 10/ PBAT 90/JONCRYL resultó más sensible al calor, alcanzando una temperatura

de fusión de 164.9 °C. En comparación, la muestra de PLA- PEG 20/ PBAT 80/JONCRYL presentó una temperatura de fusión mayor, con un valor de 167.6 °C.

Tabla 11. Resultados de los análisis de Calorimetría Diferencial de Barrido de las formulaciones con PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.

Formulaciones	Temperatura de fusión (Tm) °C
PLA - PEG 20/PBAT 80/JONCRYL	167.6 °C
PLA - PEG 10/PBAT 90/JONCRYL	164.9 °C

7.7.2 Ensayo termogravimétrico (TGA)

Los resultados obtenidos en el ensayo TGA muestran las temperaturas de degradación de las formulaciones. La muestra de PLA - PEG 20/ PBAT 80/JONCRYL fue de 399.8 °C, mientras que la de PLA - PEG 10/PBAT 90/JONCRYL fue de 412.6 °C (Ver tabla 12). En resultado, la formulación de PLA - PEG 10/PBAT 90/JONCRYL se degradó a una mayor temperatura, lo que indica una mayor resistencia térmica en comparación con la muestra de PLA - PEG 20/ PBAT 80/JONCRYL.

Tabla 12. Resultados de ensayo termogravimétrico de las formulaciones con PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.

Formulaciones	Temperatura degradación (Pick)
PLA - PEG 20/PBAT 80/JONCRYL	399.8 °C
PLA - PEG 10/PBAT 90/JONCRYL	412.6 °C

7.8 Caracterización de propiedades físicas de las formulaciones PLA-PEG/PBAT/JONCRYL

7.8.1 Ensayo de densidad

Se cuantificó la densidad de las formulaciones mediante la realización de un ensayo de densidad. En la tabla 13 se puede observar que la densidad de la formulación de PLA - PEG 20/ PBAT 80/JONCRYL resultó menor que la que PLA - PEG 10/PBAT 90/JONCRYL, siendo estas 1.33 g/cm³ y 1.35 g/cm³, respectivamente.

Tabla 13. Resultados de densidad de las formulaciones con PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.

Formulaciones	Densidad (g/ cm ³)	Desviación estándar
PLA - PEG 20/PBAT 80/JONCRYL	1.33	0.001
PLA - PEG 10/PBAT 90/JONCRYL	1.35	0.004

7.8.2 Ensayo índice de fluidez (MFI)

En la tabla 14 se pueden apreciar los resultados obtenidos del ensayo del índice de fluidez de las formulaciones. La muestra de PLA - PEG 20/ PBAT 80/JONCRYL obtuvo un índice de fluidez de 22.73, mientras que la muestra de PLA - PEG 10/PBAT 90/JONCRYL obtuvo uno de 22.78, por lo que no observaron diferencias significativas. Por lo tanto, ambas formulaciones presentaron la fluidez necesaria para poder ser procesadas en extrusora de película soplada.

Tabla 14. Resultados del índice de fluidez (MFI) de las formulaciones de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.

Formulaciones	Promedio (g/10 min)	Desviación estándar
PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL	22.73	0.55
PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL	22.78	0.19

7.9 Elaboración films a escala laboratorio

Como resultado de esta actividad, se obtuvieron dos films elaborados a escala laboratorio, uno a partir de la proporción de PLA-PEG 20/ PBAT 80/JONCRYL y el otro con la de PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL (Ver Figura 15), que se utilizaron para la realización de ensayos para la caracterización de las propiedades mecánicas y físicas de los films.

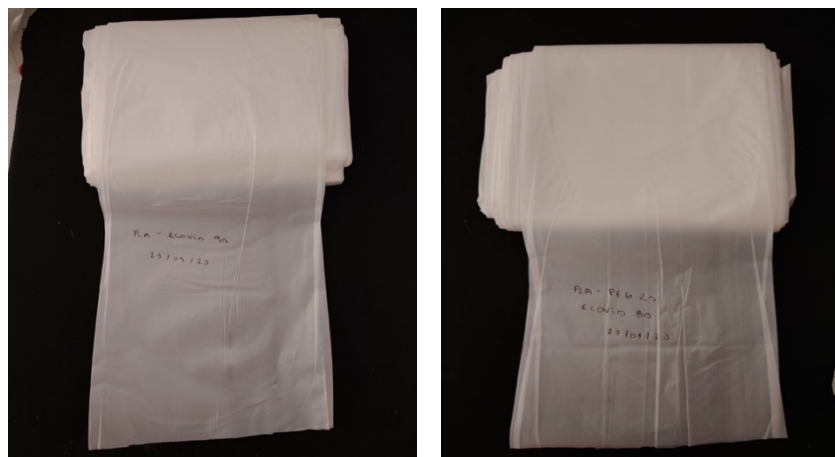


Figura 15. Films elaborados a escala laboratorio en extrusora.

7.10 Caracterización de las propiedades mecánicas de los films de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL

7.10.1 Ensayo de tracción de los films (sentido extrusión)

En el ensayo de tracción realizado para la caracterización de las propiedades mecánicas de los films de PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL, PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL y del Polietileno, los resultados obtenidos fueron variables. En la figura 16 se puede observar que el film, en sentido de extrusión, que presentó el módulo de elasticidad menor fue el de la muestra de Polietileno, luego la muestra de PLA-PEG10/PBAT 90/JONCRYL y, por último, el de la muestra de PLA-PEG 20/PBAT 80, con valores de 238.9 MPa, 245.3 MPa y 440.2 MPa, respectivamente. En consecuencia, la mezcla de PLA-PEG20/PBAT 80/JONCRYL mostró una rigidez significativamente mayor, mientras que las muestras PLA-PEG10/PBAT 90/JONCRYL y Polietileno presentaron una rigidez menor, con valores sin diferencias significativas entre sí. Por su parte, el esfuerzo máximo resultó mayor en la muestra de Polietileno, seguido por la muestra de PLA-PEG 20/PBAT 80 y menor en la muestra de PLA-PEG 10/PBAT 90, con valores de 26.2, 20.2 y 18.2 MPa, respectivamente (Ver figura 17). Sin embargo, la diferencia entre la muestra de PLA-PEG 20/PBAT 80 y PLA-PEG 10/PBAT 90 resultó mínima. En cuanto al alargamiento en el punto de rotura, los valores obtenidos por los tres film no presentaron diferencias significativas. No obstante, el film de PLA-PEG 10/PBAT 90 mostró un porcentaje de alargamiento ligeramente mayor, siendo este de 320% (Ver figura 18). En la figura 19 es posible observar que el esfuerzo en el punto de rotura fue significativamente mayor en la muestra de Polietileno, con un valor alcanzado de 20.5 MPa. En comparación, las muestras PLA-PEG 20/PBAT 80 y PLA-PEG 10/PBAT 90 presentaron valores 12.2 y 11 MPa, respectivamente, que fueron menores al valor obtenido por la muestra de polietileno, pero similares entre sí.

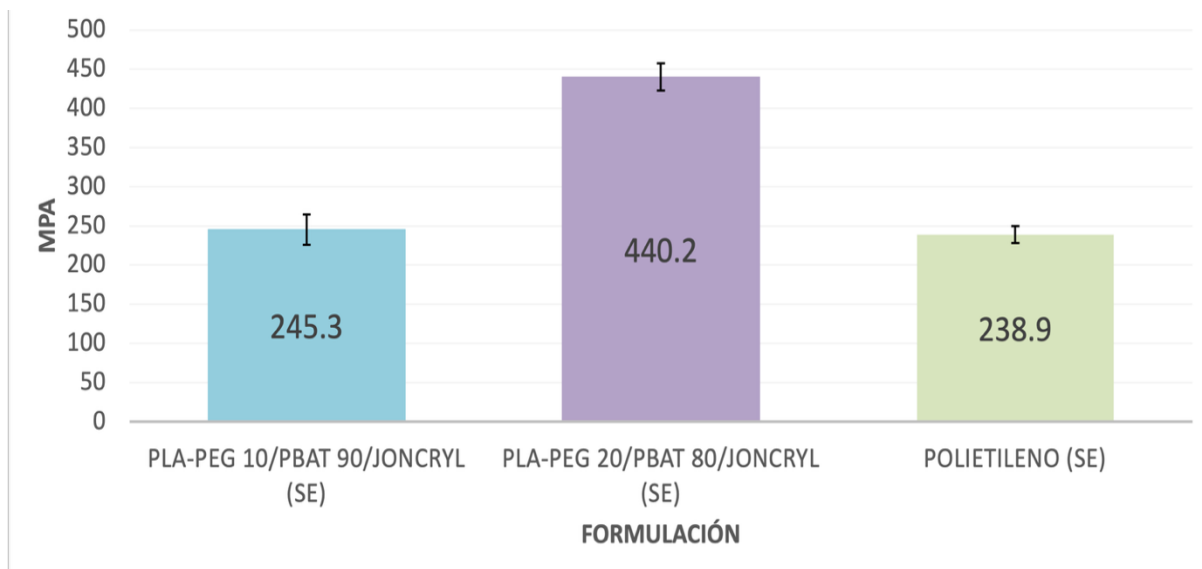


Figura 16. Módulo de elasticidad de films de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL y de Polietileno en sentido extrusión.

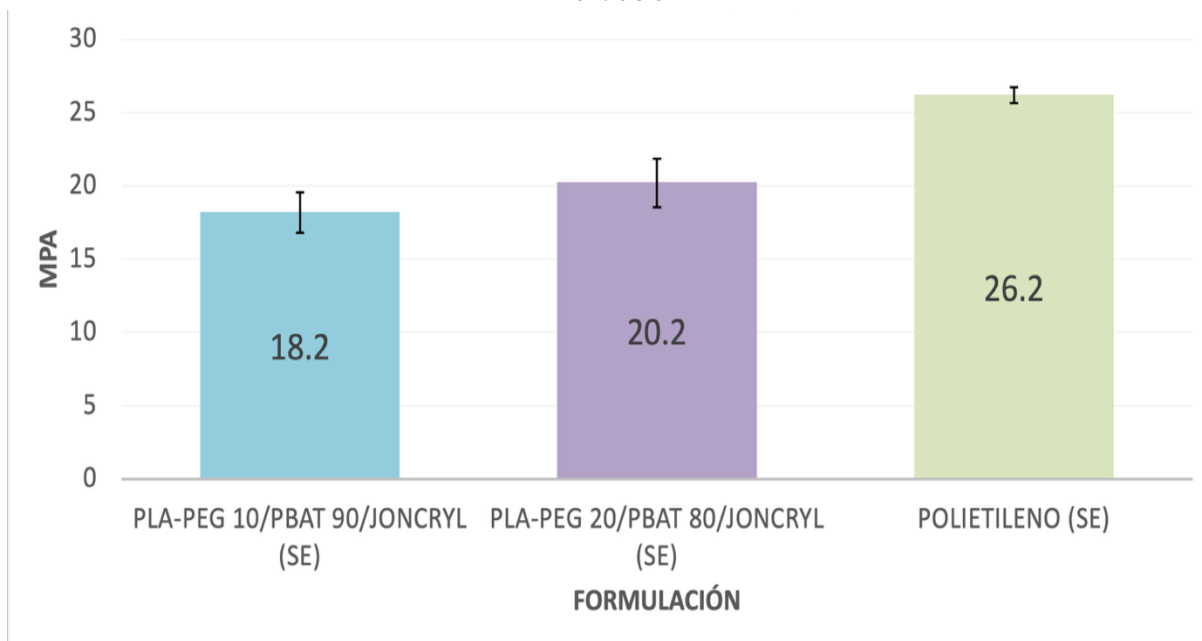


Figura 17. Esfuerzo máximo de films de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL y de Polietileno en sentido extrusión.

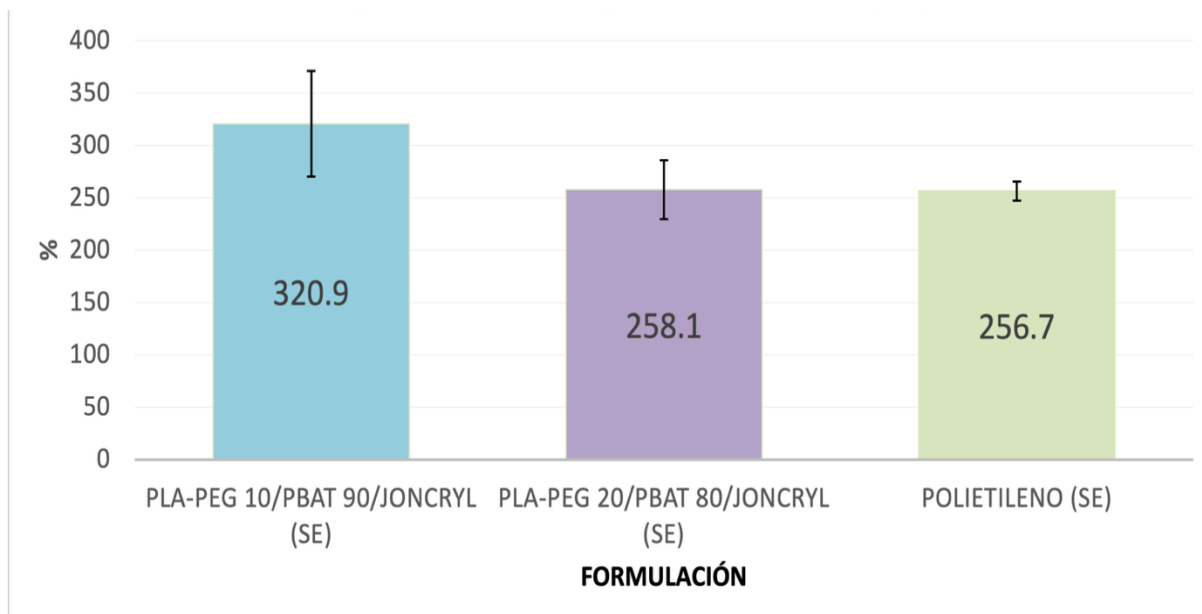


Figura 18. Alargamiento en el punto de rotura de films de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL y de Polietileno en sentido extrusión.

