

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

“Caracterización y evaluación de cubiertas plásticas experimentales de invernadero”

Mención: Hortofruticultura
y Jardinería

Modalidad: Técnico-experimental

Curso 2019/2020

Alumno/a:

Jesús Antonio Rodríguez Arroyo

Director/es:

María Teresa Lao Arenas
Juan Antonio Murcia Alhama



AGRADECIMIENTOS

A mi familia y seres queridos, en especial a mis padres, por haberme dado los valores que han hecho ser quien soy y enseñarme que todo en la vida es posible mediante esfuerzo y dedicación. Dedico este logro a mi pareja Edna la cual me incentivó a comenzar este camino y me ha acompañado hasta el final, dándome su apoyo en los buenos y malos momentos.

A la Dra. María Teresa Lao Arenas, directora de este proyecto por haberme dado la oportunidad de trabajar junto a ella y haber sido mi guía durante la redacción de este trabajo y a Juan Antonio Murcia Alhama, codirector del proyecto, por prestarme su ayuda.

A todos mis amigos que creyeron en mí, en especial a Mahoney por su compañía incondicional en los momentos de mayor soledad.

Gracias a todos los que, de una forma u otra, me habéis ayudado a ser lo que hoy soy.

RESUMEN

Gran parte de la producción hortofrutícola y ornamental en Almería, así como en otras regiones de España y del mundo, se desarrolla dentro de modelos agrícolas intensivos tanto convencionales como ecológicos, que a su vez se desenvuelven bajo la denominada “agricultura bajo plástico”. Este tipo de agricultura tiene como protagonista principal a la cubierta plástica que, al ser instalada en un invernadero, modifica los parámetros ambientales: radiación solar, temperatura, humedad, viento etc. Con las cubiertas se consiguen mejorar los rendimientos de los cultivos tanto en el aspecto cuantitativo como cualitativo. No obstante, existen ocasiones en las que estas por sí solas no consiguen los efectos positivos esperados, pudiendo llegar a ser contraproducentes como ocurre, por ejemplo, en zonas cálidas donde las épocas del año con altos niveles de irradiancia provocan temperaturas excesivas en el interior de los invernaderos. Por otro lado, las cubiertas deben ser resistentes a la par que flexibles para así poder evitar roturas en el momento de su instalación y resistir a lo largo del tiempo los esfuerzos que sobre ellas actúan y que merman su vida útil y prestaciones.

Por ello es de especial interés estudiar y conocer el comportamiento de las cubiertas plásticas existentes en el mercado, así como nuevos modelos experimentales que ayuden a seguir mejorando sus propiedades, y que repercutan en beneficios para los cultivos, así como para el agricultor y la industria de este sector.

En este proyecto donde han intervenido tanto la Universidad de Almería como la empresa fabricante de plásticos PLASTIMER-MACRESUR S.L. se analizaron desde el punto de vista óptico y mecánico cuatro cubiertas plásticas experimentales (CPEs) con diferentes composiciones y espesores, determinando algunas de sus propiedades ópticas como son: transmitancia, reflectancia, absorbanza y difusión de luz en la región espectral comprendida entre los 350nm y los 1.100nm; así como mecánicas: resistencia a rotura por impacto y deformación ante esfuerzos axiales. Posteriormente se realizó una evaluación de estas cubiertas en el exterior viendo su efecto sobre distintos factores climáticos, tales como la temperatura, humedad y radiación fotosintéticamente activa (PAR).

Como conclusión, en este trabajo se pone de manifiesto cómo pequeñas variaciones en la composición de cada una de las CPEs afectan a sus propiedades ópticas en las distintas regiones espectrales y como éstas a su vez influyen de manera directa en los factores climáticos. Además, queda reflejado cómo mecánicamente todas las CPEs muestran un comportamiento blando y tenaz y, a su vez, responden a las exigencias de los materiales dúctiles con punto de fluencia.

ABSTRACT

Much of the horticultural and ornamental production in Almería, as well as in other regions of Spain and the world, takes place within intensive agricultural models, both conventional and ecological, which in turn operate under the so-called "agriculture under plastic", what it means, the main protagonist is the plastic cover, which, when installed in a greenhouse, modifies environmental variables such as solar radiation, temperature, humidity, wind, etc. Due to this fact, it is possible to improve the quantitative and qualitative efficiency on the crop yield. However, sometimes these same covers don't achieve the expected results by themselves and may become counterproductive. As it happens in warm areas, where high level irradiance seasons cause excessive temperatures inside of the greenhouses. On the other hand, the plastic covers must be resistant and flexible, in order to avoid breaks during their installation, as well as once they are placed, resist the pressures on them, avoiding breaks that would reduce their useful life and efficiency.

For this reason, currently, there is a special interest about researching and learning on the behavior of plastic covers market, including new experimental models that help to continue improving their properties, that stand out in a positive way on the crops, even for the agriculturist and agriculture industry.

In this project has taken part the University of Almería and the plastics manufacturing company PLASTIMER-MACRESUR S.L. Four experimental plastic covers (CPEs) with different compositions and thicknesses have been analyzed from the optical and mechanical point of view, determining some of their optical properties such as: transmittance, reflectance, absorbance and light diffusion in the spectral region between 350nm and the 1.100nm, as well as mechanical: resistance to breakage by impact and deformation in the face of axial stresses, to later evaluate them abroad seeing their effect on different climatic factors, such as temperature, humidity and photosynthetically active radiation (PAR).

As a conclusion, this work shows how small variations in the composition of the CPEs affect their optical properties in the different spectral regions and how these in turn directly influence climatic factors. In addition, it is reflected how mechanically all the CPEs show a soft and tenacious behavior, and in turn respond to the requirements of ductile materials with a yield point.

ÍNDICE GENERAL

1. MEMORIA DESCRIPTIVA	16
1.1 INTRODUCCIÓN.....	16
1.2 SITUACIÓN ACTUAL.....	17
1.2.1 Interés e importancia	17
1.2.2 Superficie agrícola invernada	18
1.3 OBJETIVOS.....	21
2. FASES Y DESARROLLO	22
2.1 REALIZACIÓN DE ACTIVIDADES.....	22
2.2 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	25
3. COMPETENCIAS INTEGRADAS EN EL PROYECTO	26
4. ESPECIFICACIONES Y REQUERIMIENTOS TÉCNICOS DE LAS CUBIERTAS PLÁSTICAS PARA INVERNADEROS.	27
4.1 MATERIALES PLÁSTICOS	27
4.1.1 Introducción	27
4.1.2 Polietilenos (PE).....	29
4.1.3 Aditivos	31
4.1.4 Fabricación.....	33
4.2 PROPIEDADES RADIOMETRICAS: ÓPTICAS Y TÉRMICAS.....	36
4.2.1 Transmisión, reflexión y absorción.....	36
4.2.2 Difusión.....	37
4.2.3 Termicidad	38
4.3 PROPIEDADES MECÁNICAS	40
4.3.1 Resistencia a la tensión	40
4.3.2 Resistencia al impacto	40
4.4 INFLUENCIA SOBRE FACTORES AMBIENTALES	41
4.4.1 Radiación e Irradiación solar	41
4.4.2 Temperatura	45
4.4.3 Humedad relativa	46
5. ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO	47
5.1 SITUACIÓN Y LOCALIZACIÓN.....	47
5.2 CLIMA.....	47
5.3 MATERIAL.....	51

5.4	INSTRUMENTOS Y MÉTODOS	52
5.4.1	Determinación de propiedades ópticas	52
5.4.2	Determinación de propiedades mecánicas	54
5.4.3	Evaluación de factores ambientales en campo.....	57
5.5	PROCESADO Y ANÁLISIS DE DATOS	58
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	59
6.1	PROPIEDADES ÓPTICAS.....	59
6.2	PROPIEDADES MECÁNICAS	71
6.2.1	Ensayo de tracción.....	71
6.2.2	Ensayo de impacto al dardo	75
6.3	EVALUACIÓN DE FACTORES AMBIENTALES EN CAMPO.....	78
6.3.1	Radiación fotosintéticamente activa (PAR).....	78
6.3.2	Temperatura	80
6.3.3	Humedad relativa	82
6.4	Relaciones entre distintos parámetros.....	84
6.4.1	Relación tensión-deformación	84
6.4.2	Relación temperatura-humedad relativa	89
6.4.3	Relación radiación PAR-temperatura-hora solar.	92
7.	CONCLUSIONES.....	97
8.	RECOMENDACIONES	98
9.	BIBLIOGRAFÍA	99
10.	ANEXOS	106

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Distribución mundial de superficie invernada.....	18
Gráfica 2. Distribución de superficie invernada por países.....	19
Gráfica 3. Distribución nacional por comunidades de superficie invernada.....	20
Gráfica 4. Distribución de superficie invernada en el litoral Andaluz.....	20
Gráfica 5. Representación de temperaturas y precipitaciones medias mensuales, así como de días calurosos y noches frías.....	48
Gráfica 6. Representación mensual de los días de sol. Los días con menos del 20% de cubierta de nubes se consideran como soleados, entre 20-80% de cubierta de nubes como parcialmente nublado y más del 80% como nublado.....	48
Gráfica 7. Representación mensual de irradiación solar en Almería.....	49
Gráfica 8. Comportamiento óptico de la CPE ₁ . Los valores de la cara interna solapan a los de la cara externa.....	59
Gráfica 9. Comportamiento óptico de la CPE ₂ . Los valores de la cara interna solapan a los de la cara externa.....	61
Gráfica 10. Comportamiento óptico de la CPE ₃ . Los valores de la cara interna solapan a los de la cara externa en la reflectancia y absorbancia, pero no en la transmitancia....	63
Gráfica 11. Comportamiento óptico de la CPE ₄ . Los valores de la cara interna solapan a los de la cara externa.....	65
Gráfica 12. Transmitancia de las CPEs en sus caras externas.....	67
Gráfica 13. Curvas comparativas tensión-deformación de las CPEs (D.T). Obtenidas cada una de la media de las 5 probetas analizadas por cubierta.....	71
Gráfica 14. Curvas comparativas tensión-deformación de las CPEs (D.L). Obtenidas cada una de la media de las 5 probetas analizadas por cubierta.....	72
Gráfica 15. Comportamiento de la CPE ₁ al impacto.....	76
Gráfica 16. Comportamiento de la CPE ₂ al impacto.....	76
Gráfica 17. Comportamiento de la CPE ₃ al impacto.....	77
Gráfica 18. Comportamiento de la CPE ₄ al impacto.....	77
Gráfica 19. Radiación PAR incidente del exterior y la transmitida a través de las CPEs, medidas el día 25 de septiembre del 2019 entre las 6:00 h y 18:00 h (hora solar).....	78
Gráfica 20. Promedio de temperatura (°C) media mensual.....	80

Gráfica 21. Promedio de temperatura (°C) mínima mensual.....	81
Gráfica 22. Promedio de temperatura (°C) máxima mensual.....	81
Gráfica 23. Promedio de humedad relativa (%) media mensual.....	82
Gráfica 24. Promedio de humedad relativa (%) mínima mensual.....	82
Gráfica 25. Promedio de humedad relativa (%) máxima mensual.....	83
Gráfica 26. Regresión lineal de la CPE ₁ (D.L). Media de las 5 probetas analizadas.....	84
Gráfica 27. Regresión lineal de la CPE ₁ (D.T). Media de las 5 probetas analizadas.....	85
Gráfica 28. Regresión lineal de la CPE ₂ (D.L). Media de las 5 probetas analizadas.....	85
Gráfica 29. Regresión lineal de la CPE ₂ (D.T). Media de las 5 probetas analizadas.....	86
Gráfica 30. Regresión lineal de la CPE ₃ (D.L). Media de las 5 probetas analizadas.....	86
Gráfica 31. Regresión lineal de la CPE ₃ (D.T). Media de las 5 probetas analizadas.....	87
Gráfica 32. Regresión lineal de la CPE ₄ (D.L). Media de las 5 probetas analizadas.....	87
Gráfica 33. Regresión lineal de la CPE ₄ (D.T). Media de las 5 probetas analizadas.....	88
Gráfica 34. Regresión lineal entre la temperatura y humedad relativa registrada en el exterior durante las 24 horas del día 25 de septiembre de 2019.....	89
Gráfica 35. Regresión lineal entre la temperatura y humedad relativa registrada en el interior del CPE ₁ durante las 24 horas del día 25 de septiembre de 2019.....	90
Gráfica 36. Regresión lineal entre la temperatura y humedad relativa registrada en el interior del CPE ₂ durante las 24 horas del día 25 de septiembre de 2019.....	90
Gráfica 37. Regresión lineal entre la temperatura y humedad relativa registrada en el interior del CPE ₃ durante las 24 horas del día 25 de septiembre de 2019.....	91
Gráfica 38. Regresión lineal entre la temperatura y humedad relativa registrada en el interior del CPE ₄ durante las 24 horas del día 25 de septiembre de 2019.....	91
Gráfica 39. Radiación PAR incidente ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Izq. Temperatura (°C). Drcha. Exterior.....	92
Gráfica 40. Radiación PAR incidente ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Izq. Temperatura (°C). Drcha. CPE ₁	93
Gráfica 41. Radiación PAR incidente ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Izq. Temperatura (°C). Drcha. CPE ₂	94
Gráfica 42. Radiación PAR incidente ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Izq. Temperatura (°C). Drcha. CPE ₃	95

Gráfica 43. Radiación PAR incidente ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Izq. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$). Drcha. CPE ₄	96
Gráfica 44. Curva tensión-deformación de la probeta nº1 CPE 1 (D.T).....	106
Gráfica 45. Curva tensión-deformación de la probeta nº2 CPE ₁ (D.T).....	106
Gráfica 46. Curva tensión-deformación de la probeta nº3 CPE ₁ (D.T).....	107
Gráfica 47. Curva tensión-deformación de la probeta nº4 CPE ₁ (D.T).....	107
Gráfica 48. Curva tensión-deformación de la probeta nº5 CPE ₁ (D.T).....	107
Gráfica 49. Curva tensión-deformación de la probeta nº1 CPE ₁ (D.L).....	108
Gráfica 50. Curva tensión-deformación de la probeta nº2 CPE ₁ (D.L).....	108
Gráfica 51. Curva tensión-deformación de la probeta nº3 CPE ₁ (D.L).....	109
Gráfica 52. Curva tensión-deformación de la probeta nº4 CPE ₁ (D.L).....	109
Gráfica 53. Curva tensión-deformación de la probeta nº5 CPE ₁ (D.L).....	109
Gráfica 54. Curva tensión-deformación de la probeta nº1 CPE ₂ (D.T).....	110
Gráfica 55. Curva tensión-deformación de la probeta nº2 CPE ₂ (D.T).....	110
Gráfica 56. Curva tensión-deformación de la probeta nº3 CPE ₂ (D.T).....	111
Gráfica 57. Curva tensión-deformación de la probeta nº4 CPE ₂ (D.T).....	111
Gráfica 58. Curva tensión-deformación de la probeta nº5 CPE ₂ (D.T).....	111
Gráfica 59. Curva tensión-deformación de la probeta nº1 CPE ₂ (D.L).....	112
Gráfica 60. Curva tensión-deformación de la probeta nº2 CPE ₂ (D.L).....	112
Gráfica 61. Curva tensión-deformación de la probeta nº3 CPE ₂ (D.L).....	113
Gráfica 62. Curva tensión-deformación de la probeta nº4 CPE ₂ (D.L).....	113
Gráfica 63. Curva tensión-deformación de la probeta nº5 CPE ₂ (D.L).....	113
Gráfica 64. Curva tensión-deformación de la probeta nº1 CPE ₃ (D.T).....	114
Gráfica 65. Curva tensión-deformación de la probeta nº2 CPE ₃ (D.T).....	114
Gráfica 66. Curva tensión-deformación de la probeta nº3 CPE ₃ (D.T).....	115
Gráfica 67. Curva tensión-deformación de la probeta nº4 CPE ₃ (D.T).....	115
Gráfica 68. Curva tensión-deformación de la probeta nº5 CPE ₃ (D.T).....	115
Gráfica 69. Curva tensión-deformación de la probeta nº1 CPE ₃ (D.L).....	116

Gráfica 70. Curva tensión-deformación de la probeta nº2 CPE ₃ (D.L).....	116
Gráfica 71. Curva tensión-deformación de la probeta nº3 CPE ₃ (D.L).....	117
Gráfica 72. Curva tensión-deformación de la probeta nº4 CPE ₃ (D.L).....	117
Gráfica 73. Curva tensión-deformación de la probeta nº5 CPE ₃ (D.L).....	117
Gráfica 74. Curva tensión-deformación de la probeta nº1 CPE ₄ (D.T).....	118
Gráfica 75. Curva tensión-deformación de la probeta nº2 CPE ₄ (D.T).....	118
Gráfica 76. Curva tensión-deformación de la probeta nº3 CPE ₄ (D.T).....	119
Gráfica 77. Curva tensión-deformación de la probeta nº4 CPE ₄ (D.T).....	119
Gráfica 78. Curva tensión-deformación de la probeta nº5 CPE ₄ (D.T).....	119
Gráfica 79. Curva tensión-deformación de la probeta nº1 CPE ₄ (D.L).....	120
Gráfica 80. Curva tensión-deformación de la probeta nº2 CPE ₄ (D.L).....	120
Gráfica 81. Curva tensión-deformación de la probeta nº3 CPE ₄ (D.L).....	121
Gráfica 82. Curva tensión-deformación de la probeta nº4 CPE ₄ (D.L).....	121
Gráfica 83. Curva tensión-deformación de la probeta nº5 CPE ₄ (D.L).....	121
Gráfica 84. Temperatura (°C) media diaria registrada en el interior de cada invernadero y en el exterior.....	122
Gráfica 85. Temperatura (°C) mínima diaria registrada en el interior de cada invernadero y en el exterior.....	123
Gráfica 86. Temperatura (°C) máxima diaria registrada en el interior de cada invernadero y en el exterior.....	124
Gráfica 87. Humedad relativa (%) media diaria registrada en el interior de cada invernadero y en el exterior.....	125
Gráfica 88. Humedad relativa (%) mínima diaria registrada en el interior de cada invernadero y en el exterior.....	126
Gráfica 89. Humedad relativa (%) máxima diaria registrada en el interior de cada invernadero y en el exterior.....	127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fases de realización del TFG.....	22
Tabla 2. Cronograma temporal del TFG.....	25
Tabla 3. Peso y densidad de los principales materiales usados en cubiertas de invernadero.....	28
Tabla 4. Valores de densidad.....	29
Tabla 5. Coeficiente de pérdidas térmicas de materiales en cubierta simple y doble, en condiciones de cielo despejado.....	39
Tabla 6. Temperaturas y Precipitaciones medias históricas de Almería.....	49
Tabla 7. Zonas climáticas de Lang.....	49
Tabla 8. Zonas climáticas de Martonne.....	50
Tabla 9. Valores porcentuales promedio de reflectancia, transmitancia y absorbanza en las regiones espectrales UV-A, PAR y NIR en ambas caras de la CPE ₁	60
Tabla 10. Valores porcentuales promedio de reflectancia, transmitancia y absorbanza en las regiones espectrales AZUL, ROJO Y ROJO LEJANO en ambas caras de la CPE ₁	60
Tabla 11. Valores porcentuales promedio de reflectancia, transmitancia y absorbanza en las regiones espectrales UV-A, PAR y NIR en ambas caras de la CPE ₂	62
Tabla 12. Valores porcentuales promedio de reflectancia, transmitancia y absorbanza en las regiones espectrales AZUL, ROJO Y ROJO LEJANO en ambas caras de la CPE ₂	62
Tabla 13. Valores porcentuales promedio de reflectancia, transmitancia y absorbanza en las regiones espectrales UV-A, PAR y NIR en ambas caras de la CPE ₃	64
Tabla 14. Valores porcentuales promedio de reflectancia, transmitancia y absorbanza en las regiones espectrales AZUL, ROJO Y ROJO LEJANO en ambas caras de la CPE ₃	64
Tabla 15. Valores porcentuales promedio de reflectancia, transmitancia y absorbanza en las regiones espectrales UV-A, PAR y NIR en ambas caras de la CPE ₄	66
Tabla 16. Valores porcentuales promedio de reflectancia, transmitancia y absorbanza en las regiones espectrales AZUL, ROJO Y ROJO LEJANO en ambas caras de la CPE ₄	66
Tabla 17. Valores porcentuales promedio de la transmitancia en las regiones espectrales UV-A, PAR y NIR en las caras externas de las CPEs.....	68
Tabla 18. Valores porcentuales promedio de la transmitancia en las regiones espectrales AZUL, ROJO Y ROJO LEJANO en las caras externas de las CPEs.....	69

Tabla 19. Valores promedio de la relación existente entre diferentes regiones espectrales en las caras externas de las CPEs.....	69
Tabla 20. Valores porcentuales promedio de difusión de luz de las CPEs.....	70
Tabla 21. Valores obtenidos de las curvas tensión-deformación de las CPEs (D.T). Obtenidos de la media de las 5 probetas analizadas por cubierta.....	72
Tabla 22. Valores obtenidos de las curvas tensión-deformación de las CPEs (D.L). Obtenido de la media de las 5 probetas analizadas por cubierta.....	73
Tabla 23. Valores reales de las tensiones y deformaciones máximas y de rotura en las CPEs (D.T). Obtenido del promedio de las 5 probetas analizadas por cubierta.....	74
Tabla 24. Valores de los parámetros evaluados en las CPEs (D.L). Obtenido del promedio de las 5 probetas analizadas por cubierta.....	74
Tabla 25. Espesores medios reales y resistencia al impacto de las CPEs.....	75
Tabla 26. Valores promedio de la radiación PAR que se transmite a través las CPEs instaladas en los invernaderos, y su relación porcentual con la radiación PAR incidente del exterior (1394,56 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Medidas el día 25 de septiembre del 2019 entre las 6:00 h y 18:00 h (hora solar).....	79
Tabla 27. Valores promedio de la radiación PAR que se transmite a través las CPEs instaladas en los invernaderos y su relación porcentual con la radiación PAR incidente del exterior (1671,09 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) a las 12 hora solar. Medidas acumulativas en un periodo de 48 días, comprendido entre el 2 de septiembre de 2019 y terminó el 15 de noviembre de 2019.....	79
Tabla 28. Diferencia de temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) promedio registradas en el interior de cada invernadero respecto al exterior.....	81
Tabla 29. Diferencia de H.R (%) promedio registradas en el interior de cada invernadero respecto al exterior.....	83
Tabla 30. Análisis de varianza de regresión múltiple en el exterior.....	92
Tabla 31. Análisis de varianza de regresión múltiple en la CPE ₁	93
Tabla 32. Análisis de varianza de regresión múltiple en la CPE ₂	94
Tabla 33. Análisis de varianza de regresión múltiple en la CPE ₃	95
Tabla 34. Análisis de varianza de regresión múltiple en la CPE ₄	96