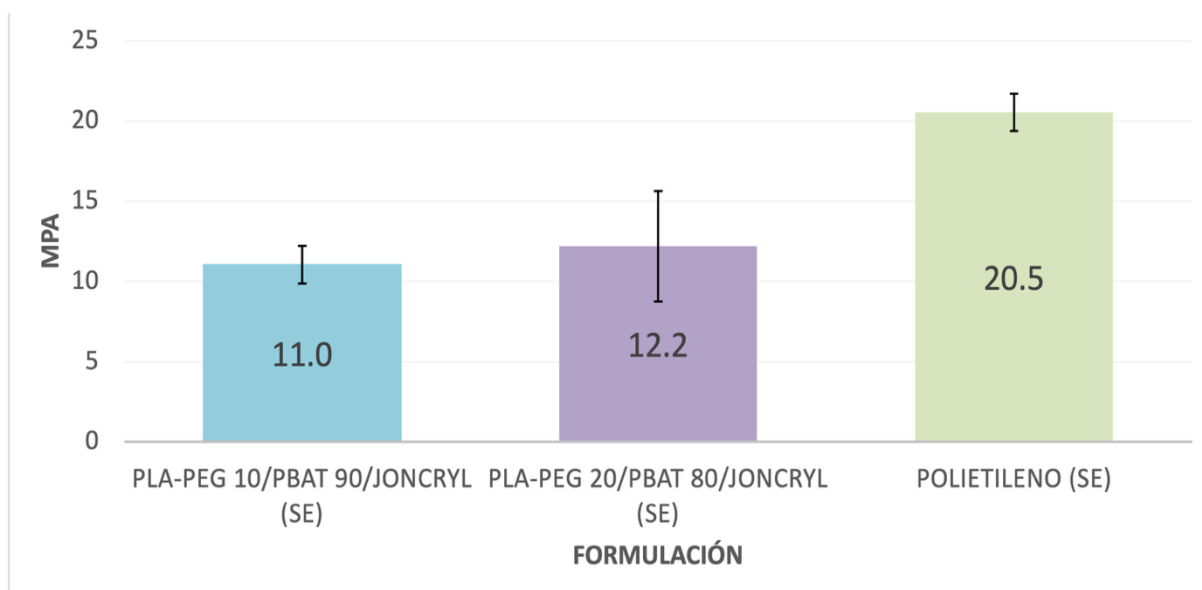


Figura 19. Esfuerzo en el punto de rotura de films de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL y de Polietileno en sentido extrusión.

7.10.2 Ensayo de tracción de los films (sentido transversal)

Con respecto a los resultados obtenidos del ensayo de tracción en sentido transversal, en la figura 20 se puede observar que el film, en sentido de extrusión, que presentó el módulo de elasticidad menor fue el de la muestra de PLA-PEG10/PBAT 90/JONCRYL, luego el de la muestra de PLA-PEG 20/PBAT 80 y, por último, el film de Polietileno, con valores de 87.4, 137.8 y 299.8, respectivamente. Por lo tanto, el polietileno mostró una rigidez significativamente mayor que los films de PLA-PEG10/PBAT 90/JONCRYL y PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL, que resultaron más flexibles en sentido transversal. Por su parte, el esfuerzo máximo resultó mayor en la muestra de PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL, seguido por la muestra de PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL y menor en la muestra de Polietileno, con valores de 12.3, 13.7, y 10.1 MPa, respectivamente (Ver figura 21). La diferencia entre los films PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL y polietileno resultó no significativa. Mientras que el film de PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL presentó un esfuerzo máximo considerablemente mayor que el polietileno. En la figura 22 se puede observar que, respecto al alargamiento en el punto de rotura, el film de Polietileno presentó un porcentaje de alargamiento notablemente mayor que los demás films, siendo este superior al 500%. En cambio, los films de PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL y de PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL, mostraron porcentajes de 316% y 292%, respectivamente, sin diferencias significativas entre ambos. Por su parte, en la figura 23 es posible observar que el esfuerzo en el punto de rotura fue mayor en la muestra de PLA-PEG 90/PBAT 10/JONCRYL, con un valor alcanzado de 9 MPa. En comparación, las muestras PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL y Polietileno presentaron valores 7.7 y 5.1 MPa, respectivamente. Relativo a las diferencias significativas, los films PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL y PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL no presentaron diferencias. En cambio, el film de polietileno resultó, en sentido transversal, significativamente menor que el film de PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL.

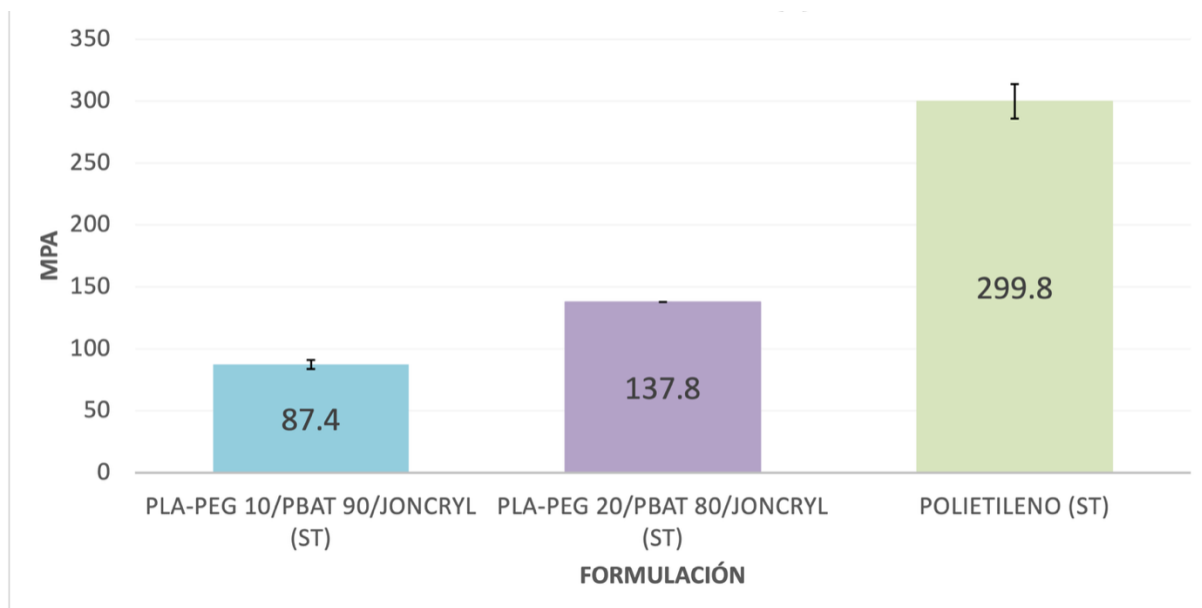


Figura 20. Módulo de elasticidad de films de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL y de Polietileno en sentido transversal.

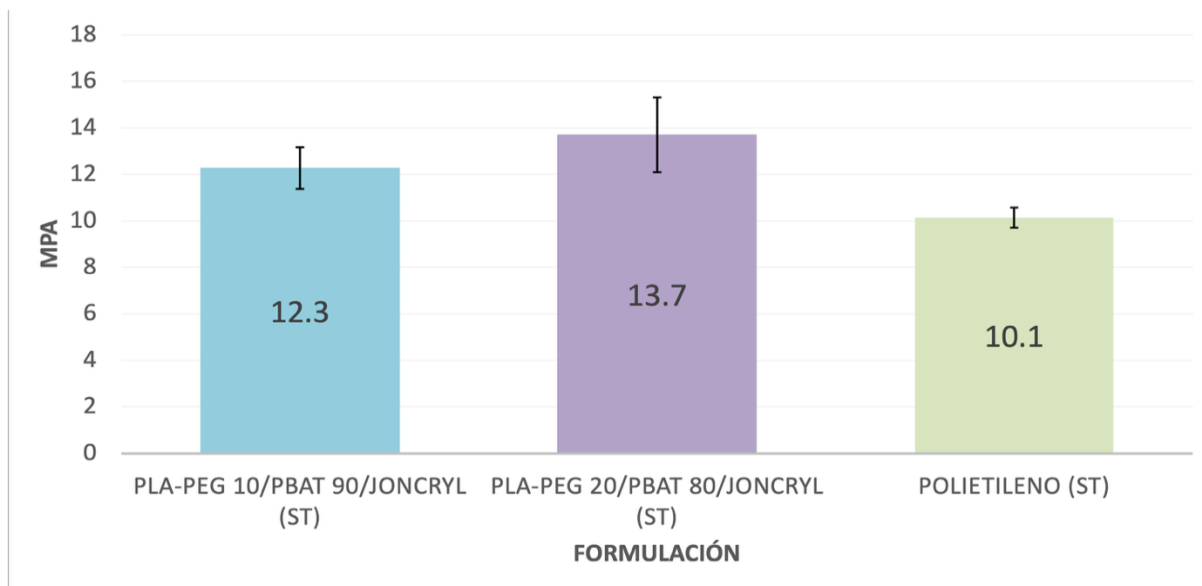


Figura 21. Esfuerzo máximo de films de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL y de Polietileno en sentido transversal.

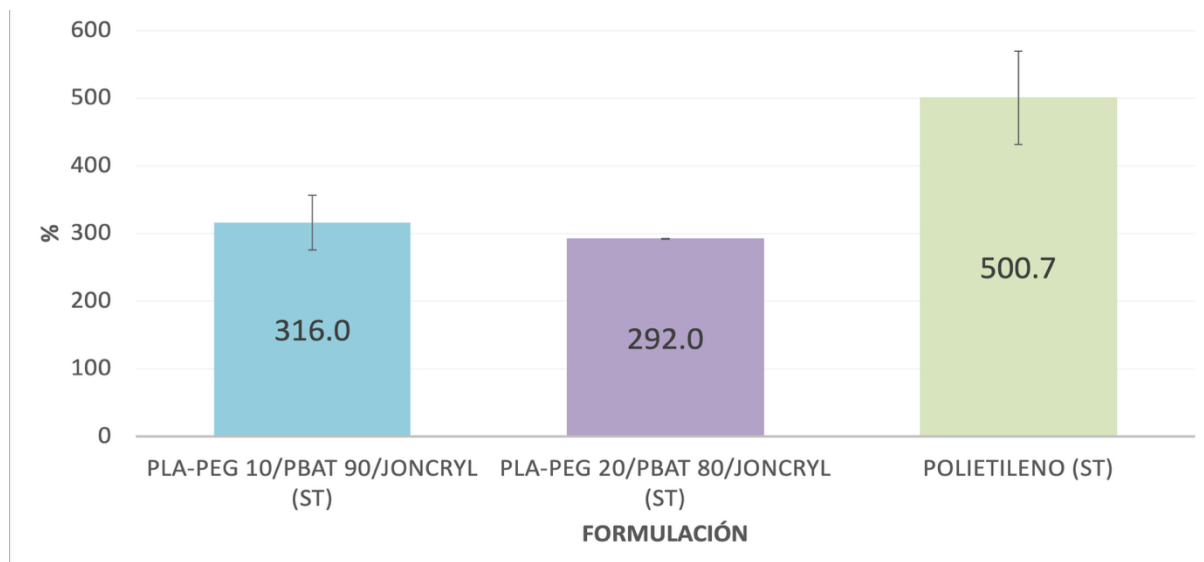


Figura 22. Alargamiento en el punto de rotura de films de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL y de Polietileno en sentido transversal.

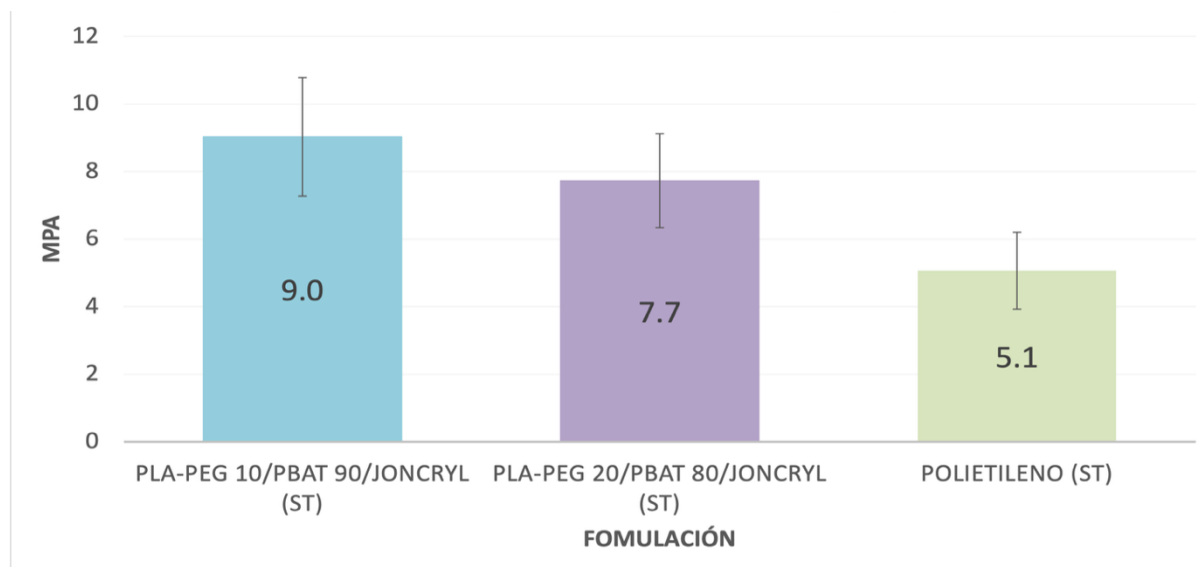


Figura 23. Esfuerzo en el punto de rotura de films de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL y de Polietileno en sentido transversal.

7.11 Caracterización de las propiedades físicas de los films de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL

7.11.1 Ensayo de permeabilidad al vapor de agua

En el ensayo de permeabilidad al vapor de agua se estimó la permeabilidad promedio de los films de PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL, PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL y de Polietileno. De acuerdo a la tabla 15, es posible apreciar que el film de PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL resultó con una permeabilidad mayor en comparación con los demás films, con un valor de 622.4 g/d*m. Mientras que la muestra de PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL y la de Polietileno presentaron valores de 528 y 576 g/d*m, respectivamente. No obstante, resulta relevante destacar que, entre los valores obtenidos, no se identificó una diferencia estadísticamente significativa.

Tabla 15. Resultados de la permeabilidad promedio de los films con PLA-PEG/PBAT/JONCRYL y de Polietileno.

Formulaciones	Permeabilidad promedio (g/d*m ²)	Desviación estándar
PLA - PEG 20/PBAT 80/ JONCRYL	623	181
PLA - PEG 10/PBAT 90/ JONCRYL	528	104
POLIETILENO	576	141

7.11.2 Ensayo de ángulo de contacto

El ensayo de ángulo de contacto permitió estimar que tan hidrofóbica o hidrofílica es una superficie. En la tabla 16 se puede observar que la muestra de PLA-PEG 10/PBAT90/ JONCRYL presentó un ángulo de contacto mayor que la muestra de PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL, con valores de 95.82 y 92.95, respectivamente. Sin embargo, estadísticamente, los films no presentaron diferencias significativas entre sí.

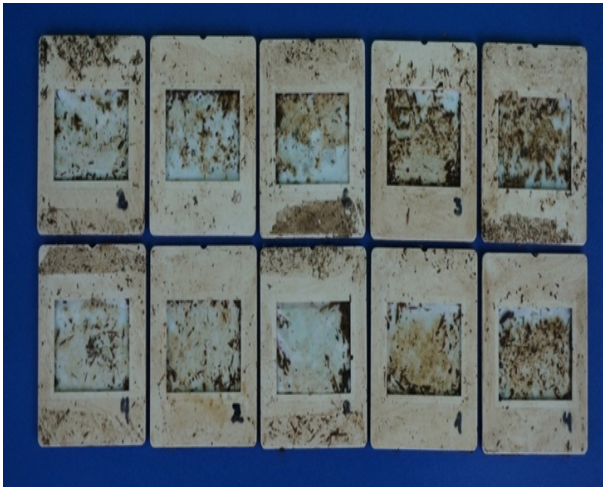
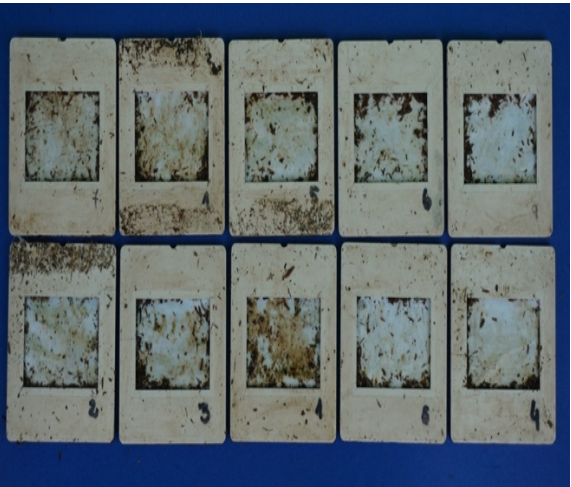
Tabla 16. Resultados del ángulo de contacto promedio de los films con PLA-PEG/PBAT/JONCRYL y de Polietileno.

Muestra	Ángulo de contacto promedio (°)	Desviación estándar
PLA - PEG 20/PBAT 80/ JONCRYL	92.91	4.08
PLA - PEG 10/PBAT 90/ JONCRYL	95.82	7.95

7.11.3 Ensayo de desintegración

En cuanto a los resultados obtenidos en el ensayo de desintegración, en las siguientes imágenes se puede observar cómo los films de PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL y de PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL se van desintegrando durante el pasar de los días (Ver tabla 17). En los primeros 15 días no se observaron cambios en los films, sin embargo, a partir del día 30 fue posible apreciar cambios en su coloración (de blanco a marrón) y una leve fragmentación de los materiales, siendo más notoria en el film de PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL. Al finalizar el ensayo en el día 60, en ambos films se evidenció una pérdida de material, siendo mayor en el film de PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL (Ver resultados del grado de desintegración de cada film en anexo 2). Además, cabe destacar que la degradación gradual de los films bajo condiciones simuladas de compostaje controlado tendió a ser más rápida en el film de PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL.

Tabla 17. Resultados de la degradación gradual de los films mediante el paso de los días.

FILM DE PLA - PEG 10/PBAT 90/JONCRYL	FILM DE PLA - PEG 20/PBAT 80/JONCRYL
Día 15	
	

Día 30



Día 45



Día 60



7.12 Selección y elaboración del film a escala piloto

Como resultado de estas actividades, se obtuvo el film bioplástico de PLA - PEG 10/PBAT 90/JONCRYL a escala piloto (Ver figura 24). Este material fue de un ancho de 1.10 metros y un espesor de aproximadamente 0.2 milímetros (200 μm , micrones). Además, cabe destacar que, en apariencia, este resultó ser blanquecino.

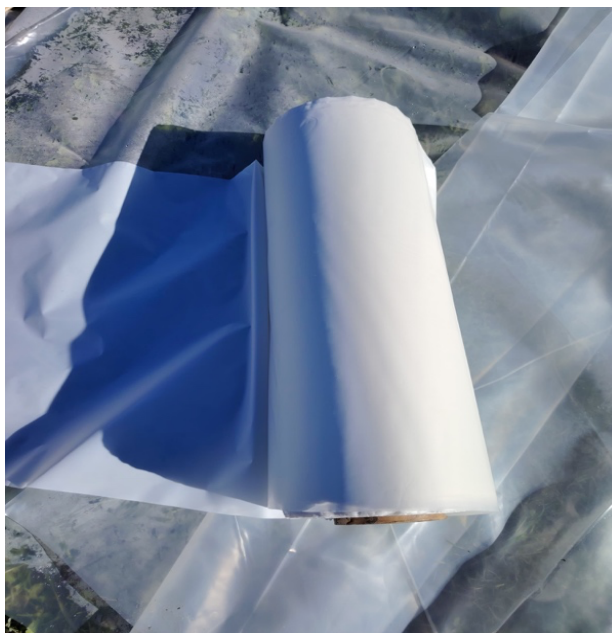


Figura 24. *Film a escala piloto.*

7.13 Fabricación de los sistemas de captura de rocío y niebla

En cuanto a la fabricación de los sistemas utilizados para medir el rendimiento de captura de rocío y niebla, se realizaron cuatro sistemas (Ver figura 25), todos con las mismas dimensiones, que fueron de 1.65 m de altura máxima y una superficie de 1.2 m² con una inclinación de 60° aproximadamente. Además, cabe destacar que estos sistemas contaron con canaletas, todas inclinada a 10° aproximadamente.



Figura 25. *Prototipos de sistemas de captura de agua de rocío y niebla.*

7.14 Rendimiento de captura de agua de rocío y niebla de los sistemas instalados en el sector de Puahún, comuna de Trehuaco

Relativo a los resultados obtenidos de los rendimientos de captura de agua de rocío y niebla de los prototipos de sistemas instalados en terreno, en las figuras 26 y 27 es posible observar que el valor máximo de agua de rocío y niebla capturada durante los 14 días medidos, en el punto 1, con el film bioplástico fue de 490 ml, mientras que, con el film de polietileno fue de 400 ml. En cambio, en el punto 2, el valor máximo fue de 540 ml con el film bioplástico y de 560 ml con el film de polietileno. Por su parte, en cuanto a los promedios diarios, tanto en el Punto 1 como en el Punto 2, el colector con el film bioplástico presentó los valores de rendimientos de captura más altos, con promedios diarios de agua de rocío y niebla de 265 ml y 294 ml, mientras que el colector con el film de Polietileno presentó promedios diarios inferiores, de 194 ml y 201 ml.

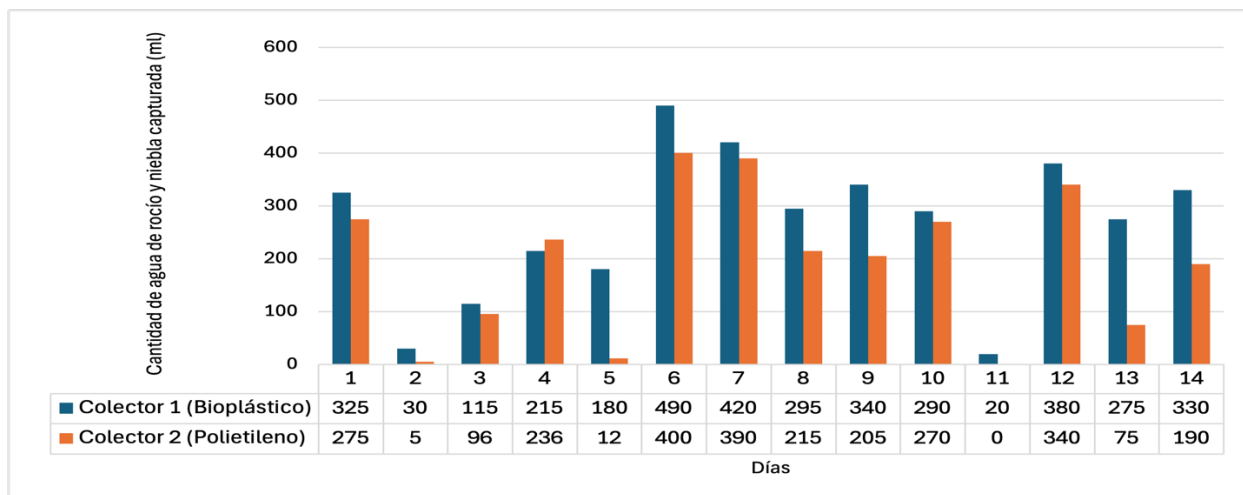


Figura 26. Rendimientos de captura de agua de rocío y niebla en el Punto 1.

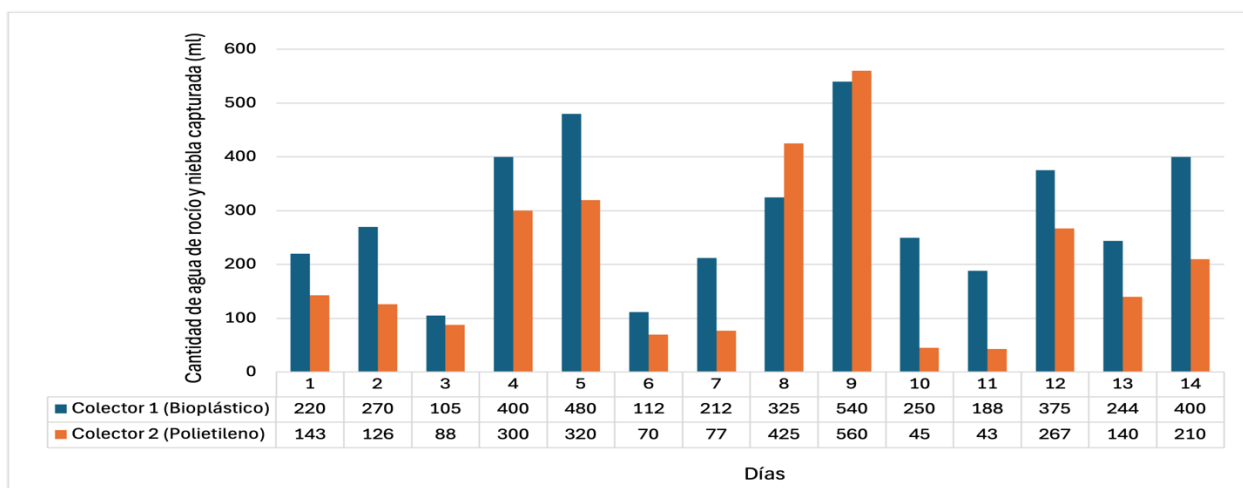


Figura 27. Rendimientos de captura de agua de rocío y niebla en el Punto 2.