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Estructura química y reacción general de polimerización en PE.....	27
Imagen 2. Estructura esquemática del LDPE.....	29
Imagen 3. Estructura esquemática del LLDPE.....	30
Imagen 4. Estructura esquemática del mLLDPE.....	30
Imagen 5. Estructura química del co-polimero EBA.....	31
Imagen 6. Partes de una extrusora.....	34
Imagen 7. Partes de un equipo utilizado para la fabricación de cubiertas plásticas: 1. Extrusoras, 2. Cabezal; 3. Anillo de enfriamiento; 4. Rodillos guía; 5. Cortinas de cierre; 6. Sist. de jalado (calandra); 7. Bobinador y 8. Panel de mando y control.....	34
Imagen 8. Interacción de la luz solar al incidir sobre un vidrio verde.....	36
Imagen 9. Comportamiento de la radiación solar al incidir en una cubierta.....	37
Imagen 10. Difusión de la luz solar al atravesar una cubierta plástica.....	37
Imagen 11. Representación del efecto térmico en un invernadero.....	38
Imagen 12. Espectro electromagnético de la luz solar. Unidades de medida expresadas en nm y μm	41
Imagen 13. Situación y valores de las radiaciones ultravioleta en el espectro electromagnético. Unidades de medida expresadas en m y nm.....	41
Imagen 14. Mapa de Irradiación directa normal en España. Unidades de medida expresadas en Kw h m^{-2}	42
Imagen 15. Absorción de luz en plantas en distintas longitudes de onda para distintos pigmentos fotosintéticos.....	44
Imagen 16. De izq. a drcha. CPEs 1,2,3 y 4 colocadas en invernaderos piloto.....	51
Imagen 17. Partes del espectroradiómetro.....	52
Imagen 18. Equipo de adquisición de datos.....	52
Imagen 19. Espectrofotómetro SHIMADZU UV-2401PC.....	53
Imagen 20. Dinamómetro METROTEC HOUNSFIELD.....	54
Imagen 21. Dimensiones de la probeta utilizada.....	55
Imagen 22. Impactómetro CEAST L-5.....	55

Imágenes 23 y 24. Sensor enumerado HOBO SHUTTLE (modelo H 08-004-02). Izq. Situación de este en el interior de caja de corcho. Drcha.....	57
Imagen 25. Sensor DELTA OHM para la medida de radiación PAR.....	58

1. MEMORIA DESCRIPTIVA

1.1 INTRODUCCIÓN

Entre todos los factores que afectan al desarrollo las plantas, los ambientales pueden ser modificados mediante el uso de invernaderos con cubiertas plásticas. En ellos se modifican parámetros como la radiación solar, temperatura, humedad, viento etc, pudiendo crear entornos más idóneos para los cultivos (González, 2010). Hoy en día gran parte de los modelos de agricultura intensiva convencional y ecológica se engloban y desarrollan dentro de la denominada “agricultura bajo plástico”, la cual ha permitido aumentar notablemente el rendimiento productivo y la calidad de los cultivos hortícolas y ornamentales (Orden *et al.*, 2000).

La diversidad de climas, microclimas y los requerimientos específicos de cada cultivo hacen que no exista una única cubierta capaz de cubrir todas estas necesidades por igual, por ello la industria del plástico viene desarrollando desde hace varias décadas multitud de componentes y materiales con los que poder fabricar distintas cubiertas que satisfagan las necesidades tanto del agricultor como del cultivo (Palma, 2009).

El uso de materiales plásticos en la agricultura intensiva no solo se limita a la confección de cubiertas, sino que se extiende por otras áreas del sector. Tanto es así, que se ha llegado a acuñar el término de plasticultura, para hacer referencia a la aplicación de los plásticos a las diversas prácticas agrícolas (García, 1995).

1.2 SITUACIÓN ACTUAL

1.2.1 Interés e importancia

Hoy en día existe una búsqueda continua de mejoras tecnológicas en las cubiertas plásticas, que, aparte de satisfacer las demandas de los agricultores, también permitan hacer frente a los retos a los que actualmente se enfrenta la agricultura.

Aumentar en un futuro los niveles de producción en todo el mundo será sin duda uno de ellos, ya que según la FAO (2009), se calcula que entre los años 2009 y 2050 la población mundial aumentará hasta 9.700 millones de personas. Otro reto al que hacer frente es el de reducir los impactos ambientales generados, bien sea por la propia explotación de las materias primas (proveniente de la industria petroquímica) o por la gestión del residuo generado una vez que las cubiertas pierden sus cualidades. Para ello existen líneas de investigación que trabajan en la creación de plásticos más respetuosos con el medio ambiente, cuya composición principal sea a base de polímeros naturales procedentes del almidón de maíz, patata etc. (González, 2003). Otros estudios se centran en caracterizar y aislar determinados organismos (bacterias y hongos) que tengan la habilidad de degradar los polímeros que forman los plásticos (Mahdiyah *et al.*, 2013).

Observando por tanto el panorama actual, es necesario entre otras cosas, realizar estudios comparativos entre diferentes tipos de cubiertas, que pongan de manifiesto sus propiedades, así como su influencia en los factores ambientales que posteriormente afectarán a los cultivos.

La diversidad de materiales usados en la composición de una cubierta plástica hace que las propiedades espectrales entre unas y otras difieran significativamente, dando lugar a distintos patrones de transmitancia en las diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético (Del Ángel-Hernández *et al.*, 2017). Según Waaijenberg (2006), mediante la variación de estos patrones se pueden conseguir resultados que repercutan en mejoras agronómicas. Entre ellos estarían:

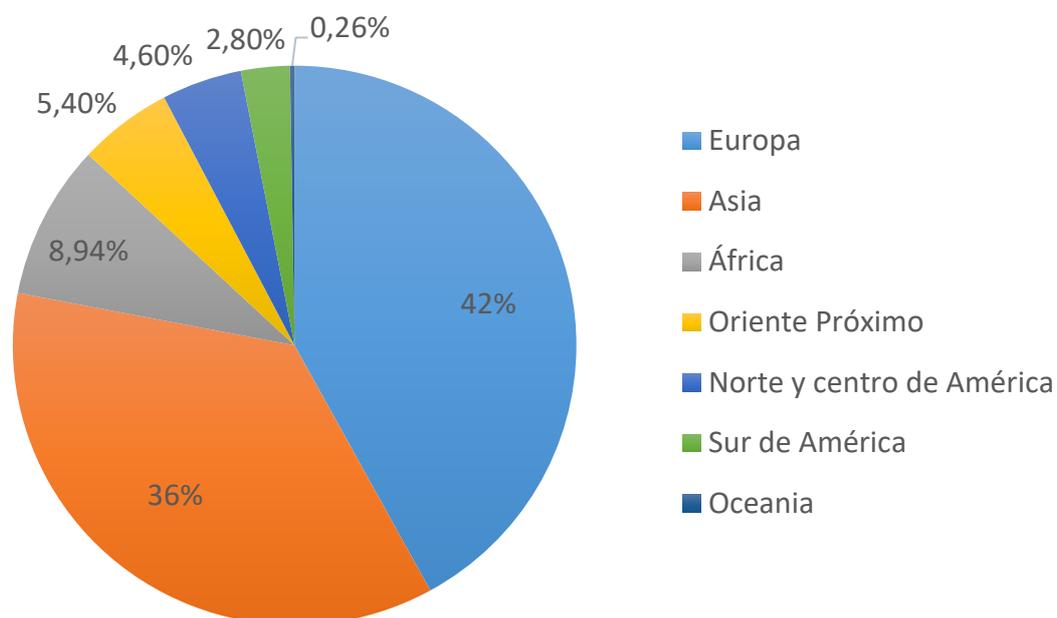
- Reducción de la temperatura en el interior de un invernadero, debido al calentamiento natural producido por la radiación solar, mediante el bloqueo de la radiación infrarroja cercana (NIR).
- Bloqueo de parte de la radiación ultravioleta (UVs), que limite la actividad de insectos dañinos para las plantas, así como para evitar quemaduras en ciertos cultivos ornamentales.
- Mejora del “efecto invernadero” a través del bloqueo de la transmisión de radiación térmica de onda larga hacia el exterior durante la noche.

De igual manera, la forma de combinar los distintos polímeros y aditivos en la fabricación de las cubiertas repercute directamente en las propiedades mecánicas, las cuales no influyen en los aspectos agronómicos, pero si están relacionadas intrínsecamente con la durabilidad y vida útil del producto (Díaz, 2000).

A continuación, para entender el impacto e importancia que supone actualmente la “agricultura bajo plástico”, se describen y muestran una serie de gráficos con las superficies agrícolas invernadas a nivel mundial y nacional.

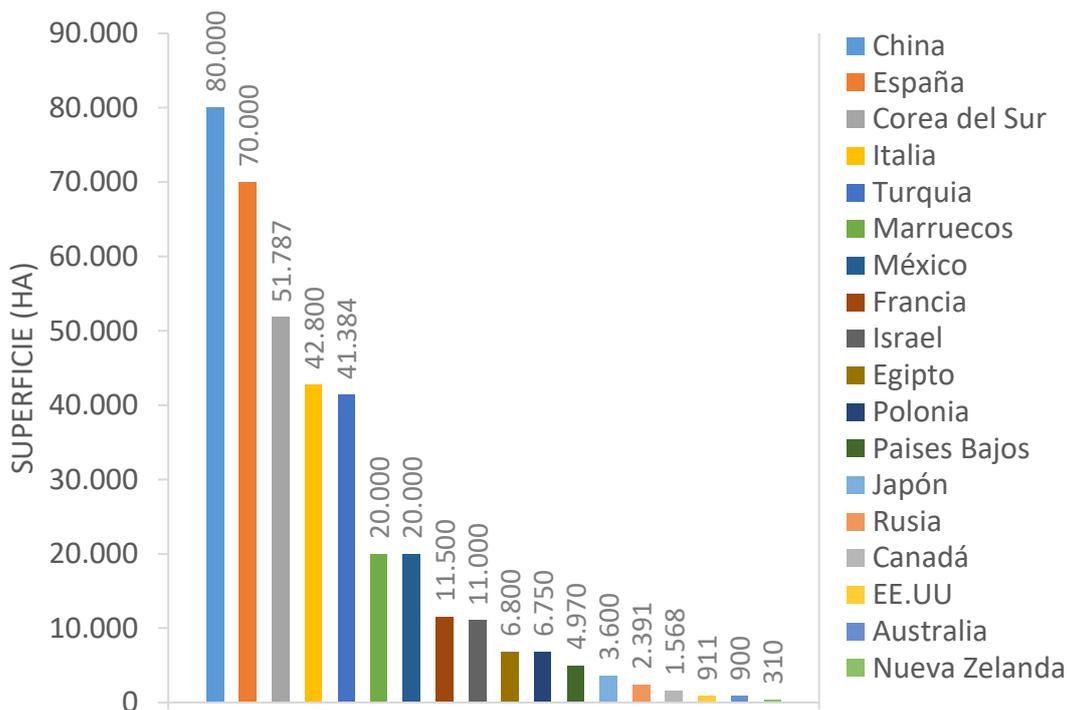
1.2.2 Superficie agrícola invernada

Según el mapa “World Vegetable Map 2018” realizado por la entidad financiera Rabobank, la superficie mundial actual de invernaderos se cifra en 500.000 ha, de las cuales el 8% son instalaciones con cobertura de cristal y el 92% restante son de cubiertas plásticas (gráfica 1). Toda esta superficie invernada se distribuye entre los distintos continentes de la siguiente forma:



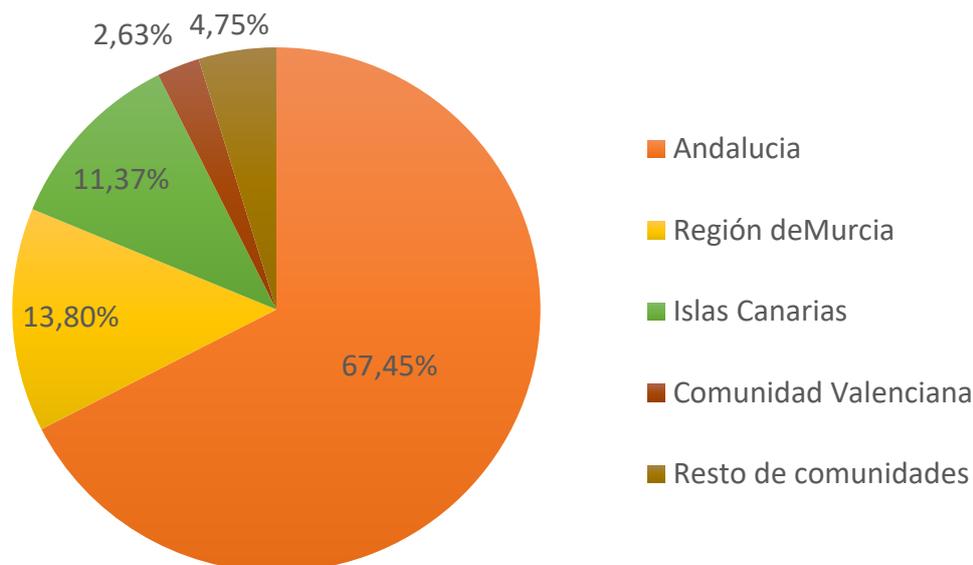
Gráfica 1. Distribución mundial de superficie invernada (Elaboración propia a partir de World Vegetable Map 2018).

Según este mismo mapa, si estudiamos la superficie invernada por países, nos encontramos: China, con 82.000 ha, y España, con 70.000 ha, ocupando los dos primeros puestos. En tercer lugar, con una tendencia al alza se situaría Corea del Sur, con 51.787 ha; Italia con tendencia a la baja ocuparía la cuarta posición con 42.800 ha y en quinta posición con tendencia al alza se encontraría Turquía, con 41.384 ha. A continuación, en el gráfico 2 se muestra la distribución de superficie invernada con los países más significativos de todos los continentes:



Grafica 2. Distribución de superficie invernada por países. (Elaboración propia a partir de World Vegetable Map 2018).

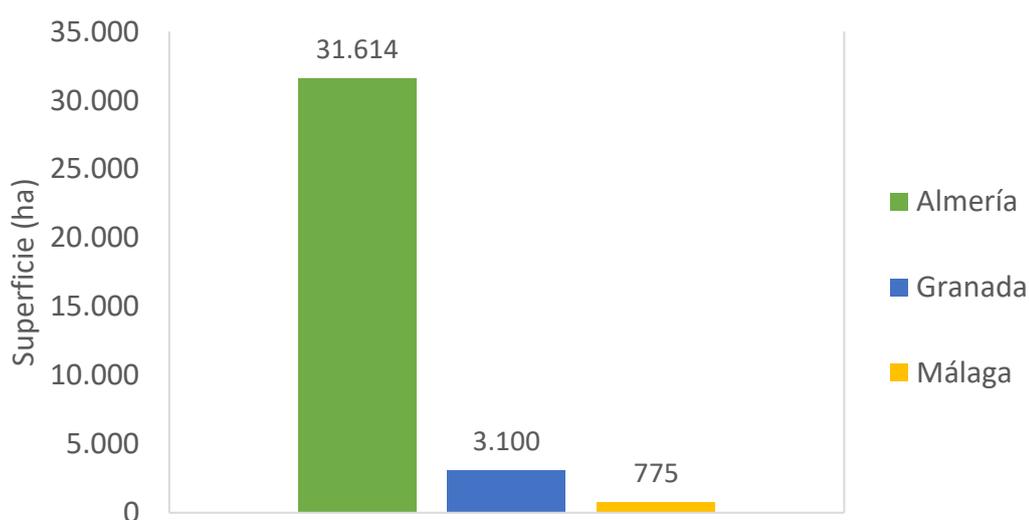
Si nos centramos a nivel nacional, según datos publicados por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (2008), España cuenta con una superficie invernada total de 65.989 ha*, de las cuales 44.500 ha se concentran en Andalucía, 9.100 ha en la Región de Murcia, 7.500 ha en las Islas Canarias, 1.735 ha en la Comunidad Valenciana y las 3.154 ha restantes repartida por todo el territorio español. A continuación, se muestra la gráfica 3 con la distribución de superficie en estas comunidades.



Grafica 3. Distribución nacional por comunidades de superficie invernada (Elaboración propia a partir de MARM 2008).

*Nótese que existe una diferencia de superficie (4.011 ha) respecto a la fuente anteriormente citada, esto se debe seguramente a que entre una toma de datos y otra existen 10 años de diferencia en los cuales España ha aumentado su superficie invernada.

Dentro de la comunidad autónoma de Andalucía, la mayor concentración de superficie invernada se encuentra en el litoral oriental: Málaga, Granada y Almería. Siendo su distribución la que se muestra en la gráfica 4.



Grafica 4. Distribución de superficie invernada en el litoral Andaluz. (Elaboración propia a partir de Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural. Junta de Andalucía, 2018).

1.3 OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo técnico ha sido la mejora de las condiciones microclimáticas en el interior de un invernadero a través del estudio de cuatro cubiertas plásticas experimentales (CPEs). Para ello, se proponen dos objetivos específicos:

- Caracterizar las CPEs desde el punto de vista óptico y mecánico.
- Evaluar dichas CPEs en condiciones de campo, viendo su influencia sobre factores ambientales como la temperatura, humedad relativa y la radiación fotosintéticamente activa (PAR).

2. FASES Y DESARROLLO

2.1 REALIZACIÓN DE ACTIVIDADES

La realización del presente trabajo fin de grado (TFG) se ha llevado a cabo siguiendo la planificación que se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Fases de realización del TFG.

ACTIVIDADES	DESCRIPCIÓN
Revisión bibliográfica, formación y aprendizaje	<p>Esta actividad comienza en mayo del 2019. Representa el inicio de la elaboración del TFG, manteniéndose constante a lo largo de todo el proceso.</p> <p>La consulta y obtención de información se ha realizado a través de dos medios:</p> <ol style="list-style-type: none">1. Los proporcionados por PLASTIMER-MACRESUR S.L, incluyen: bibliografía interna de la empresa, manuales, procedimientos y normas.2. Los obtenidos a través de bases de datos y páginas web como, por ejemplo: Scopus, Dialnet, Web of Science, Google Scholar y el repositorio institucional de la Universidad de Almería. Además de, páginas web del gobierno de España, Junta de Andalucía, FAO y otras páginas web relacionadas. <p>La formación ha corrido a cuenta de PLASTIMER-MACRESUR S.L y el aprendizaje ha sido consecuencia de todo lo acontecido y experimentado hasta el final del camino.</p>
Redacción y entrega de anteproyecto	<p>Se ha realizado en la plantilla oficial establecida y proporcionada por la Escuela Superior de Ingeniería. La cual ha presentado la siguiente estructura:</p> <ol style="list-style-type: none">1. Introducción.2. Objetivos.3. Documentos del TFG.4. Fases de desarrollo.5. Metodología.6. Competencias integradas en el proyecto.7. Referencias bibliográficas.

	<p>El mismo se hace entrega de manera telemática a través de plataforma virtual el día 1 de noviembre de 2019, siendo rechazado hasta en dos ocasiones por motivos de estructura y forma. Tras su revisión y modificación la comisión evaluadora acepta el anteproyecto el día 4 de febrero de 2020.</p>
<p>Montaje de ensayo experimental</p>	<p>Se inicia en agosto del 2019 con el estudio y selección de cuatro cubiertas plásticas experimentales objeto de ensayo. Durante este mes y el siguiente se realizan análisis y ensayos para caracterizarlas desde un punto de vista óptico y mecánico. A principios de septiembre son enumeradas e instaladas en cuatro invernaderos piloto de 3 m² de superficie con una altura en cumbre de 2,5 m. Para la medición de temperatura (°C) y humedad relativa (%) se colocaron sensores tanto en el interior de cada uno de los invernaderos como en el exterior, los cuales realizaron registros automáticos y continuos (cada hora) de tales parámetros. Para la radiación PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) incidente tanto en el exterior como en el interior de cada invernadero se utilizó un sensor manual el cual se situaba a una altura de 2m en dirección al sol.</p>
<p>Toma de datos</p>	<p>Para cada una de las cubiertas experimentales se tomaron los siguientes datos en laboratorio:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Porcentajes de transmitancia, reflectancia y absorbancia en las regiones espectrales comprendidas entre los 300nm y los 1100nm, mediante espectroradiómetro LICOR 1800. • Porcentaje de difusión, mediante espectrofotómetro SHIMADZU UV-2401PC. • Resistencia a esfuerzo (MPa) y porcentaje de deformación, ante un ensayo a tracción, realizado con dinamómetro METROTEC. • Peso soportado (gr) previo a la rotura, ante un ensayo de impacto al dardo, realizado con impactómetro CEAST L-5. <p>Con las cubiertas ya instaladas en cada uno de los invernaderos se registraron en campo los siguientes datos, tanto en el interior como en el exterior:</p>

	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura (°C) y humedad relativa (%) continua (cada hora), mediante sensores HOBO SHUTTLE. • Radiación PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) incidente, medida cada día a las 12 horas solares mediante sensor DELTA OHM. También se efectuó con el mismo sensor una medición completa durante cada hora la mañana del 25 de septiembre de 2019.
Procesado y análisis de datos	Una vez obtenidos los datos, se procesaron, clasificaron y analizaron, mediante los programas informáticos Microsoft Excel y Statgraphic Centurión 18.
Redacción del TFG	Da comienzo en enero y se prolonga hasta su presentación en junio de 2020. Esta actividad ha supuesto un gran esfuerzo para conjuntar información, relacionar ideas, procesar datos y elaborar los resultados que han permitido alcanzar el objetivo propuesto.
Elaboración de resultados y discusión	Se han creado gráficos, diagramas y tablas con los resultados obtenidos de los análisis y ensayos realizados. Posteriormente se han explicado estos resultados y se han discutido contrastándolos con otros estudios anteriores.
Conclusiones y recomendaciones	Finalmente, se han extraído conclusiones sobre lo estudiado y planteado una serie de recomendaciones.
Revisión y entrega del TFG	La revisión de este trabajo se ha llevado a cabo con la ayuda de la directora María Teresa Lao Arenas, en la cual se han discutido y mejorado diversos aspectos del trabajo. Posteriormente una vez dado el visto bueno de la directora y el codirector, se entrega en formato digital a la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Almería.
Defensa pública del TFG	La defensa está regulada según los criterios del Art.5.4 de la Normativa General de TFGs de la UAL. Ésta se realiza por el estudiante mediante la exposición oral de su contenido de forma abreviada durante un tiempo comprendido entre 20 y 40 minutos. La fecha para la defensa vendrá dada entre el 10 de junio del 2020 y el 13 de julio del 2020.

2.2 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

A continuación, en la tabla 2, se muestra el cronograma temporal asociado a las fases de desarrollo seguidas durante el presente trabajo fin de grado (TFG).

Tabla 2. Cronograma temporal del TFG.

Actividades	My	Jn	Jl	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic	En	Feb	Mr	Ab	My	Jn
Revisión bibliográfica y formación	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Redacción del anteproyecto	X	X								X				
Montaje del ensayo experimental				X	X									
Toma de datos				X	X	X	X							
Procesado y análisis de datos						X	X	X	X					
Redacción del TFG									X	X	X	X	X	
Elaboración de resultados y discusión											X	X	X	
Conclusiones y recomendaciones												X	X	
Revisión y entrega del TFG												X	X	
Defensa pública del TFG														X

3. COMPETENCIAS INTEGRADAS EN EL PROYECTO

A continuación, se muestran las competencias adquiridas durante la elaboración y consecución de este TFG, con referencia a las que constan en las recogidas por la Universidad de Almería, así como su relación con los aspectos tratados en este trabajo experimental:

E-CB04. Conocimientos básicos de la química general, química orgánica e inorgánica y sus aplicaciones en la ingeniería.

Se encuentran relacionados directamente con la composición y estructura de las CPEs, la cual a su vez repercuten en las propiedades ópticas y mecánicas.

E-CB05. Comprensión y dominio de los conceptos básicos sobre las leyes generales de la mecánica, termodinámica, campos, y ondas y electromagnetismo y su aplicación para la resolución de problemas propios de la ingeniería.

Atañe a las propiedades ópticas y mecánicas estudiadas en las CPEs además de los factores ambientales evaluados.