Además, mediante el análisis estadístico de los datos fue posible evidenciar diferencias significativas entre los colectores con el film de bioplástico y los con el film de polietileno. Se obtuvo que los colectores con el film de bioplástico capturaron 71.1 y 93.36 ml más de agua de rocío y niebla que los colectores con el film de polietileno, en el punto 1 y 2, respectivamente. (Ver análisis estadístico en anexo 3).

Por último, es importante destacar que, en cuanto a los rendimientos promedios en $\text{l/m}^2/\text{d}$ de captura de agua de rocío y niebla, los colectores con el film bioplástico obtuvieron como resultados 0.221 y 0.246 $\text{l/m}^2/\text{día}$, en el punto 1 y 2, respectivamente.

8. DISCUSIÓN

El material bioplástico seleccionado desarrollado a partir de biopolímeros de PLA y PBAT para ser utilizado en un potencial sistema de captura de agua de rocío y niebla corresponde al film de PLA-PEG 10/PLA 90/JONCRYL. Éste se caracterizó por presentar una buena resistencia e hidrofobicidad, propiedades necesarias para la aplicación deseada. Por ello, para realizar la selección de este film, se caracterizaron las propiedades térmicas, físicas y mecánicas de las formulaciones y films elaborados a escala laboratorio.

Con respecto a las propiedades mecánicas de las formulaciones elaboradas, al compararlas, la mezcla de PLA-PEG 10/PBAT 90 presentó el mejor porcentaje de alargamiento a la rotura y el módulo de elasticidad más bajo. Esto concuerda con lo observado por De Luca et al. (2023) quienes establecieron que la combinación de estos biopolímeros muestra una disminución en el módulo de elasticidad y un aumento en el alargamiento en el punto de rotura, a mayores concentraciones de PBAT en la mezcla. En cuanto a las propiedades térmicas de las formulaciones, las temperaturas de fusión se encontraron en un rango entre los 160-170 °C, siendo ligeramente menor en la formulación de PLA-PEG 10/PBAT 90. Estas temperaturas son similares a las alcanzadas por Chiu et al. (2013) quienes en mezclas de PLA y PBAT encontraron valores iniciales de fusión de 164 °C. Además, en dicho estudio se observó que a medida que aumentaba el contenido de PLA, la temperatura de fusión inicial también tendía a aumentar, lo cual coincide con los resultados obtenidos. Por su parte, las temperaturas de degradación resultantes en las formulaciones fueron de un rango entre los 399-413 °C. De Luca et al. (2023) indican que valores mayores a 300 °C significan una alta estabilidad térmica. Relativo a las propiedades físicas, el índice de fluidez de las mezclas disminuyó a medida que el contenido de PBAT era mayor, lo cual coincide con lo señalado por Pivsa-Art et al. (2011) quienes demostraron una correlación de la disminución del índice de fluidez con el aumento gradual del porcentaje en peso del PBAT. A partir de estas caracterizaciones, se descartó la formulación de PLA-PEG 30/PBAT 70 para la elaboración de formulaciones con PLA-PEG, PBAT y JONCRYL, dada que esta presentó una gran rigidez, baja capacidad de deformación, alta temperatura de fusión y baja temperatura de degradación, lo que combinado dificulta la elaboración de films en la extrusora. En consecuencia, las formulaciones seleccionadas para la incorporación del JONCRYL fueron la de PLA-PEG 10/PBAT 90 y la de PLA-PEG 20/PBAT 80. La incorporación de este material mejoró la homogeneidad de las formulaciones, lo cual quedó en evidencia en los resultados obtenidos

en la caracterización de las formulaciones con JONCRYL, en donde se observó una mejora de las propiedades mecánicas y un aumento en las temperaturas de degradación. Estos resultados son consistentes con lo señalado en el estudio realizado por Al-Itry et al. (2014) quienes demostraron que el JONCRYL disminuye la rigidez, mejora el alargamiento en el punto de rotura y aumenta la resistencia térmica de las mezclas de PLA y PBAT.

Por otro lado, relativo a los films, mediante el ensayo de tracción realizado fue posible observar, de forma general, que el esfuerzo máximo, el alargamiento al punto de rotura, el módulo de elasticidad y el esfuerzo en el punto de rotura presentaron valores distintos en sentido extrusión y transversal. Según Su et al. (2020) estas diferencias se deben, principalmente, al comportamiento propio de los films soplados que es la anisotropía, donde, debido a esta característica, los valores de las variables son diferentes según la dirección. En el estudio realizado por estos investigadores, se obtuvo que al aumentar la cantidad de PLA, el módulo de elasticidad tiende a aumentar tanto en sentido extrusión como en sentido transversal. Mientras que el alargamiento en el punto de rotura tiende a disminuir, en ambas direcciones, con el aumento del porcentaje en peso de PLA en las mezclas. Esto coincide con los resultados obtenidos, dado que el film de PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL presentó una menor flexibilidad y alargamiento en comparación al film de PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL. En general, en el presente estudio, los resultados obtenidos en el ensayo de tracción indicaron que el film de Polietileno se caracterizó por presentar una buena flexibilidad, alargamiento y resistencia. Mientras que el film de PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL mostró poseer una buena flexibilidad y alargamiento, aunque una resistencia ligeramente menor. Por su parte, el film de PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL presentó una buena resistencia, pero una flexibilidad y un alargamiento menor. Pese a que las propiedades mecánicas de los films bioplásticos no son del todo semejantes a las del film de polietileno, basándose en sus similitudes, el film bioplástico de PLA-PEG10/PBAT 90/JONCRYL resultó ser el material más parecido al material de referencia.

En cuanto al ángulo de contacto de los films, el film de PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL presentó un ángulo de 92.9° , mientras que el film de PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL uno de 95.8° . Los valores obtenidos son cercanos al valor reportado por Tuure et al. (2020) quienes evaluaron rendimientos de recolección de agua de rocío a partir de la utilización de láminas plásticas, e indicaron que el ángulo de contacto de las láminas de Polietileno probadas resultó ser de 95.1° .

Además, los valores obtenidos indicaron que los films desarrollados presentaron un comportamiento hidrofóbico similar al del polietileno, es decir, tienden a repeler el agua. Destacándose entre ellos el film de PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL, cuyo ángulo de contacto presentó el valor más alto y más cercano al del polietileno.

Desde el punto de vista funcional, un bajo valor de permeabilidad al vapor de agua de los films desarrollados es una característica y atributo apropiado, dado que favorece el escurrimiento del agua captada por la superficie bioplástica (film), en lugar de ser retenida sobre ella. Según Trejo et al. (2001) cuando la permeabilidad es alta el material tiende a ser más hidrofílico, por lo que el agua es más propensa a ser retenida en su superficie, lo que genera su hinchamiento y, en consecuencia, una disminución en la eficiencia del funcionamiento del mismo. En este contexto, el film de PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL resultó ser el más prometedor, dado que presentó el valor de permeabilidad menor y más cercano al valor del material referencial.

Relativo al ensayo de desintegración, la desintegración progresiva del film de PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL, en comparación a la del film de PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL, resultó ser más lenta, lo cual podría estar relacionado al porcentaje en peso de PLA que contiene cada film. Según lo reportado por Afshar et al. (2025) los materiales con un alto contenido de PLA se desintegran con mayor rapidez. En su investigación obtuvieron que los materiales con PLA en el día 14 presentaron signos visibles de fragmentación, mientras que después de 30 días parecían haber desaparecido por completo. Al contrario, en materiales con PBAT y PLA la desintegración comenzó recién a partir del día 30 y después del día 90 todavía quedaban rastros visibles de los materiales. Además, cabe destacar que dado que el film PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL presentó una mayor resistencia a la degradación bajo condiciones controladas de compostaje, para condiciones reales de uso este material podría representar una opción prometedora en el contexto de su durabilidad en ambientes húmedos y temperaturas altas.

En Chile, los estudios sobre la implementación de sistemas de captura de agua de rocío y niebla en condiciones reales de uso y su potencial han sido escasos, pese a su potencial para abastecer zonas con problemas de escasez hídrica (Carvajal et al., 2018; Osses et al., 2000). La mayoría de los estudios existentes se han desarrollado en el norte del país, como los realizados en el parque nacional Fray Jorge, en El Tofo, en Combarbalá, en el Desierto de Atacama y en el Cerro Falda Verde (Carvajal et al., 2018; Cereceda et al., 2008; Larrain et al., 2002). En particular, en

el desierto de Atacama se han implementado sistemas de capturas de captura de agua de niebla a más de 600 msnm, alcanzando los 0.8 a 7 l/m²/d (Cereceda et al., 2008; Cereceda et al., 2014), lo que evidencia la influencia de factores como la altitud en la eficiencia de captación. Sin embargo, en Chile central la exploración de estas alternativas ha sido limitada, en parte por la antigua percepción de abundancia hídrica, lo que ha ido cambiando en las últimas décadas. En este contexto, los prototipos desarrollados con material bioplástico alcanzaron rendimientos de captura de agua de rocío y niebla de 0,221 y 0,246 l/m²/d, valores superiores a los reportados por Carvajal et al. (2018) en sectores como Combarbalá (Coquimbo) y Santiago. Cabe destacar que, según estos autores, la recolección de rocío no depende directamente de la latitud, sino que de factores meteorológicos como la humedad relativa, el viento y la emisividad del cielo, lo que refuerza la relevancia de contar con una fuente complementaria de agua en zonas a nivel del mar, especialmente frente al incremento de la escasez hídrica desde la zona central hacia el sur del país.

Si bien en este estudio inicial se desarrolló un bioplástico que pudo ser testeado en terreno, resulta necesario realizar más investigaciones sobre la relación de los rendimientos de captura de agua de rocío y niebla con las condiciones meteorológicas y topográficas del sector. Además, aunque los resultados obtenidos son preliminares, dado que los rendimientos resultaron superiores a algunos estudios de la literatura, la utilización del potencial sistema de captura de agua de rocío y niebla con el bioplástico desarrollado podría ser una posible alternativa para replicarse en otros sectores, donde las condiciones favorezcan tanto la formación de niebla como de rocío. Relativo al diseño de los sistemas, se utilizaron potenciales sistemas de captura inclinados a 60° a la horizontal, cuyas superficies estaban elaboradas a partir de un material bioplástico. Según Foday et al. (2022) una inclinación de 60° para capturar agua atmosférica permite una buena eficiencia de recolección, dado que permite una mayor movilidad de las gotas de agua gracias a la fuerza gravitatoria.

Al comparar los prototipos con el material bioplástico desarrollado con aquellos con superficies de polietileno, se observó que los prototipos con el material bioplástico lograron recolectar 71.1 y 93.38 ml más de agua de rocío y niebla. Esto podría atribuirse, principalmente, a su interacción con el agua, dado que en el material bioplástico, que presentaba un destacado comportamiento hidrofóbico con la permeabilidad al vapor de agua más baja y el ángulo de contacto más alto, de

528 g/d*m² y 95.8°, respectivamente, se generaron una mayor cantidad de gotas que escurrieron con gran facilidad por su superficie, mientras que con el polietileno el agua quedaba retenida en su superficie (Ver interacción de los materiales con el agua en Anexo 4). Estos resultados son consistentes con lo reportado por Knapczyk-Korczak et al. (2021) quienes estudiaron la importancia de la hidrofobia de los materiales para la recolección efectiva de agua de niebla. Estos investigadores pusieron a prueba dos materiales; una malla de tereftalato de polietileno hidrofílica y una hidrofóbica y obtuvieron que el material hidrofóbico presentó una mayor tasa de recolección de agua, siendo un 40% mayor. Este comportamiento lo atribuyeron a la naturaleza hidrofóbica del material, la cual permitió que las gotas de agua escurrieran con mayor facilidad por la superficie hacia el recipiente. También, Nioras et al. (2021) quienes estudiaron la diferencia en la eficiencia de captura de agua de niebla y de rocío en superficies hidrofílicas e hidrofóbicas, respaldan lo mencionado anteriormente. En su investigación obtuvieron que, tanto para la captura de agua de niebla como de rocío, las superficies hidrofóbicas mostraron un mejor desempeño, dado que su comportamiento no solo facilitó la movilidad de las gotas de agua, sino que también su formación. En este contexto, resulta relevante señalar que, el material bioplástico no solo presenta un mejor desempeño, sino que también se destaca por sobre el polietileno en su sostenibilidad, al estar elaborado a partir de materias primas biodegradables y al contar con una menor cantidad de aditivos en su composición.

Por otro lado, la literatura disponible evidencia el potencial del rocío y la niebla como fuentes no convencionales de agua. En Combarbalá, por ejemplo, se midió la cantidad de agua de rocío recogida en techos con sistemas pasivos de captación, y se determinaron cuantos eventos de rocío, niebla y lluvia ocurrieron durante 189 días. Sus resultados mostraron que se produjeron 108 eventos de rocío y niebla y 11 eventos de lluvia (Carvajal et al., 2018), evidenciando una alta disponibilidad de rocío y niebla. Además, cabe destacar que, a diferencia de la lluvia, el rocío y la niebla son más constantes durante la temporada de otoño e invierno (Montecinos, 2018). Esto permitiría capturar agua periódicamente. En consecuencia, la utilización del potencial prototipo de sistema de captura de agua de rocío y niebla con el bioplástico desarrollado podría representar una alternativa promisorio en lo que se refiere al aprovechamiento de fuentes no convencionales de agua.

9. CONCLUSIÓN

Chile central durante las últimas décadas ha experimentado problemas de escasez hídrica, que han afectado sobre todo a las rurales. Ante esta problemática y dado que los bioplásticos están siendo cada vez más utilizados en diversas aplicaciones, gracias al progreso en la mejora de sus propiedades mecánicas, físicas y térmicas. En el presente estudio se desarrolló un material bioplástico para su potencial uso en un prototipo de sistema de captura de agua de rocío y niebla.

Con respecto al material bioplástico seleccionado como el más idóneo, los resultados obtenidos demostraron que el film de PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL presentó un comportamiento anisotrópico, es decir, sus propiedades mecánicas presentaron valores distintos en sentido transversal y extrusión. Los valores resultantes del esfuerzo máximo, el módulo de elasticidad, el esfuerzo en el punto de rotura y el alargamiento en el punto de rotura, en sentido transversal, fueron de 12.3 MPa, 87.4 MPa, 9 MPa y 316 %, respectivamente, mientras que en sentido extrusión fueron de 18.2 MPa, 245.3 MPa, 11 MPa y 320.9 %, respectivamente. En general, en comparación a los demás films puestos a prueba, el film de PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL mostró poseer una buena flexibilidad y alargamiento, aunque una resistencia mecánica ligeramente menor. También, presentó una buena estabilidad térmica, con una temperatura de degradación superior a los 300 °C. Además, mostró una buena resistencia bajo condiciones simuladas, dado que su desintegración fue menor y más lenta que los demás films, y exhibió un comportamiento hidrofóbico, como consecuencia de su baja permeabilidad y alto ángulo de contacto, de 528 g/d*m² y 95.8°, respectivamente.

Relativo a la implementación de los potenciales sistemas de captura de agua de rocío y niebla en condiciones reales de uso, en terreno fue posible observar que los sistemas que contaron con el material bioplástico presentaron una gran cantidad de gotas que escurrieron con mayor facilidad por su superficie, exhibiendo una tendencia a repeler el agua, mientras que en el polietileno el agua quedaba retenida en su superficie. Por su parte, al comparar los rendimientos de captura de agua de rocío y niebla de ambos materiales, se obtuvo que el bioplástico logró captar 71.1 y 93.36 ml más agua de rocío y niebla que el polietileno, por lo que mostró un mejor desempeño. También, a partir de los rendimientos de captura de agua de rocío y niebla reportados en la literatura, fue posible evidenciar que los valores obtenidos en el presente estudio, de 0.221 y 0.246 l/m²/d, resultaron superiores a los obtenidos en zonas como

Combarbalá y Santiago, lo podría deberse a factores como las condiciones meteorológicas y topográficas del sector. Esto refuerza la relevancia de contar con una fuente complementaria de agua en zonas a nivel del mar. Además, si bien los resultados obtenidos son preliminares, dado el desempeño de los sistemas, su uso podría ser una alternativa prometedora para replicarse en sectores donde las condiciones propicien la formación de niebla y rocío.

En conclusión, en lugares que cuentan con una alta necesidad de disponibilidad hídrica, como las zonas rurales de Chile central, la utilización de un sistema de captura de agua de rocío y niebla con el material bioplástico desarrollado podría representar una alternativa complementaria, biodegradable y sostenible para obtener agua para distintos usos.

10. CONTRIBUCIÓN A LOS ODS

Tabla 18. Contribución del estudio a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

ODS	Justificación
Agua limpia y saneamiento	Mediante el desarrollo del material bioplástico para su potencial uso en un sistema de captura de agua de rocío y niebla, se busca reducir el impacto de la escasez hídrica presente en Chile, al contribuir en la implementación de alternativas no convencionales de agua para el abastecimiento de zonas donde las personas cuentan con una alta necesidad hídrica. Meta 6.4: Aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua.
Producción y consumo responsable	Al enfocarse en el desarrollo de un bioplástico biodegradable se está contribuyendo a la producción de materiales más sostenibles, lo que permite disminuir la dependencia sobre los plásticos convencionales. En consecuencia, minimizar los residuos y la huella de carbono. Meta 12.2: Lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.
Industria, innovación e infraestructuras	El estudio aporta en innovación al desarrollar un bioplástico para su utilización en un sistema de captura de agua de rocío y niebla. Temáticas que, si bien por separado han sido investigadas, su aplicación en conjunto ha sido poco explorada. Meta 9.5: Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando considerablemente, de aquí a 2030, el número de personas que trabajan en investigación y desarrollo por millón de habitantes y los gastos de los sectores público y privado en investigación y desarrollo.

Fuente: ONU, *Objetivos de Desarrollo Sostenible*, 2015.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abang, S., Wong, F., Sarbatly, R., Sariau, J., Bains, R., & Besar, N. A. (2023). Bioplastic classifications and innovations in antibacterial, antifungal, and antioxidant applications. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 8(4), 361-387. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobab.2023.06.005>
2. Acosta Cubides, L. D., & Herrera Quintero, S. (2021). *Metodología para el uso de captadores de rocío: una aproximación a una solución sostenible para el recurso hídrico en Maicao, La Guajira*. [Trabajo de grado, Fundación Universidad de América]. Repositorio Institucional Lumieres. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8594>
3. Afshar, S., Boldrin, A., Christensen, T., Corami, F., Dagaard, A., Rosso, B., & Hartmann, N. (2025). Desintegración de productos plásticos biodegradables comerciales en condiciones simuladas de compostaje industrial. *Scientific Reports*, 15, 8569. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91647-z>
4. Alnaser, W. E., & Barakat, A. (2000). Use of condensed water vapour from the atmosphere for irrigation in Bahrain. *Applied Energy*, 65(1), 3-18. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(99\)00054-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0306-2619(99)00054-9)
5. Aquaterra Ingenieros Ltda. (2011). Estudio hidrogeológico cuencas Bío Bío e Itata. Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/828d9567-d61d-470d-b7d7-becd11be8254/content>
6. Al-Itry, R., Lamnawar, K., & Maazouz, A. (2012). Improvement of thermal stability, rheological and mechanical properties of PLA, PBAT and their blends by reactive extrusion with functionalized epoxy. *Polymer Degradation and Stability*, 97(10), 1898-1914. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.06.028>
7. Al-Itry, R., Lamnawar, K., & Maazouz, A. (2014). Reactive extrusion of PLA, PBAT with a multi-functional epoxide: Physico-chemical and rheological properties. *European Polymer Journal*, 58, 90-102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.06.013>
8. Álvarez, C., Boisier, J., Blanco, G., Billi, M., Nicolas-Artero, C., Maillet, A., Aldunce, P., Urrutia, R., Zambrano, M., Guevara, G., Galleguillos, M., Muñoz, A., Christie, D., Marinao, R., & Garreaud, R. (2023). *Seguridad Hídrica en Chile: Caracterización y Perspectivas de Futuro*. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2. <https://www.cr2.cl/seguridadhidrica/>

9. Amulén. (2019). *Pobres de agua. Radiografía del agua potable rural en Chile: Visualización de un problema oculto*. Centro UC.
10. Arias-Torres, J. E., Jacobo-Villa, M. A., & Tolentino-Eslava, G. (2022). Captación de agua atmosférica sin consumo de energía. *Contactos, Revista De Educación En Ciencias E Ingeniería*, 1(125), 24-34. <https://contactos.izt.uam.mx/index.php/contactos/article/view/221>
11. ASTM International. (2022). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics* (ASTM D-638). <https://doi.org/10.1520/D0638-14>
12. ASTM International. (2024). *Standard Practice for Calculating Scientifically Justifiable Limits of Residues for Cleaning of Pharmaceutical and Medical Device Manufacturing Equipment and for Medical Devices* (ASTM E3418-23). <https://doi.org/10.1520/E3418-23>
13. ASTM International. (2020). *Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry* (ASTM e1131-20). <https://doi.org/10.1520/E1131-20>.
14. ASTM International. (2023). *Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer*. <https://doi.org/10.1520/D1238-23A>
15. ASTM International. (2020). *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*. <https://doi.org/10.1520/D0792-20>
16. ASTM International. (2018). *Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting*. <https://doi.org/10.1520/D0882-18>.
17. ASTM International. (2024). *Standard Test Methods for Gravimetric Determination of Water Vapor Transmission Rate of Materials*. https://doi.org/10.1520/E0096_E0096M-24
18. ASTM International. (2025). *Standard Test Method for Corona-Treated Polymer Films Using Water Contact Angle Measurements*. <https://doi.org/10.1520/D5946-17>
19. Baggio, G., Qadir, M., & Smakhtin, V. (2021). Freshwater availability status across countries for human and ecosystem needs. *Science of The Total Environment*, 792, 148230. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148230>
20. Banco Mundial. (2021). *El Agua en Chile: Elemento de Desarrollo y Resiliencia*. Banco Mundial. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/857121632811878667/pdf/El-Agua-en-Chile-Elemento-de-Desarrollo-y-Resiliencia.pdf>
21. Bartolucci, L., Cordiner, S., De Maina, E., Kumar, G., Mele, P., Mulone, V., Igliński, B., & Piechota, G. (2023). Sustainable Valorization of Bioplastic Waste: A Review on Effective Recycling Routes for the Most Widely Used Biopolymers [Review]. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(9), Article 7696. <https://doi.org/10.3390/ijms24097696>

22. Beltrán, M. (2011). *Tema 4. Extrusión* [Material docente]. Tecnología de los Polímeros. <http://hdl.handle.net/10045/16897>
23. Beysens, D. (1995). The formation of dew. *Atmospheric Research*, 39(1), 215-237. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0169-8095\(95\)00015-J](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0169-8095(95)00015-J)
24. Beysens, D., Milimouk, I., Nikolayev, V., Muselli, M., & Marcillat, J. (2003). Using radiative cooling to condense atmospheric vapor: a study to improve water yield. *Journal of Hydrology*, 276(1), 1-11. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00025-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00025-8)
25. Buñay, J., Caicedo, J., Choto, Luis., & Steven Cevallos, J. (2023). Diseño y validación de una máquina para ensayos a tracción de probetas de resinas poliméricas impresas en 3D. *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, 505-539. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9234499>
26. Castillo, R., Escobar, E., FernándezD., Gutiérrez, R., Morcillo, J., Núñez, N., & Peñaloza, S. (2015). Bioplástico a base de la cáscara del plátano. *Revista de Iniciación Científica*, 34-37. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/346>
27. Carvajal, D., Minonzio, J. G., Casanga, E., Muñoz, J., Aracena, A., Montecinos, S., & Beysens, D. (2018). Roof-integrated dew water harvesting in Combarbala, Chile. *Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua*, 67(4), 357-374. <https://doi.org/10.2166/aqua.2018.174>
28. Carvajal, D., Silva-Llanca, L., Larraguibel, D., & González, B. (2020). On the aerodynamic fog collection efficiency of fog water collectors via three-dimensional numerical simulations. *Atmospheric Research*, 245, 105123. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105123>
29. Çelebi, M., & Özdoğan, R. (2021). Preparation of poly(lactic acid) based biocomposites with poly(ethylene glycol) and montmorillonite clay by solvent casting method. *Journal of Innovative Engineering and Natural Science*, 1(1), 33-40. <https://doi.org/10.29228/JIENS.51666>
30. Cereceda, P., Larrain, H., Osses, P., Farías, M., & Egaña, I. (2008). The climate of the coast and fog zone in the Tarapacá Region, Atacama Desert, Chile. *Atmospheric Research*, 87(3–4), 301–311.
31. Cereceda, P., Hernández, P., Leiva, J., & Rivera, J. (2014). *Agua de niebla: nuevas tecnologías para el desarrollo sustentable en zonas áridas y semiáridas*. <https://cda.uc.cl/wp->

content/uploads/2024/02/Agua-de-Niebla.-Nuevas-Tecnologias-para-el-desarrollo-sustentable-en-zonas-aridas-y-semiaridas.pdf

32. Chauhan, K., Kaur, R., & Chauhan, I. (2024). Sustainable bioplastic: a comprehensive review on sources, methods, advantages, and applications of bioplastics. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 63(8), 913–938. <https://doi.org/10.1080/25740881.2024.2307369>
33. Chen, W., Qi, C., Li, Y., & Tao, H. (2021). The degradation investigation of biodegradable PLA/PBAT blend: Thermal stability, mechanical properties and PALS analysis. *Radiation Physics and Chemistry*, 180, 109239. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109239>
34. Chiu, Hsien-Tang., Huang., Szu-Yuan, Chen., Yan-Fu., Kuo, Ming-Tai., Chiang, Tzong-Yiing., Chang, Chi-Yung., & Wang, Yu-Hsiang. (2013). Heat Treatment Effects on the Mechanical Properties and Morphologies of Poly (Lactic Acid)/Poly (Butylene Adipate-co-terephthalate) Blends, *International Journal of Polymer Science*, 951696, 11 pages. <https://doi.org/10.1155/2013/951696>
35. Chloé, N.-A., Gustavo, B., Carlos, B., & Noelia, C. (2022). Modes of access to water for domestic use in rural Chile: a typological proposal. *Water Policy*, 24(7), 1179-1194. <https://doi.org/10.2166/wp.2022.026>
36. Clus, O., Ortega, P., Muselli, M., Milimouk, I., & Beysens, D. (2008). Study of dew water collection in humid tropical islands. *Journal of Hydrology*, 361(1), 159-171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.038>
37. Costa, A., Encarnação, T., Tavares, R., Todo Bom, T., & Mateus, A. (2023). Bioplastics: Innovation for Green Transition. *Polymers*, 15(3), 517. <https://doi.org/10.3390/polym15030517>
38. Córdoba, M., Del Cocco, V., & Basualdo, J. (2010). Agua y salud humana. *Química Viva*, 9(3), 105-119.
39. CR2. (2015). *Report to the Nation: The Central Chile Mega-Drought. Technical report from the Center for Climate and Resilience*. <http://www.cr2.cl/megasequia/>
40. De Luca, S., Milanese, D., Gallichi-Nottiani, D., Cavazza, A., & Sciancalepore, C. (2023). Poly(lactic acid) and Its Blends for Packaging Application: A Review. *Clean Technologies*, 5(4), 1304-1343.