E-CA02. Capacidad para conocer, comprender y utilizar los principios de: las bases de la producción vegetal, los sistemas de producción, de protección y de explotación.

La podemos observar en como las propiedades ópticas de una cubierta plástica modifican los factores ambientales que a su vez influyen en los cultivos.

E-CA10. Capacidad para conocer, comprender y utilizar los principios de: transferencia de tecnología, entender, interpretar, comunicar y adoptar los avances en el campo agrario.

Se ve reflejado en todo el transcurso del trabajo realizado, en donde se pone de manifiesto los avances de la plasticultura y su repercusión en el sector agrario.

CTH01. Capacidad para conocer, comprender y utilizar los principios de tecnología de la producción hortofrutícola: bases y tecnología de la propagación y producción hortícola, frutícola y ornamental. Control de calidad de productos hortofrutícolas. Comercialización. Genética y mejora vegetal.

La identificamos en la manera que tiene la producción hortofrutícola y ornamental intensiva de desarrollarse dentro de la denominada agricultura bajo plástico.

CTH02. Capacidad para conocer, comprender y utilizar los principios de Ingeniería de las áreas verdes, espacios deportivos y explotaciones hortofrutícolas: obra civil, instalaciones e infraestructuras de las zonas verdes y áreas protegidas. Electrificación, riegos y drenajes. Maquinaria para hortofruticultura y jardinería.

Se manifiesta a través del invernadero, cuya infraestructura es la encargada de dar soporte a las cubiertas plásticas, y en conjunto dar cabida a las explotaciones hortofrutícolas.

4. ESPECIFICACIONES Y REQUERIMIENTOS TÉCNICOS DE LAS CUBIERTAS PLÁSTICAS PARA INVERNADEROS.

4.1 MATERIALES PLÁSTICOS

4.1.1 Introducción

Los plásticos en general están formados por macromoléculas de elevado peso molecular llamadas polímeros, los cuales a su vez están constituidos por la unión de moléculas más pequeñas (monómeros) mediante un proceso de síntesis denominado polimerización. Los polímeros constituidos por un solo monómero se denominan homopolímeros, como por ejemplo el Polietileno (PE), mientras que, si están formados por dos o más tipos de monómeros se llaman copolímeros, como es el caso del Poli(etilen-vinil acetato) más conocido por sus iniciales como EVA (imagen 1). A estas cadenas poliméricas se le suman otros materiales denominados aditivos que en conjunto conforman el producto final del plástico (Castilla, 2004).

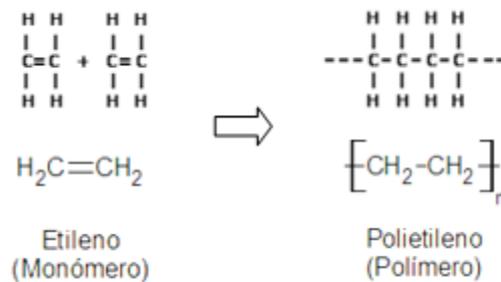


Imagen 1. Estructura química y reacción general de polimerización en PE (Godoy, 2007).

Según Escrig (2018), existen tres tipos de plásticos:

- Termoplásticos: son deformables, al aumentar su temperatura se reblandecen y funden, cuando este calor se extrae vuelven a su estado sólido. Al presentar una estructura más o menos lineal permite que puedan fluir en su estado fundido bajo presión.
- Termoestables: son duros y rígidos debido a su alto grado de reticulación. Al contrario que los termoplásticos son infusibles e insolubles, se queman antes de poder fundirse.

- Elastómeros: presentan comportamiento elástico y consistencia gomosa debido a su bajo grado de reticulación. Al igual que los termoestables son también insolubles.

A la hora de elegir el material que conformará la cobertura de un cultivo bajo invernadero, se deberá tener en cuenta que la cubierta constituye uno de los principales agentes modificadores del clima presente en la zona donde se vaya a situar el cultivo. Por ello la elección del material se basa en una serie de criterios y requisitos, los cuales ayuden al agricultor a elegir el que más se ajuste a sus necesidades y a las del cultivo (Martínez, 2008). Según Matallana y Montero (1995), estos criterios son:

- Respuesta agronómica debida al material empleado (precocidad, producción y calidad).
- Propiedades ópticas, térmicas y mecánicas del material de cubierta.
- Estructura del invernadero, anclaje o sujeción del plástico.

Según Martínez (2008) existen tres grupos diferenciados de materiales para cubierta:

- Vidrio impreso o catedral
- Plásticos rígidos, por ejemplo: polimetacrilato de metilo (PMM), policarbonato (PC), poliéster con fibra de vidrio (PRFV) y policloruro de vinilo (PVC).
- Plásticos flexibles, por ejemplo: policloruro de vinilo (PVC), polietileno de baja densidad (LDPE), etileno vinilo de acetato (EVA).

En la actualidad se han desarrollado otros polímeros como el acrilato de butilo (EBA) que, junto al EVA y el LDPE (todos ellos pertenecientes al grupo de los polietilenos) representan más del 80% del mercado mundial (COTEC, 2009). Esto se debe entre otras cosas a su menor precio que junto a la baja densidad y peso (tabla 3) en comparación con otros materiales (como por ejemplo el vidrio), constituyen una gran ventaja para el agricultor en cuanto a la compra, transporte, manipulación e instalación (Díaz, 2000).

Tabla 3. Peso y densidad de los principales materiales usados en cubiertas de invernadero (Díaz, 2000).

Material	Peso (gr cm ⁻²)	Densidad (gr cm ⁻³)
LDPE (para un espesor de 0,2mm)	0,184	0,915-0,930
EVA (para un espesor de 0,2mm)	0,185	0,93-0,95
Vidrio (para un espesor de 2,7mm)	6,5	2,4

Debido a que los polímeros más usados se encuentran dentro de la familia de los polietilenos (PE) y que las cubiertas plásticas experimentales objeto de este estudio

están formadas en su base principal por algunos de estos polímeros, pasaremos a describir algunos detalles de este gran grupo.

4.1.2 Polietilenos (PE)

Según Escrig (2018), son del tipo termoplástico y se dividen en tres subgrupos:

- Polietileno estándar: polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno de media densidad (MDPE), polietileno de alta densidad (HDPE) y polietileno lineal de baja densidad (LLDPE).
- Polietileno de alto rendimiento: polietileno de muy baja densidad (VLDPE) y polietileno lineal de baja densidad metalocénico (mLLDPE).
- Polietileno funcional y especialidades: etileno acrilato de etilo (EEA), etileno ácido acrílico (EAA), etileno acetato de vinilo (EVA) y etileno acrilato de butilo (EBA).

La clasificación en función a su densidad atiende a los valores presentados en la tabla 4.

Tabla 4. Valores de densidad (Splittstoesser y Brown, 1991).

Baja densidad (kg m^{-3})	Media densidad (kg m^{-3})	Alta densidad (kg m^{-3})
< de 930	De 930 a 940	> a 940

Para las cubiertas plásticas experimentales objeto de este estudio, así como para todos los cerramientos de invernadero se utilizan solamente aquellos que sean de baja densidad y alto peso molecular:

- LDPE: su estructura presenta gran cantidad de ramificaciones de una longitud de entre 2 a 8 átomos de carbono enlazados a la cadena principal (imagen 2). Posee baja resistencia a esfuerzos de tracción, pero buena resistencia al impacto (Escrig, 2018).



Imagen 2. Estructura esquemática del LDPE (Muñoz, 1999).

- LLDPE: las ramificaciones que se acoplan a la cadena principal son muy cortas y al contrario que el LDPE no presentan interconexiones con cadenas vecinas. Es muy flexible y tiene una gran capacidad de estiramiento además de buena resistencia química (imagen 3). Posee mayor resistencia al impacto que el LDPE. Sin embargo, su procesado resulta algo complicado debido a la baja sensibilidad que presenta frente a fuerzas de cizalla (Escrig, 2018).



Imagen 3. Estructura esquemática del LLDPE (Muñoz, 1999).

- mLLDPE: mientras que en el proceso de polimerización de los anteriores polímeros se utilizaba como catalizador el llamado Ziegler-Natta, en este caso se utilizan catalizadores metallocénicos (imagen 4). Recordad en este punto que un catalizador es aquel elemento que rige la reacción de síntesis en la polimerización. Define el proceso y la productividad del polímero, así como las propiedades intrínsecas del mismo. La principal ventaja de los catalizadores metallocénicos es la distribución homogénea de las cadenas moleculares poliméricas. Lo que provoca una mejora en las propiedades ópticas (mayor transparencia), mayor elasticidad, mayor velocidad de procesado (aumento de la producción en fábrica) así como un alto grado de reciclabilidad (conservación de propiedades) (Escrig, 2018).

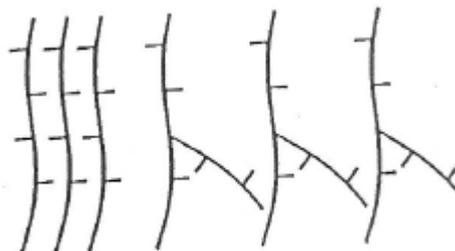


Imagen 4. Estructura esquemática del mLLDPE (Muñoz, 1999).

- EVA y EBA: estos dos co-polimeros destacan por su excelente procesabilidad y flexibilidad, además de presentar una gran compatibilidad con otros polímeros, aditivos y cargas (imagen 5). Son fáciles de procesar. Presentan una mayor flexibilidad y resistencia al impacto que el LDPE (Escrig, 2018).

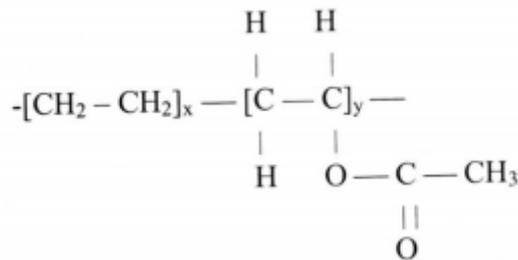


Imagen 5. Estructura química del co-polimero EBA (Almanza, 2001).

4.1.3 Aditivos

Los polietilenos que conforman la base principal de las cubiertas plásticas se degradan con el paso del tiempo cuando se exponen principalmente a factores climáticos: radiación ultravioleta, oxígeno, viento, lluvia, granizo etc. También se ven perjudicados por la exposición a productos fitosanitarios (químicos) e incluso por agentes biológicos. Todo ello acarrea una pérdida de sus propiedades radiométricas (ópticas y térmicas) y mecánicas (Florian y Bimbo, 1992). Para evitar esto, además de por la mejora en el proceso de fabricación de las cubiertas y poder otorgarle características agronómicas deseables se añaden los llamados aditivos. Según Ordaz (2007) se diferencian dos grupos de aditivos:

1. Aditivos de proceso: son aquellos que se emplean durante el transcurso de transformación y fabricación de las cubiertas plásticas. Por ejemplo:

- Plastificantes: actúan como separadores de las cadenas poliméricas reduciendo las atracciones intermoleculares. Esto provoca una mejora en la flexibilidad y extensibilidad de los propios polímeros. (Ordaz, 2007).
- Lubricantes: reducen la fricción entre las partículas. Por lo que retrasa la fusión de los polímeros y garantiza un buen flujo del material a través de las superficies de los equipos de fabricación (Ordaz, 2007).

- Estabilizadores térmicos: son antioxidantes que evitan la degradación térmica durante el proceso de fabricación (Ordaz, 2007).

- Ayudantes de proceso: mejoran en general la procesabilidad de los polímeros. Reducen principalmente defectos superficiales que se puedan ocasionar durante la fabricación (Ordaz, 2007).

- Deslizantes y antibloqueo: evitan que el plástico se pegue entre durante su fabricación y posterior bobinado (López, 2016).