41. Deuman. (2023). *Desarrollo de antecedentes para la formulación del Anteproyecto de Plan de Acción Regional de Cambio Climático (PARCC) de la región de Ñuble*. https://goredenuble.cl/wpcontent/uploads/2024/09/Estudio_Antecedentes_Anteproyecto.pdf
42. Devetak, S. (2014) *Plataforma contra la desertificación Atrapanieblas: Agua, difusión e innovación tecnológica IV región, Chile*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/130420>
43. Dirección General de Aguas. (2004). *Cuenca del río Itata*. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Itata.pdf>
44. Dirección General de Aguas. (2018). *Prospección geofísica sector rural déficit hídrico Valle del Itata*. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/32812>
45. Earnest, C. (1988). *Compositional Analysis by Thermogravimetry*, ASTM STP 997. ASTM International, Philadelphia
46. ECOEMBRES. (2008). *Informe sobre biodegradabilidad teórica de envases plásticos*.
47. Endres, HJ. (2017). Bioplastics. In: Wagemann, K., Tippkötter, N. (eds) *Biorefineries. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, vol 166. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/10_2016_75
48. Enríquez, M., Velasco, R., Fernandez, A., Palacios, L & Ruales, D. (2013). *Desarrollo de un biomaterial a partir del almidón modificado de yuca, agente antimicrobiano y plastificante*. <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v11n2/v11n2a>
49. Escenarios Hídricos 2030. (2018). *Radiografía del Agua: Brecha y Riesgo Hídrico en Chile*. Fundación Chile, Santiago, Chile. <https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/05/radiografia-del-agua.pdf>
50. Escenarios Hídricos 2030. (2019). *Transición Hídrica: El futuro del agua en Chile*. https://escenarioshidricos.cl/wp-content/uploads/2021/06/Transicion-hidrica-el-futuro-del-agua-en-Chile-v.1_compressed.pdf
51. European Bioplastics. (2021). *Bioplastics market developmentupdate 2021*. https://docs.europeanbioplastics.org/publications/market_data/Report_Bioplastics_Market_Data_2021_short_version.pdf
52. European Bioplastics. (2022). *What are bioplastics?*. https://docs.european-bioplastics.org/publications/fs/EuBP_FS_What_are_bioplastics.pdf
53. FAO. (2011). *Guía metodológica de alternativas técnicas de agua*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

54. Foday, E. H., Jr., Sesay, T., Baion, Y. M., Koroma, E. B., Jalloh, A. Y., Kokofele, K., & Baion, F. W. (2022). Efficient Water Collection from Biodesigned and Natural Inclined Surfaces: Influence of Inclination Angle on Atmospheric Water Collection. *ACS Omega*, 7(48), 43574-43581. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04344>
55. Fu, Y., Wu, L. S., Ai, S. L., Guo, Z. G., & Liu, W. M. (2023). Bionic collection system for fog-dew harvesting inspired from desert beetle. *Nano Today*, 52, Article 101979. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2023.101979>
56. Fuentes, N. (2012). *Estudio de los compuestos fenólicos en rocío de la ciudad de Santiago*. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/182586/Fuentes%20Jorquera%20c%20Natalia%20%28Tesis%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
57. Fransiska, D., Abdullah, A. H. D., Nurhayati, Irianto, H. E., Nissa, R. C., Sedayu, B. B., Syamani, F. A., Raharjo, S., Suwarti, & Agusman. (2024). Impact of agar–glycerol ratios on the physicochemical properties of biodegradable seaweed films: A compositional study. *International Journal of Biological Macromolecules*, 280, 135855.
58. Galán, U. (2023). *Estudios aerodinámicos de mallas sintéticas para el diseño de captadores de agua de niebla*. <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/33139?show=full>
59. Garreaud, R. D., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., and Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 6307–6327, <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>, 2017.
60. Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421-439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
61. Greve, P., Kahil, T., Mochizuki, J., Schinko, T., Satoh, Y., Burek, P., Fischer, G., Tramberend, S., Bartscher, R., Langan, S., & Wada, Y. (2018). Global assessment of water challenges under uncertainty in water scarcity projections. *Nature Sustainability*, 1(9), 486-494. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0134-9>
62. Harrer, R. (2022). Capturing Water from the Atmosphere. 10.1002/chemv.202200069
63. IPCC. (2008). *El cambio climático y el agua*. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/climate-change-water-sp.pdf>

64. Hu, Y., Rogunova, M., Topolkaraev, V., Hiltner, A., & Baer, E. (2003). Aging of poly(lactide)/poly(ethylene glycol) blends. Part 1. Poly(lactide) with low stereoregularity. *Polymer*, 44(19), 5701-5710. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(03\)00614-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0032-3861(03)00614-1)
65. ISO (International Organization for Standardization). (2023). *Determinación del grado de desintegración de materiales plásticos en condiciones simuladas de compostaje en una prueba a escala de laboratorio*.
66. Jacobs, A. F. G., Heusinkveld, B. G., & Berkowicz, S. M. (2008). Passive dew collection in a grassland area, The Netherlands. *Atmospheric Research*, 87(3), 377-385. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2007.06.007>
67. Jayakumar, A., Radoor, S., Siengchin, S., Shin, G. H., & Kim, J. T. (2023). Recent progress of bioplastics in their properties, standards, certifications and regulations: A review. *Science of The Total Environment*, 878, 163156. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163156>
68. Jayalath, U. T., Samaraweera, H., & Samarasinghe, A. (2025). Development and characterization of gelatin-starch bioplastics: A comparative study of cassava, corn, and rice-based alternatives. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 9, 100190. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scenv.2024.100190>
69. Jian, J., Xiangbin, Z., & Xianbo, H. (2020). An overview on synthesis, properties and applications of poly(butylene-adipate-co-terephthalate)–PBAT. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3(1), 19-26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.01.001>
70. Kalthoff, N., Fiebig-Wittmaack, M., Meißner, C., Kohler, M., Uriarte, M., Bischoff-Gauß, I., & Gonzales, E. (2006). The energy balance, evapo-transpiration and nocturnal dew deposition of an arid valley in the Andes. *Journal of Arid Environments*, 65(3), 420-443. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.08.013>
71. Khalil, B., Adamowski, J., Shabbir, A. (2016). A review: dew water collection from radiative passive collectors to recent developments of active collectors. *Sustain. Water Resour. Manag.* 2, 71–86. <https://doi.org/10.1007/s40899-015-0038-z>.
72. Kord, S. M. Z., Tuure, J., Räsänen, M., Galambosi, S., & Alakukku, L. (2024). Geometry and surface manipulation impact on passive dew and rain collection. *Agricultural and Forest Meteorology*, 356, 110180. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110180>

73. Knapczyk-Korczak, J., Szewczyk, P. K., y Stachewicz, U. (2021). La importancia de la hidrofobia de la nanofibra para una recolección efectiva del agua de niebla. *Avances de RSC*, 11(18), 10866-10873. <https://doi.org/10.1039/d1ra00749a>
74. Krishnan, S., Pandey, P., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2016). Toughening of Polylactic Acid: An Overview of Research Progress. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 55(15), 1623-1652. <https://doi.org/10.1080/03602559.2015.1098698>
75. Larrain, H., Velásquez, F., Cereceda, P., Espejo, R., Pinto, R., Osses, P., & Schemenauer, R. S. (2002). Fog measurements at the site “Falda Verde” north of Chañaral compared with other fog stations of Chile. *Atmospheric Research*, 64(1), 273-284. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(02\)00098-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-8095(02)00098-4)
76. Lopez, V. (2021). *Tecnologías de captación de agua de niebla para el desarrollo sostenible en la loma de Tacahuay, Tacna, 2021*. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11103/3/IV_FIN_107_TE_Lopez_Nuñez_2021.pdf
77. Loyola, C., & Rivas, J. (2015). Accesibilidad a los centros poblados en el Valle del Itata, Provincia de Ñuble, Chile. *Polígonos. Revista de Geografía*, (26), 255–276. <https://doi.org/10.18002/pol.v0i26.1706>
78. Melnyk, L., Kubatko, O., Piven, V., Kucherenko, P., & Ihnatchenko, V. (2019). Bioplastics production for circular economy and sustainable development promotion. *Ekonomika APK*, 26(11), -. <https://doi.org/10.32317/2221-1055.201911079>
79. Montecinos, S., Cereceda, P., & Rivera, D. (2018). Fog collection and its relationship with local meteorological variables in a semiarid zone in Chile. *Atmósfera*, 31(2), 143–153. <https://doi.org/10.20937/ATM.2018.31.02.03>
80. Muselli, M., Beysens, D., Mileta, M., & Milimouk, I. (2009). Dew and rain water collection in the Dalmatian Coast, Croatia. *Atmospheric Research*, 92(4), 455-463. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.01.004>
81. Naderi Kalali, E., Lotfian, S., Entezar Shabestari, M., Khayatzaheh, S., Zhao, C., & Yazdani Nezhad, H. (2023). A critical review of the current progress of plastic waste recycling technology in structural materials. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 40, 100763. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100763>

82. Nioras, D., Ellinas, K., Constantoudis, V., & Gogolides, E. (2021). How Different Are Fog Collection and Dew Water Harvesting on Surfaces with Different Wetting Behaviors? *ACS Appl Mater Interfaces*, 13(40), 48322-48332. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c16609>.
83. Nuñez. (2019). *Planta de producción de ácido poliláctico (PLA) a partir de ácido láctico*. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/92571/fichero/TFG-25>
84. Olagunju, O. A., & Kiambi, S. L. (2024). The Environmental Benefits, Technical Challenges, and Scalability of the Bioplastic Production Methods. In O. J. Gbadeyan & N. Deenadayalu (Eds.), *Biomass-based Bioplastic and Films: Preparation, Characterization, and Application* (pp. 207-216). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71859-5_11
85. OECD. (2015). *Environment at a Glance 2015: OECD Indicators*. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264235199-en>
86. OECD. (2022). *Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060*. <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>
87. ONU. (2021). *Escasez hídrica: desafíos pendientes*. https://chile.un.org/sites/default/files/202103/PB%20Recursos%20Hídricos_FINAL_17%20de%20marzo.pdf
88. ONU. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
89. Osses, P., Schemenauer, R. S., Cereceda, P., Larrain, H., & Correa, C. (2021). Los atrapanieblas del Santuario Padre Hurtado y sus proyecciones en el combate a la desertificación. *Revista De Geografía Norte Grande*, (27), 61–67. <https://ojs.uc.cl/index.php/RGNG/article/view/43231>
90. Peñaloza, C., & Peñaloza, M. (2020). *Evaluación de un sistema piloto de captación de agua mediante la tecnología de aprovechamiento de la niebla en sectores estratégicos del municipio de Ocaña*. <https://repositorioinstitucional.ufpso.edu.co/xmlui/handle/20.500.14167/4698>
91. Pietrosanto, A., Scarfato, P., Di Maio, L., & Incarnato, L. (2020). Development of Eco-Sustainable PBAT-Based Blown Films and Performance Analysis for Food Packaging Applications. *Materials*, 13(23).
92. Pivsa-Art, W., Pavasupree, S., O-Charoen, N., Insuan, U., Jailak, P., & Pivsa-Art, S. (2011). Preparation of Polymer Blends Between Poly (L-Lactic Acid), Poly (Butylene Succinate-Co-Adipate) and Poly (Butylene Adipate-Co-Terephthalate) for Blow Film Industrial Application. *Energy Procedia*, 9, 581-588. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.09.068>