2. Aditivos de aplicación: se añaden a los polímeros con la finalidad de otorgar a las cubiertas plásticas unas características agronómicas, radiométricas y mecánicas específicas. Por ejemplo:

- Estabilizadores UV tipo Níquel/Benzofenona: absorben las radiaciones UV y las disipan en otras formas de energía (calor), por lo que al incorporarlos a los polímeros se les protege principalmente de la fotodegradación (Godoy, 2007). Además, debido a la estructura níquelada que presentan, les otorgan a las cubiertas plásticas una gran resistencia a los productos fitosanitarios. Por contra, el color amarillo/verdoso del níquel puede provocar una reducción en la transmisión de luz (Ruiz *et al.*, 2004).

- Estabilizadores UV tipo HALS (Hindered Amine Light Stabilizers) son fotoprotectores más eficientes que los anteriores ya que estos no absorben radiaciones UV, en su lugar actúan captando los radicales libres provocados por la fotodegradación, lo que repercute directamente en la estabilidad térmica de los polímeros, además estos aditivos al ser incoloros permiten por lo general una mayor transmisión de luz (Martínez, 2008).

- Aditivos difusores: su función es la de difundir la radiación directa que llega a la cubierta, haciendo que la luz incidente se reparta más homogéneamente. Sin que por ello se vean afectados los niveles de transmisión global de la luz incidente (Martínez, 2008).

- Aditivos térmicos: les otorgan a las cubiertas un efecto termoaislante durante la noche, ya que al ser opacos a las radiaciones de onda larga (infrarroja), el calor desprendido dentro de un invernadero queda retenido en él (Espí *et al.*, 2002).

- Aditivos antitérmicos: impiden el paso de las radiaciones de onda corta, consiguiendo así un descenso de las temperaturas en el interior del invernadero. (González, 2010).
- Aditivos fotoselectivos: permiten manipular la calidad de la luz que incide en la cubierta mediante la selección y transformación de ciertas longitudes de onda en otras (Ordaz, 2007).
- Aditivos antigoteo: se añaden con la finalidad de evitar la condensación del agua en la cara interna de la cubierta, ya que cuando se acumula produce la caída de gotas sobre cultivo, propiciando así un ambiente favorable para la aparición de organismos patógenos. Además de provocar una reducción de la transmisión global de luz. Estos aditivos aumentan la tensión superficial de la cubierta con lo que las gotas condensadas tienen un ángulo de contacto más pequeño, lo que les hace ser más planas. A su vez tienden a unirse unas con otras formando una película continua de agua que será evacuada hacia los laterales siempre y cuando el invernadero disponga de una pendiente adecuada (Martínez, 2008).
- Pigmentos colorantes: únicamente producen una modificación de la luz en la cubierta plástica dando lugar a una coloración característica (Ventura, 2002).

4.1.4 Fabricación

El principal método para la transformación de polímeros y aditivos en cubiertas plásticas es el denominado proceso de extrusión (Ordaz, 2007). Según Artiaga *et al.* (1996), este proceso permite la producción continua de materiales termoplásticos con sección transversal constante. Las etapas del proceso son las siguientes:

1. Plastificación del material de partida (granza o polvo).
2. Paso del material plastificado a través de una boquilla que le da la forma deseada.
3. Solidificación con la forma deseada.
4. Bobinado y corte.

La máquina que lleva a cabo el proceso de extrusión se denomina extrusora. La cual consiste en un tornillo o husillo que gira en el interior de un cilindro caliente. Los materiales de partida se introducen por una tolva situada al inicio del cilindro y se van desplazando a lo largo del cilindro conforme el tornillo va girando (imagen 6). Estos se mezclan y funden progresivamente a medida que se desplazan a través del tornillo por

el contacto directo con las paredes calientes del cilindro y por el calor generando en la fricción. Finalmente, el tornillo presiona al fundido a salir por una boquilla situada al final del cilindro, lo que determina su sección y forma final (Artiaga *et al.*, 1996).

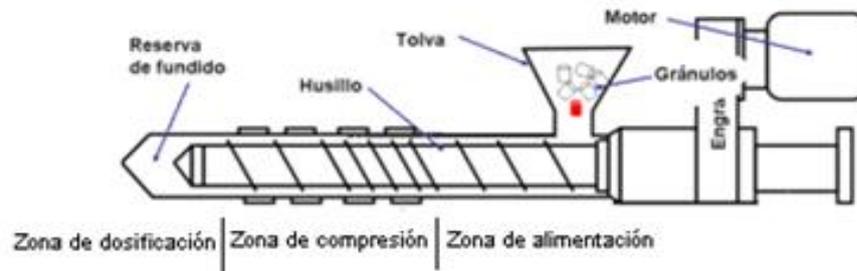


Imagen 6. Partes de una extrusora (Godoy, 2007).

Una vez que el fundido viscoso sale por la boquilla pasa a un cabezal a través de una ranura estrecha en forma de anillo, a continuación, se comienza a inflar con aire hasta varias veces su diámetro inicial y se eleva hacia arriba con lo que se obtiene la película plástica soplada también llamada burbuja o globo (Ordaz, 2007).

El globo se va enfriando en su ascenso mediante un anillo que distribuye el aire uniformemente a su alrededor. Pasa a través de unos rodillos guía y una vez que el globo se ha enfriado comienza a aplastarse mediante unas cortinas en ángulo hasta que llega a un sistema de jalado llamado comúnmente calandra. En esta parte unos rodillos de tiraje hacen bajar el material ya plegado hacia un sistema inferior donde se procede al embobinado (Godoy, 2007).

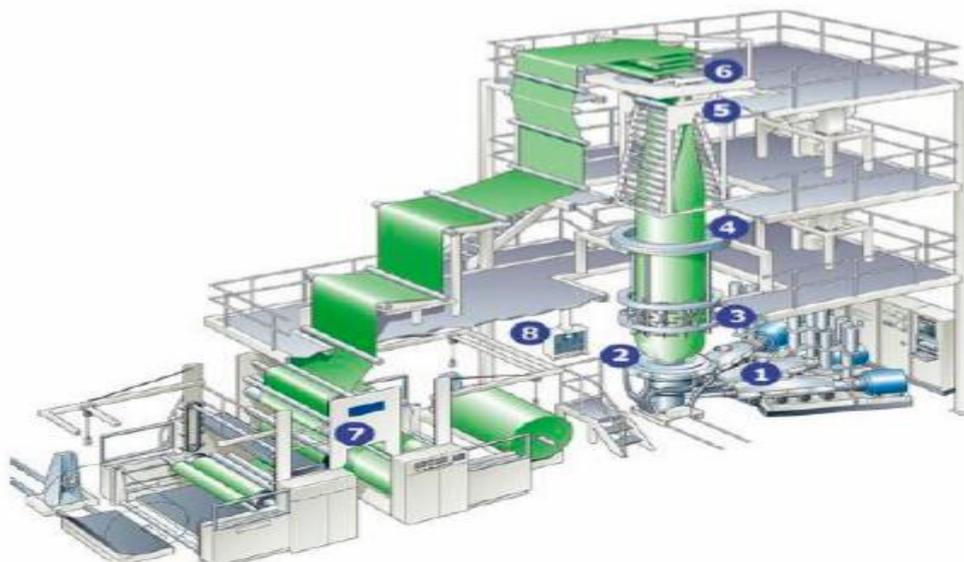


Imagen 7. Partes de un equipo utilizado para la fabricación de cubiertas plásticas: 1. Extrusoras, 2. Cabezal; 3. Anillo de enfriamiento; 4. Rodillos guía; 5. Cortinas de cierre; 6. Sistema de jalado (calandra); 7. Bobinador y 8. Panel de mando y control (Rodríguez *et al.*, 2010).

El proceso descrito anteriormente da como resultado la fabricación de un plástico monocapa, ya que para su obtención se ha utilizado únicamente una extrusora. Pero si a este mismo proceso se le añaden varias extrusoras (imagen 7) hablamos entonces de coextrusión, en dónde el producto final estaría formado por varias capas de distintos materiales cada una, de modo que las propiedades finales en el plástico multicapa es la suma de las propiedades individuales de cada capa. Los más comunes son los bicapa y tricapa, aunque también existen pentacapas y hexacapas (Escrig, 2018).

A continuación, se describe como se suelen distribuir las distintas propiedades posibles que se pueden dar en un plástico tricapa (Escrig, 2018):

- Capa externa: se sitúan todas las propiedades relacionadas con la resistencia a la fotodegradación, propiedades mecánicas y el efecto antitérmico.
- Capa intermedia: otorgan efecto termoaislante, elasticidad, difusión de la luz, propiedades fotoselectivas, propiedades mecánicas y pigmentos colorantes.
- Capa interna: se encuentran las propiedades antigoteo, propiedades mecánicas y efecto termoaislante.

4.2 PROPIEDADES RADIOMETRICAS: ÓPTICAS Y TÉRMICAS

4.2.1 Transmisión, reflexión y absorción

Todos los materiales interactúan con la luz de diferente forma, en el caso de una cubierta plástica, la radiación solar incidente podrá ser transmitida, absorbida y/o reflejada (Pillajo, 2017).

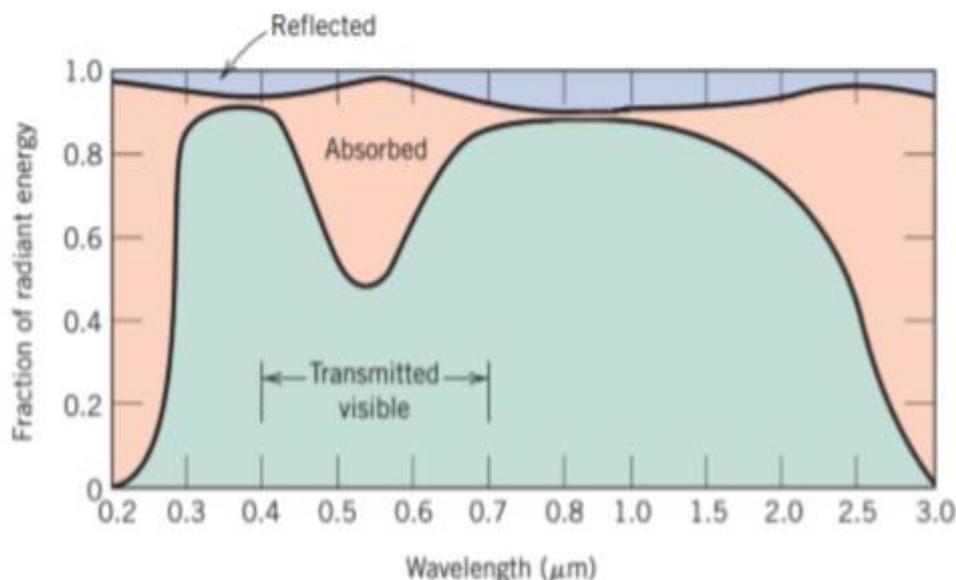


Imagen 8. Interacción de la luz solar al incidir sobre un vidrio verde (Callister, 2007).

La transmisión o transmitancia es la propiedad que tienen algunos materiales de dejar pasar la radiación, se expresa como la relación entre la cantidad de radiación existente una vez atravesado un determinado material y la medida simultáneamente en el exterior (González, 2010). Es una propiedad de los cuerpos transparentes ya que los cuerpos opacos no transmiten la luz, sino que la reflejan y/o absorben (Pillajo, 2017). La transmisión de la radiación solar incidente puede ser directa o difusa, en el primer caso la transmisión dependerá también del ángulo de incidencia, que forman los rayos solares con la línea perpendicular a la superficie de la cubierta (imagen 9). Cuando la radiación exterior sea difusa, como ocurre en días nublados, no cabe hablar de ángulos de incidencia, ya que proviene de toda la bóveda celeste (Hernández *et al.*, 2001).

La reflexión o reflectancia ocurre cuando la radiación solar regresa desde un cuerpo después de impactar con su superficie (Pillajo, 2017).

La absorción o absorbancia se produce cuando parte de la radiación interacciona sobre las partículas del objeto u material alcanzado. Esta interacción provoca que la radiación se disipe en el interior del objeto en forma de calor, elevando así su

temperatura. La absorción solo ocurre si la frecuencia de radiación coincide con la frecuencia a la cual los electrones de los átomos del material vibran (Callister, 2007; Panwar y Rathore, 2007).

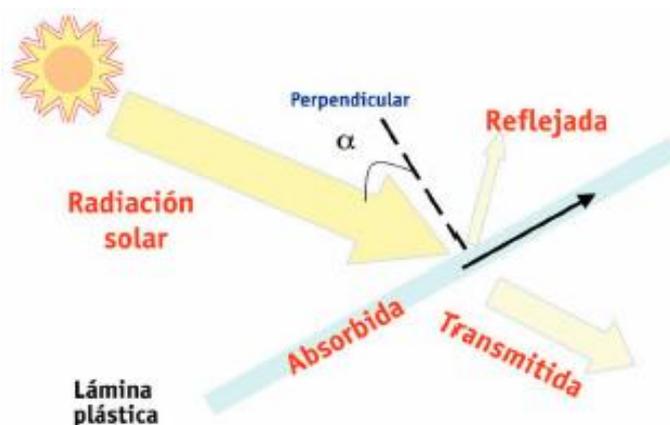


Imagen 9. Comportamiento de la radiación solar al incidir en una cubierta (Hernández *et al.*, 2001).

Dependiendo de las condiciones ambientales de la zona donde se sitúe la cubierta plástica y del manejo del cultivo establecido, se establecerá para cada material una determinada transmisión tanto a la radiación de onda corta (UVB, UVA y PAR) como a la de onda larga (Infrarrojo) (Alpi y Tognoni, 1999).

4.2.2 Difusión

Cuando los rayos solares impactan sobre las cubiertas plásticas éstas tienen la propiedad de variar la dirección de los rayos solares haciéndola difundir equitativamente por toda el área del cultivo (imagen 10). La distribución homogénea de la luz es de vital importancia en aquellas zonas geográficas dónde la radiación solar sea muy elevada, ya que al evitar la radiación directa sobre los cultivos se evitarán posibles quemaduras y sombras sobre las plantas, permitiendo por tanto un desarrollo más homogéneo y sano del cultivo (González, 2010).



Imagen 10. Difusión de la luz solar al atravesar una cubierta plástica (Hernández *et al.*, 2001).

Dicha difusión en las cubiertas se consigue mediante el diseño de la propia estructura polimérica del plástico o añadiéndole aditivos especiales, los cuales transforman la luz directa en difusa, sin reducir el porcentaje de la radiación total incidente (Hemming, 2008).

4.2.3 Termicidad

Esta propiedad indica la capacidad que tiene una cubierta para retener las radiaciones de onda larga (infrarroja) bajo la misma (Guzmán, 2000). Es decir, se busca que el calor desprendido por el cultivo, el suelo y la estructura del invernadero durante la noche no sea transmitida hacia el exterior, evitando así las inversiones térmicas y mejorando por tanto el efecto abrigo (Palma, 2009). Según la Norma UNE-EN 13206: 2017 se considera cubierta plástica térmica aquella que no transmite hacia el exterior más del 25% de las radiaciones infrarrojas de onda larga (FIR) (imagen 11).

Aparte de las pérdidas por radiación también se deben de tener en cuenta las pérdidas por conducción y convección a través de la cubierta, es por ello que existe un coeficiente global de pérdidas de calor (K) y que incluye a los tres componentes (tabla 5). Este coeficiente se encuentra medido bajo unas determinadas condiciones estables de laboratorio, lo que permite comparar unos materiales con otros (Matallana y Montero, 1995). Un material de cubierta es más aislante cuanto menor sea su valor K. Pero no hay que perder de vista el hecho de que es un coeficiente calculado en unas determinadas condiciones, las cuales variaran según la zona donde se encuentre la cubierta y por tanto el coeficiente será distinto al determinado en laboratorio (Florian y Bimbo, 1992).

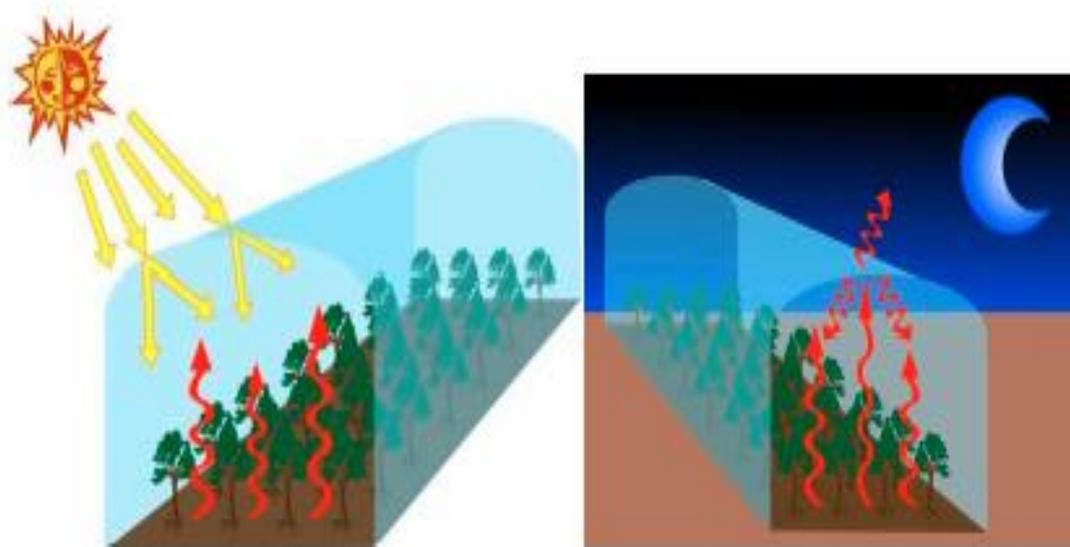


Imagen 11. Representación del efecto térmico en un invernadero (Olivera, 2008).

Tabla 5. Coeficiente de pérdidas térmicas de materiales en cubierta simple y doble, en condiciones de cielo despejado (Deltoury Niesen, 1986).

Material	K (W m⁻² K⁻¹)
Vidrio	6,1
PELD	8,8
EVA	7,8
PE térmico	7,2
PELD + PELD	6,0
EVA + PELD	5,4
PELD + EVA	5,3
PE térmico + PELD	5,1
PELD + PE térmico	4,7
PE térmico + EVA	4,3
PE térmico + PE térmico	4,1
Vidrio + PELD	4,2
Vidrio + EVA	3,9
Vidrio + PE térmico	3,5
Vidrio + Vidrio	3,1

Se puede afirmar entonces que la termicidad de una cubierta dependerá por tanto de la propia naturaleza de los polímeros y del uso de aditivos empleados en su fabricación, así como del espesor que disponga (Ordaz, 2007).

4.3 PROPIEDADES MECÁNICAS

4.3.1 Resistencia a la tensión

Indica la capacidad de la cubierta para sufrir esfuerzos de tracción. Mediante esta propiedad podemos determinar la ductilidad, la tenacidad y el módulo de Young o módulo elástico (Serope y Steven, 2002). Esta propiedad es especialmente útil para saber la fuerza máxima que se le puede aplicar a un plástico antes de su rotura, ya que en el momento de colocación de las cubiertas en los invernaderos es necesario aplicar una gran tensión (González, 2010). Los valores de estas propiedades varían con el espesor, velocidad a la que se realiza el ensayo y el tipo de mordaza empleada. Es obvio que para realizar comparaciones se debe mantener condiciones iguales en el ensayo y utilizar probetas de idénticas dimensiones (Pillajo, 2017).

Cuanto mayor sea la resistencia y el porcentaje de elongación que presenten los plásticos, más fácil será el manejo y colocación en las estructuras de los invernaderos (Shackelford, 2009). Todas estas propiedades se determinan a partir del ensayo a tracción el cual se rige en España por la norma UNE-EN ISO 527-1.

4.3.2 Resistencia al impacto

Es la resistencia ofrecida por una cubierta a cargas dinámicas, es decir cuando se le deja caer un peso desde una determinada altura. Como por ejemplo el impacto de granizo (Martínez, 2008). En los materiales compuestos por polímeros, como es el caso de las cubiertas plásticas, esta propiedad está relacionada directamente con su tenacidad, la cual muestra la habilidad de los distintos polímeros para absorber la energía (González, 2010). Esta propiedad se determina a partir del ensayo impacto al dardo el cual se rige en España por la norma UNE-EN ISO 7765-1.

4.4 INFLUENCIA SOBRE FACTORES AMBIENTALES

4.4.1 Radiación e Irradiación solar

La radiación solar es la forma de transmisión de la energía emitida por el sol a través de ondas electromagnéticas que tienen en común su velocidad de propagación ($299.792 \text{ km s}^{-1}$) y se diferencian en su longitud de onda (imágenes 12 y 13). Tanto la luz como el calor son manifestaciones de estas ondas (Urbano, 2010).

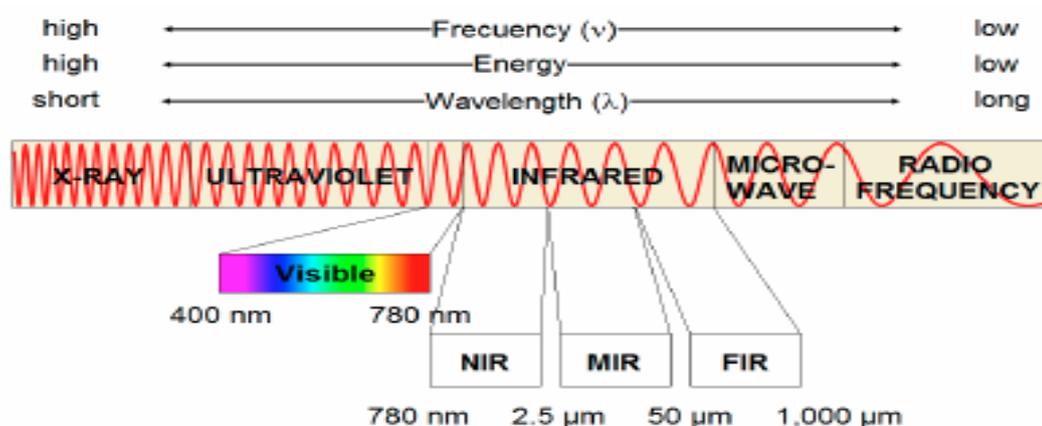


Imagen 12. Espectro electromagnético de la luz solar. Unidades de medida expresadas en nm y μm (López-Maestresalas, 2016).

Alrededor del 99% de radiación solar que llega a la superficie terrestre se encuentra comprendida entre los 300 nm y 2.500 nm, de la cual aproximadamente un 5% corresponde a la UV, un 45% a la PAR, un 50% a la NIR y un 1 % al resto (Pillajo, 2017).

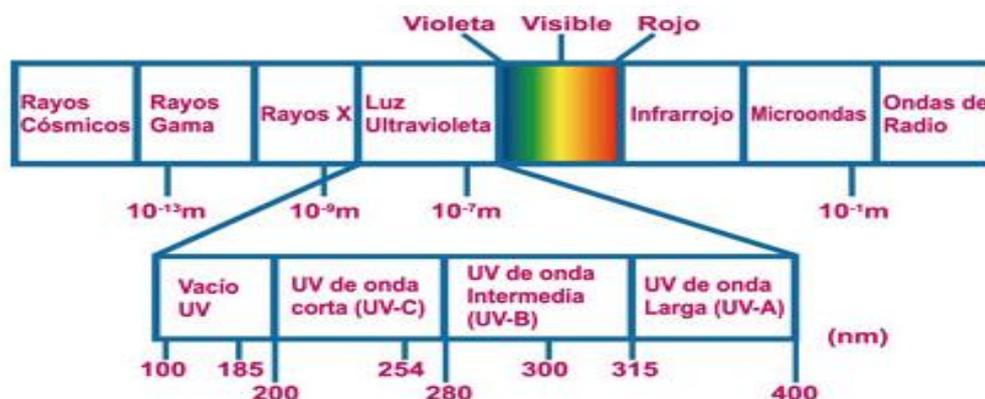


Imagen 13. Situación y valores de las radiaciones ultravioleta en el espectro electromagnético. Unidades de medida expresadas en m y nm (Jones, 1992).