93. Remar. (2011). *Guía práctica: Bioplásticos*. <https://www.virtualpro.co/biblioteca/bioplasticos>
94. Ritter, F., Berkelhammer, M., & Beysens, D. (2019). Dew frequency across the US from a network of in situ radiometers, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 1179–1197, <https://doi.org/10.5194/hess-23-1179-2019>
95. Rodríguez, S. (2022). Aprovechamiento del agua de niebla en Catalunya : viabilidad del uso de atrapanieblas como alternativa para el suministro de agua. <https://hdl.handle.net/2117/375725>
96. Roy, S., Ghosh, T., Zhang, W., & Rhim, J.-W. (2024). Recent progress in PBAT-based films and food packaging applications: A mini-review. *Food Chemistry*, 437, 137822. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137822>
97. Rubio, M. A., Lissi, E., & Villena, G. (2002). Nitrite in rain and dew in Santiago city, Chile. Its possible impact on the early morning start of the photochemical smog. *Atmospheric Environment*, 36(2), 293-297. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00356-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00356-9)
98. Seewoo, B. J., Wong, E. V. S., Mulders, Y. R., Goodes, L. M., Eroglu, E., Brunner, M., Gozt, A., Toshniwal, P., Symeonides, C., & Dunlop, S. A. (2024). Impacts associated with the plastic polymers polycarbonate, polystyrene, polyvinyl chloride, and polybutadiene across their life cycle: A review. *Heliyon*, 10(12), e32912. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32912>
99. Serna, L., Rodríguez, A., & Albán, F. (2003). Ácido Poliláctico (PLA): propiedades y aplicaciones. <https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria>
100. Simón M.D. (2009). *Estudio sobre la captación pasiva de agua de niebla y su aplicabilidad*.
101. Schächtele, K. (ed.). (2020). Atlas del plástico: datos y cifras sobre el mundo de los polímeros sintéticos 2020. Ciudad de México: Fundación Heinrich Böll. <https://bvearmb.do/handle/123456789/2821>
102. Sharan, G., Beysens, D., & Milimouk-Melnytchouk, I. (2007). A study of dew water yields on Galvanized iron roofs in Kothara (North-West India). *Journal of Arid Environments*, 69(2), 259-269. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.09.004>
103. Shen, Y., Oki, T., Kanae, S., Hanasaki, N., Utsumi, N., & Kiguchi, M. (2014). Projection of future world water resources under SRES scenarios: an integrated assessment. *Hydrological Sciences Journal*, 59(10), 1775-1793. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.862338>

104. Su, S., Duhme, M., & Kopitzky, R. (2020). Uncompatibilized PBAT/PLA Blends: Manufacturability, Miscibility and Properties. *Materials*, 13(21), 4897. <https://doi.org/10.3390/ma13214897>
105. Tomaszewicz, M., Abou Najm, M., Zurayk, R., & El-Fadel, M. (2017). Dew as an adaptation measure to meet water demand in agriculture and reforestation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 411-421. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.09.009>
106. Trejo, Verónica, Aragón, Nidia, & Miranda, Patricia. (2001). Estimación de la permeabilidad al vapor de agua en películas a base de quitosán. *Revista de la Sociedad Química de México*, 45(1), 01-05. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S058376932001000100001&lng=es&tlng=es
107. Tuure, J., Korpela, A., Hautala, M., Rautkoski, H., Hakojärvi, M., Mikkola, H., Duplissy, J., Pellikka, P., Petäjä, T., Kulmala, M., & Alakukku, L. (2020). Comparing plastic foils for dew collection: Preparatory laboratory-scale method and field experiment in Kenya. *Biosystems Engineering*, 196, 145-158. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.05.016>
108. Trosseille, J., Mongruel, A., Royon, L., & Beysens, D. (2021). Radiative cooling for dew condensation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 172, 121160. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121160>
109. UNESCO. (2021). *El valor del agua*. <https://unhabitat.org/sites/default/files/2021/07/375751spa.pdf>
110. Uribe, H. (2020). Recursos hídricos y riego en la Región de Ñuble. En J. González (Ed.), *Agricultura de la nueva Región de Ñuble: una caracterización sectorial* (Libro INIA N.º 39). Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
111. Venkatachalam, H., & Palaniswamy, R. (2020). BIOPLASTIC WORLD: A REVIEW. *Journal of Advanced Scientific Research*, 11(03), 43-53. Retrieved from <https://sciensage.info/index.php/JASR/article/view/505>
112. Verbrugghe, N., & Khan, A. Z. (2024). Atmospheric water harvesting as a sustainable and resilient resource in arid climates: gaining insights from ancient techniques. *Water Supply*, 24(11), 3810-3830. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.245>
113. WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2014). *The United Nations World Water Development Report 2014: Water and energy*. (Vol. 5). UNESCO.

114. Yu, W., Li, M., Lei, W. y Chen, Y. (2024) Impresión 3D FDM y propiedades de las mezclas PBAT/PLA. *Polímeros*, 16(8), 1140. <https://doi.org/10.3390/polym16081140>
115. Zavala Arredondo, M., Castañeda Ramírez, J. C., Rivera Arredondo, M., & De la Fuente Salcido, N. M. (2018). Evaluación de propiedades mecánicas y permeabilidad al vapor de agua de películas de quitosano. *Jóvenes en la ciencia*, 4, 27–31.
116. Zenner de Polanía, I., & Peña Baracaldo, F. (2013). Plásticos en la agricultura: beneficio y costo ambiental: una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 16(1), 139–150. <https://doi.org/10.31910/rudca.v16.n1.2013.868>

12. ANEXOS

12.1 Anexo 1

Prueba de normalidad de datos y análisis de varianzas de propiedades mecánicas y físicas de las formulaciones de PLA-PEG/PBAT en distintas proporciones de sus biopolímeros

- Módulo de elasticidad

Tabla 19. Prueba de Shapiro-Wilk de formulaciones de PLA-PEG/PBAT.

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80	W	0.91648
	p-value	0.2904
PLA-PEG 10 / PBAT 90	W	0.90179
	p-value	0.1673
PLA-PEG 30 / PBAT 70	W	0.93065
	p-value	0.4543

Tabla 20. Análisis estadístico

Análisis estadístico	Comparación entre formulaciones	Valor p ajustado	Interpretación
ANOVA	-	2.77×10^{-5}	Existen diferencias significativas entre las formulaciones elaboradas de PLA-PEG/PBAT.
Tukey HSD	PLA-PEG 20/PBAT 80	0.5748	No hay diferencias significativas entre las formulaciones.
	PLA-PEG 10/PBAT 90		
	PLA-PEG 30/PBAT 70	0.0000383	Si hay diferencias significativas entre las formulaciones.
	PLA-PEG 10/PBAT 90		
	PLA-PEG 30/PBAT 70	0.0002414	Existen unas diferencias significativas entre las formulaciones.
	PLA-PEG 20/PBAT 80		

- Esfuerzo máximo

Tabla 21. Prueba de Shapiro-Wilk de formulaciones de PLA-PEG/PBAT.

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80	W	0.91106
	p-value	0.251
PLA-PEG 10 / PBAT 90	W	0.92617
	p-value	0.3413
PLA-PEG 30 / PBAT 70	W	0.96168
	p-value	0.8048

Tabla 22. Análisis estadístico.

Análisis estadístico	Comparación entre formulaciones	Valor p ajustado	Interpretación
ANOVA	-	8.27×10^{-8}	Existen diferencias significativas entre las formulaciones elaboradas de PLA-PEG/PBAT.
Tukey HSD	PLA-PEG 20/PBAT 80 PLA-PEG 10/PBAT 90	0.0000002	Hay diferencias significativas entre las formulaciones.
	PLA-PEG 30/PBAT 70 PLA-PEG 10/PBAT 90	0.8477695	No hay diferencias significativas entre las formulaciones.
	PLA-PEG 30/PBAT 70 PLA-PEG 20/PBAT 80	0.0000002	Existen diferencias significativas entre las formulaciones.

- Esfuerzo en el punto de rotura

Tabla 23. Prueba de Shapiro-Wilk de formulaciones de formulaciones de PLA-PEG/PBAT.

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80	W	0.91924
	p-value	0.5251
PLA-PEG 10 / PBAT 90	W	0.92557
	p-value	0.3355
PLA-PEG 30 / PBAT 70	W	0.86639
	p-value	0.0907

Tabla 24. Análisis estadístico.

Análisis estadístico	Comparación entre formulaciones	Valor p ajustado	Interpretación
ANOVA	-	6.02×10^{-6}	Existen diferencias significativas entre las formulaciones elaboradas de PLA-PEG/PBAT.
Tukey HSD	PLA-PEG 20/PBAT 80 PLA-PEG 10/PBAT 90	0.0000049	Existen diferencias significativas entre las formulaciones.
	PLA-PEG 30/PBAT 70 PLA-PEG 10/PBAT 90	0.0003427	Si hay diferencias significativas entre las formulaciones.
	PLA-PEG 30/PBAT 70 PLA-PEG 20/PBAT 80	0.3590143	No hay diferencias significativas entre las formulaciones.

- Alargamiento en el punto de rotura

Tabla 25. Prueba de Shapiro-Wilk de formulaciones de PLA-PEG/PBAT.

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80	W	0.93758
	p-value	0.1673
PLA-PEG 10 / PBAT 90	W	0.9413
	p-value	0.4925
PLA-PEG 30 / PBAT 70	W	0.89673
	p-value	0.2016

Tabla 26. Análisis estadístico.

Análisis estadístico	Comparación entre formulaciones	Valor p ajustado	Interpretación
ANOVA	-	2.75×10^{-5}	Existen diferencias significativas entre las formulaciones elaboradas de PLA-PEG/PBAT.
Tukey HSD	PLA-PEG 20/PBAT 80	0.0000217	Existen diferencias significativas entre las formulaciones.
	PLA-PEG 10/PBAT 90		
	PLA-PEG 30/PBAT 70	0.0003783	Si hay diferencias significativas entre las formulaciones.
	PLA-PEG 10/PBAT 90		
	PLA-PEG 30/PBAT 70	0.0854363	No hay diferencias significativas entre las formulaciones.
	PLA-PEG 20/PBAT 80		

- Densidad

Tabla 27. Prueba de Shapiro-Wilk de formulaciones de PLA-PEG/PBAT.

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80	W	0.82164
	p-value	0.1673
PLA-PEG 10 / PBAT 90	W	0.81628
	p-value	0.154
PLA-PEG 30 / PBAT 70	W	0.91709
	p-value	0.4422

Tabla 28. Análisis estadístico.

Análisis estadístico	Comparación entre formulaciones	Valor p ajustado	Interpretación
ANOVA	-	0.000206	Existen diferencias significativas entre las formulaciones elaboradas de PLA-PEG/PBAT.
Tukey HSD	PLA-PEG 20/PBAT 80 PLA-PEG 10/PBAT 90	0.0475473	Existen diferencias significativas entre las formulaciones.
	PLA-PEG 30/PBAT 70 PLA-PEG 10/PBAT 90	0.0001819	Si hay diferencias significativas entre las formulaciones.
	PLA-PEG 30/PBAT 70 PLA-PEG 20/PBAT 80	0.0015712	Existe una diferencia significativa entre las formulaciones.

- Índice de fluidez

Tabla 29. Prueba de Shapiro-Wilk de formulaciones de PLA-PEG/PBAT.

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80	W	0.92708
	p-value	0.5774
PLA-PEG 10 / PBAT 90	W	0.95161
	p-value	0.7262
PLA-PEG 30 / PBAT 70	W	0.96115
	p-value	0.7862

Tabla 30. Análisis estadístico.

Análisis estadístico	Comparación entre formulaciones	Valor p ajustado	Interpretación
ANOVA	-	2.03×10^{-6}	Existen diferencias significativas entre las formulaciones elaboradas de PLA-PEG/PBAT.
Tukey HSD	PLA-PEG 20/PBAT 80 PLA-PEG 10/PBAT 90	0.0003646	Existen diferencias significativas entre las formulaciones.
	PLA-PEG 30/PBAT 70 PLA-PEG 10/PBAT 90	0.0000016	Si hay diferencias significativas entre las formulaciones.
	PLA-PEG 30/PBAT 70 PLA-PEG 20/PBAT 80	0.0000313	Existen diferencias significativas entre las formulaciones.

Prueba de normalidad de datos y análisis de varianzas de propiedades mecánicas y físicas de las formulaciones de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL, en distintas proporciones de sus biopolímeros

- Módulo de elasticidad

Tabla 31. Prueba de Shapiro-Wilk de formulaciones de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80/JONCRYL	W	0.90411
	p-value	0.1792
PLA-PEG 10 / PBAT 90/JONCRYL	W	0.96335
	p-value	0.8304

Tabla 32. Análisis estadístico.

Análisis estadístico	Valor de p	Interpretación
ANOVA	0.0144	Existen diferencias significativas entre las formulaciones elaboradas de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.

- Esfuerzo máximo

Tabla 33. Prueba de Shapiro-Wilk de formulaciones de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80/JONCRYL	W	0.92895
	p-value	0.3692
PLA-PEG 10 / PBAT 90/JONCRYL	W	0.94658
	p-value	0.5876

Tabla 34. Análisis estadístico.

Análisis estadístico	Valor de p	Interpretación
ANOVA	0.000172	Existen diferencias significativas entre las formulaciones elaboradas de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.

Esfuerzo en el punto de rotura

Tabla 35. Prueba de Shapiro-Wilk de formulaciones de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80/JONCRYL	W	0.94254
	p-value	0.5317
PLA-PEG 10 / PBAT 90/JONCRYL	W	0.90707
	p-value	0.1956

Tabla 36. Análisis estadístico.

Análisis estadístico	Valor de p	Interpretación
ANOVA	0.0924	No hay diferencias significativas entre las formulaciones elaboradas de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.

- Alargamiento en el punto de rotura

Tabla 37. Prueba de Shapiro-Wilk de formulaciones de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80/JONCRYL	W	0.94254
	p-value	0.5317
PLA-PEG 10 / PBAT 90/JONCRYL	W	0.93788
	p-value	0.4711

Tabla 38. Análisis estadístico.

Análisis estadístico	Valor de p	Interpretación
ANOVA	1×10^{-9}	Hay diferencias significativas entre las formulaciones elaboradas de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.

- Densidad

Tabla 39. Prueba de Shapiro-Wilk de formulaciones de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80/JONCRYL	W	0.99334
	p-value	0.8439
PLA-PEG 10 / PBAT 90/JONCRYL	W	0.95682
	p-value	0.6002

Tabla 40. Análisis estadístico.

Análisis estadístico	Valor de p	Interpretación
ANOVA	0.00702	Existen diferencias significativas entre las formulaciones elaboradas de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.

- Índice de fluidez

Tabla 41. Prueba de Shapiro-Wilk de formulaciones de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80/JONCRYL	W	0.92708
	p-value	0.5774
PLA-PEG 10 / PBAT 90/JONCRYL	W	0.87227
	p-value	0.3067

Tabla 42. Análisis estadístico.

Análisis estadístico	Valor de p	Interpretación
ANOVA	0.883	No hay diferencias significativas entre las formulaciones elaboradas de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL

Prueba de normalidad de datos y análisis de varianzas de propiedades mecánicas y físicas de los films de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL

Ensayo de tracción de los films (sentido extrusión)

- Módulo de elasticidad

Tabla 43. Prueba de Shapiro-Wilk de films.

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80	W	0.8853
	p-value	0.8817
PLA-PEG 10 / PBAT 90	W	0.8663
	p-value	0.1025
POLIETILENO	W	0.96589
	p-value	0.6452

Tabla 44. Análisis estadístico.

Análisis estadístico	Comparación entre films	Valor p ajustado	Interpretación
ANOVA	-	1.18×10^{-10}	Existen diferencias significativas entre los films elaborados de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.
Tukey HSD	PLA-PEG 20/ PBAT 80/JONCRYL	0	Existen diferencias significativas entre los films.
	PLA-PEG 10/ PBAT 90/JONCRYL		
	POLIETILENO	0.6883551	No hay diferencias significativas entre los films.
	PLA-PEG 10/ PBAT 90/JONCRYL		
	POLIETILENO	0	Hay diferencias significativas entre los films.
	PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL		

- Esfuerzo máximo

Tabla 45. Prueba de Shapiro-Wilk de films.

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80	W	0.9674
	p-value	0.8817
PLA-PEG 10 / PBAT 90	W	0.97922
	p-value	0.9804
POLIETILENO	W	0.88131
	p-value	0.07429

Tabla 46. Análisis estadístico.

Análisis estadístico	Comparación entre films	Valor p ajustado	Interpretación
ANOVA	-	7.65×10^{-8}	Existen diferencias significativas entre los films elaborados de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.
Tukey HSD	PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL	0.0458159	Existen diferencias significativas entre los films.
	POLIETILENO PLA-PEG 10/PBAT 90/JONCRYL	0.0000001	Hay diferencias significativas entre los films.
	POLIETILENO PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL	0.0000045	Existen diferencias significativas entre los films.

- Esfuerzo en el punto de rotura

Tabla 47. Prueba de Shapiro-Wilk de films.

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80	W	0.93566
	p-value	0.444
PLA-PEG 10 / PBAT 90	W	0.95163
	p-value	0.547
POLIETILENO	W	0.8762
	p-value	0.06336

Tabla 48. Análisis estadístico.

Análisis estadístico	Comparación entre films	Valor p ajustado	Interpretación
ANOVA	-	0.000995	Existen diferencias significativas entre los films elaborados de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.
Tukey HSD	PLA-PEG 20/ PBAT 80/JONCRYL PLA-PEG 10/ PBAT 90/JONCRYL	0.7397827	No hay diferencias significativas entre los films.
	POLIETILENO PLA-PEG 10/ PBAT 90/JONCRYL	0.0009864	Hay diferencias significativas entre los films.
	POLIETILENO PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL	0.0049013	Existen diferencias significativas entre los films.

- Alargamiento en el punto de rotura

Tabla 49. Prueba de Shapiro-Wilk de films.

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80	W	0.85261
	p-value	0.1012
PLA-PEG 10 / PBAT 90	W	0.94367
	p-value	0.547
POLIETILENO	W	0.94681
	p-value	0.5909

Tabla 50. Análisis estadístico.

Análisis estadístico	Comparación entre films	Valor p ajustado	Interpretación
ANOVA	-	0.0444	Existen diferencias significativas entre los films elaborados de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.
Tukey HSD	PLA-PEG 20/ PBAT 80/JONCRYL	0.0565660	No hay diferencias significativas entre los films.
	PLA-PEG 10/ PBAT 90/JONCRYL		
	POLIETILENO	0.0869515	No hay diferencias significativas entre los films.
	PLA-PEG 10/ PBAT 90/JONCRYL		
	POLIETILENO	0.9983138	No existen diferencias significativas entre los films.
	PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL		

Ensayo de tracción de los films (sentido transversal)

- Módulo de elasticidad

Tabla 51. Prueba de Shapiro-Wilk de films.

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80	W	0.97409
	p-value	0.8666
PLA-PEG 10 / PBAT 90	W	0.89413
	p-value	0.1565
POLIETILENO	W	0.93918
	p-value	0.4464

Tabla 52. Análisis estadístico.

Análisis estadístico	Comparación entre films	Valor p ajustado	Interpretación
ANOVA	-	4.79×10^{-6}	Existen diferencias significativas entre los films elaborados de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.
Tukey HSD	PLA-PEG 20/ PBAT 80/JONCRYL PLA-PEG 10/ PBAT 90/JONCRYL	0.0246983	Hay diferencias significativas entre los films.
	POLIETILENO PLA-PEG 10/ PBAT 90/JONCRYL	0.0000068	Se observan diferencias significativas entre los films.
	POLIETILENO PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL	0.0001094	Existen diferencias significativas entre los films.

- Esfuerzo máximo

Tabla 53. Prueba de Shapiro-Wilk de films.

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80	W	0.83315
	p-value	0.1607
PLA-PEG 10 / PBAT 90	W	0.97409
	p-value	0.8666
POLIETILENO	W	0.95061
	p-value	0.6075

Tabla 54. Análisis estadístico.

Análisis estadístico	Comparación entre films	Valor p ajustado	Interpretación
ANOVA	-	0.00956	Existen diferencias significativas entre los films elaborados de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.
Tukey HSD	PLA-PEG 20/ PBAT 80/JONCRYL PLA-PEG 10/ PBAT 90/JONCRYL	0.2411502	No hay diferencias significativas entre los films.
	POLIETILENO PLA-PEG 10/ PBAT 90/JONCRYL	0.1031303	No se observan diferencias significativas entre los films.
	POLIETILENO PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL	0.0074617	Existen diferencias significativas entre los films.

- Esfuerzo en el punto de rotura

Tabla 55. Prueba de Shapiro-Wilk de films.

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80	W	0.99796
	p-value	0.9138
PLA-PEG 10 / PBAT 90	W	0.89335
	p-value	0.1531
POLIETILENO	W	0.97512
	p-value	0.6975

Tabla 56. Análisis estadístico.

Análisis estadístico	Comparación entre films	Valor p ajustado	Interpretación
ANOVA	-	0.00375	Existen diferencias significativas entre los films elaborados de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.
Tukey HSD	PLA-PEG 20/ PBAT 80/JONCRYL	0.4726629	No hay diferencias significativas entre los films.
	PLA-PEG 10/ PBAT 90/JONCRYL		
	POLIETILENO	0.0035734	Si hay diferencias significativas entre los films.
	PLA-PEG 10/ PBAT 90/JONCRYL		
	POLIETILENO	0.0544938	Existen diferencias ligeramente significativas entre los films.
	PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL		

- Alargamiento en el punto de rotura

Tabla 57. Prueba de Shapiro-Wilk de films.

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80	W	0.87078
	p-value	0.2977
PLA-PEG 10 / PBAT 90	W	0.94287
	p-value	0.5548
POLIETILENO	W	0.9355
	p-value	0.4014

Tabla 58. Análisis estadístico.

Análisis estadístico	Comparación entre films	Valor p ajustado	Interpretación
ANOVA	-	0.00201	Existen diferencias significativas entre los films elaborados de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL.
Tukey HSD	PLA-PEG 20/ PBAT 80/JONCRYL PLA-PEG 10/ PBAT 90/JONCRYL	0.8238556	No hay diferencias significativas entre los films.
	POLIETILENO PLA-PEG 10/ PBAT 90/JONCRYL	0.0027785	Si hay diferencias significativas entre los films.
	POLIETILENO PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL	0.0048787	Existen diferencias significativas entre los films.

- Permeabilidad al vapor de agua

Tabla 59. Prueba de Shapiro-Wilk de films.

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80	W	0.89028
	p-value	0.3844
PLA-PEG 10 / PBAT 90	W	0.98561
	p-value	0.7703
POLIETILENO	W	0.87242
	p-value	0.236

Tabla 60. Análisis estadístico.

Análisis estadístico	Comparación entre films	Valor p ajustado	Interpretación
ANOVA	-	0.673	No hay diferencias significativas entre los films elaborados de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL
Tukey HSD	PLA-PEG 20/ PBAT 80/JONCRYL PLA-PEG 10/ PBAT 90/JONCRYL	0.6494824	No hay diferencias significativas entre los films.
	POLIETILENO PLA-PEG 10/ PBAT 90/JONCRYL	0.8743127	No hay diferencias significativas entre los films.
	POLIETILENO PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL	0.8603973	No existen diferencias significativas entre los films.

Ángulo de contacto

Tabla 61. *Prueba de Shapiro-Wilk de films.*

Prueba de Shapiro-Wilk		
PLA-PEG 20 / PBAT 80	W	0.8746
	p-value	0.2451
PLA-PEG 10 / PBAT 90	W	0.92311
	p-value	0.528

Tabla 62. *Análisis estadístico de varianzas.*

Análisis estadístico	Valor de p	Interpretación
ANOVA	0.438	No hay diferencias significativas entre los films elaborados de PLA-PEG/PBAT/JONCRYL

12.2 Anexo 2

Tabla 63. Grados de desintegración de los films.

FILM	Reactor	mi: masa seca inicial de ensayo (g)	mr: masa seca material de ensayo residual (g)	D: grado de desintegración
PLA-PEG 10/ PBAT 90/JONCRYL	4	5.0	2.9	43.0
PLA-PEG 20/PBAT 80/JONCRYL	5	5	2.538	49.2

12.3 Anexo 3

Análisis estadístico del Punto 1 (Casa Sr. Hidalgo)

Tabla 64. Prueba de Shapiro-Wilk .

Prueba de Shapiro-Wilk	W	0.91059
	p-value	0.1607

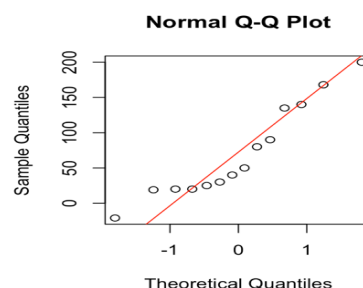


Tabla 65. Análisis estadístico t.

T de Student	Estadístico t	4.0229
	P-value	0.001448
	Intervalo de confianza (95%)	32.9-109.3
	Media de la diferencia	71.14

Análisis estadístico del Punto 2 (Casa Sra. Carmen)

Tabla 66. Prueba de Shapiro-Wilk.

Prueba de Shapiro-Wilk	W	0.93712
	p-value	0.3826

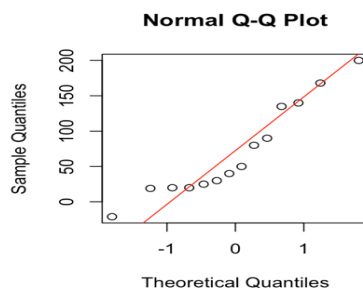


Tabla 67. Análisis estadístico t.

T de Student	Estadístico t	4.1398
	P-value	0.001163
	Intervalo de confianza (95%)	44.6-142.1
	Media de la diferencia	93.36

12.4 Anexo 4

Figura 28. Interacción de los materiales con el agua.