Según González (2010) la tasa a la cual la radiación solar es recibida por una superficie por unidad de área se denomina irradiación, la cual se expresa en unidades de potencia por unidad de superficie (W m^{-2}) (imagen 14).

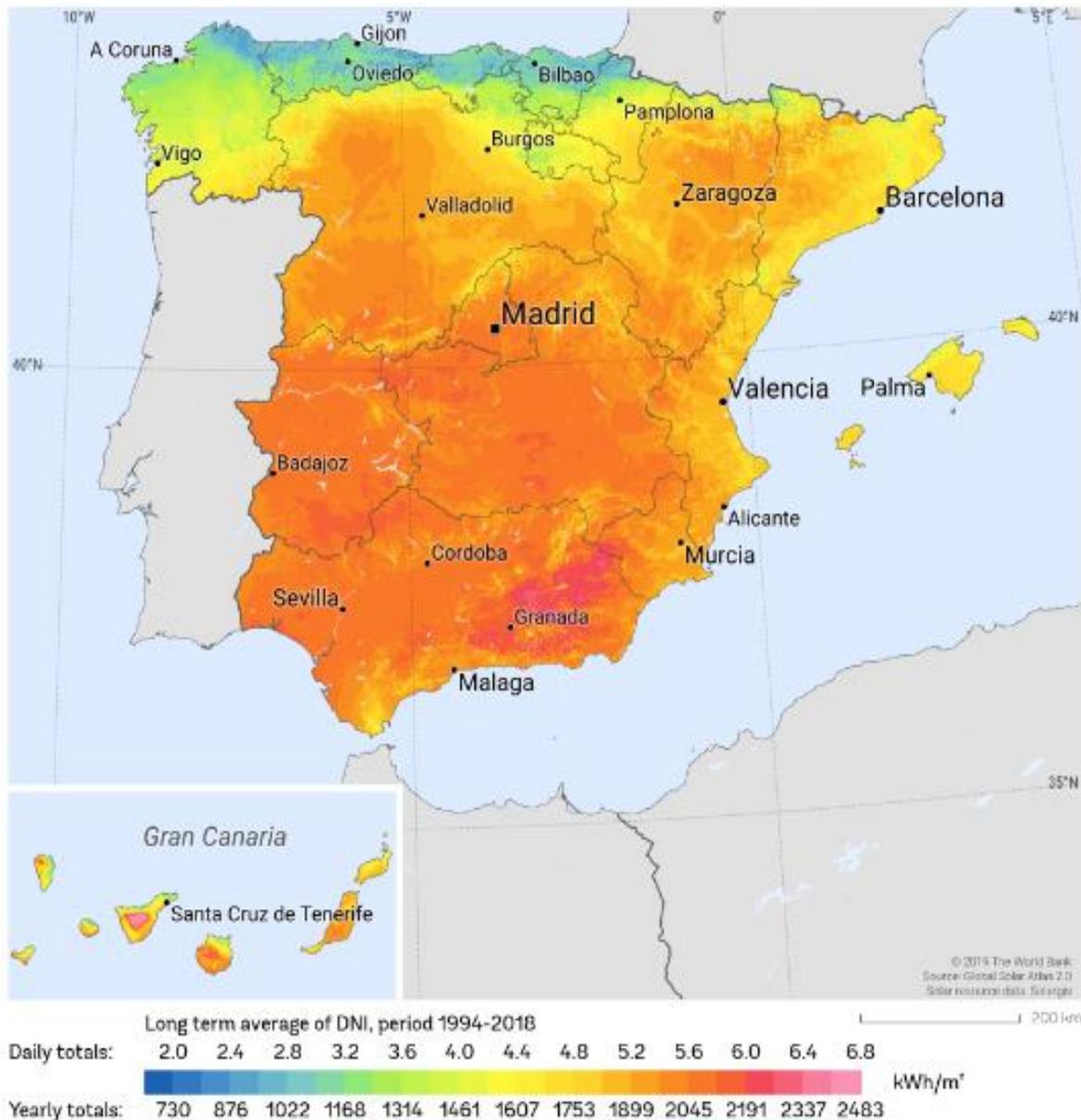


Imagen 14. Mapa de Irradiación directa normal en España. Unidades de medida expresadas en Kw h m^{-2} (Global Solar Atlas, 2017).

Los materiales de cubierta provocan una modificación en la intensidad de la radiación así como una selección y modificación en la distribución espectral de la misma, influyendo por tanto en el microclima y en el balance energético generado en el interior de un invernadero. Hechos que repercuten directamente en la respuesta de los cultivos (Palma, 2009).

Según Ordaz (2007), teniendo en cuenta estos conceptos se han desarrollado cubiertas fotoselectivas con multitud de prestaciones diferentes:

- Cubiertas antiplagas: alteran las transmisiones de las radiaciones ultravioletas comprendidas entre los 280 nm y 400 nm. Al hacer esto se consigue una mayor protección en los cultivos frente a los insectos herbívoros e insectos transmisores de enfermedades, ya que su comportamiento se altera de manera importante (Antignus *et al.*, 1996; Orzolek, 2017).

Estudios realizados por Antignus *et al.* (1996), con cubiertas absorbedoras de radiaciones ultravioleta, muestran una fuerte disminución en la población de plagas de *Bemisia tabaci*, *Frankliniella occidentalis* y *Aphis gossypii* en invernadero. Esta modificación de las radiaciones ultravioleta puede afectar de igual manera a insectos polinizadores, como por ejemplo a abejas (*Apis mellifera*) o abejorros (*Bombus terrestris*) (Soler *et al.*, 2005).

- Cubiertas anti-blackening: bloquean la radiación ultravioleta con el objetivo de no producir daños y ennegrecimiento sobre flores de ciertos cultivos ornamentales, en especial de las rosas (Díaz, 2000).

- Cubiertas coloreadas: absorben y/o reflejan parte de la radiación visible. Por ejemplo, cubiertas de color rojo y azul modifican la respuesta de los cultivos al estar en franjas donde la absorción de luz por parte de las plantas es diferente (Guzmán, 2000).

- Cubiertas antitérmicas: bloquean la entrada de radiación infrarroja cercana (NIR) comprendida entre los 780 nm y los 2.500 nm. Se busca una reducción en la temperatura del aire (Meca, 2012).

- Cubiertas térmicas: bloquean el paso hacia el exterior de la radiación infrarroja media (MIR) y lejana (FIR) comprendida entre los 2,5 μm y los 1.000 μm . Se busca conseguir el “efecto invernadero” (Bernat *et al.*, 1990).

- Cubiertas fluorescentes: absorben longitudes de onda poco útiles para los cultivos (ultravioleta C y verde) y la emiten en otras más aprovechables para la fotosíntesis (azul y roja), con la consecuente mejora en la producción y calidad de las cosechas (González, 2010).

Según Alpi y Tognoni (1991), los procesos fisiológicos de las plantas están influenciados por las longitudes de onda comprendidas entre los 300 nm y los 1.000 nm, rango que incluye a las radiaciones UV-A y B, PAR y NIR.

La región del espectro visible que se encuentra comprendida entre los 400 nm y los 700 nm, se denomina radiación fotosintéticamente activa (PAR) (Imagen 15). Toma

este nombre por ser la única radiación aprovechable por las plantas para realizar la fotosíntesis, debido a que constituye el rango de absorción de los pigmentos fotosintéticos: clorofilas, carotenos, antocianinas, etc. (Jones, 1992).

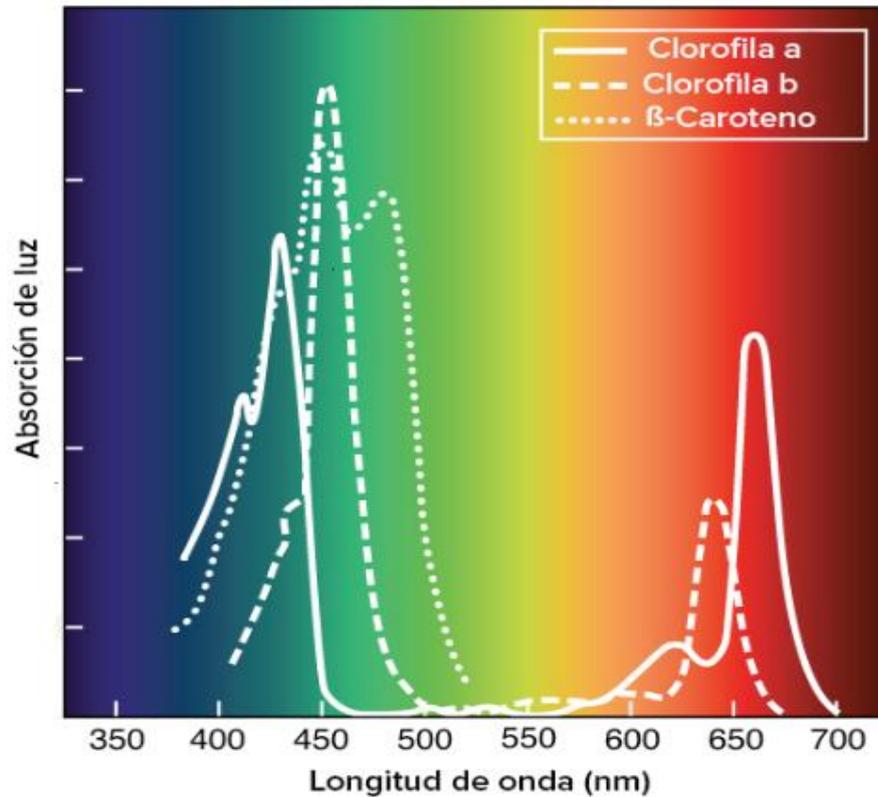


Imagen 15. Absorción de luz en plantas en distintas longitudes de onda para distintos pigmentos fotosintéticos (Jones, 1992).

Por otro lado, la fotomorfogénesis de las plantas se encuentra controlada por la relación de radiación recibida entre el espectro del rojo (600 nm y 700 nm) y el rojo lejano (700 nm y 800 nm), en la cual median los fotorreceptores llamados fitocromos (Smith, 2000). Además de por la relación entre la radiación del espectro azul (400 nm y 500 nm) y del rojo, en donde median tanto los fitocromos como otros fotorreceptores denominados criptocromos (Lin, 2000).

Para un buen crecimiento y desarrollo de los cultivos las cubiertas deben dejar pasar hacia el interior del invernadero la mayor parte de estas radiaciones. Además de retener como ya se ha mencionado las radiaciones de onda larga (Palma, 2009).

4.4.2 Temperatura

La temperatura es la expresión cuantitativa que indica la cantidad de calor que tiene un cuerpo. El calor a su vez es una forma de energía resultado del estado de agitación de las moléculas. La radiación que llega al interior de los invernaderos se transforma en calor aumentando la temperatura del ambiente y los objetos presentes (Bastida y Ramírez, 2002).

Las cubiertas plásticas influyen de manera directa sobre este factor de dos formas, una sería a través del propio efecto abrigo que se crea al envolver la estructura de un invernadero con el plástico creando así un confinamiento del aire, y la otra sería a través de la radiación. Según Arbolí (2000), las cubiertas actúan como filtros dejando pasar de una forma selectiva los diferentes tipos de radiaciones en función de los materiales empleados en su fabricación. Por lo que cuanto más radiación del tipo (PAR) y (NIR) se transmita través de estas más aumentará la temperatura del aire que se encuentra comprimido dentro del área protegida (Palma, 2009).

Por tanto, si no se utiliza ningún tipo de sombreado sobre la cubierta, la temperatura durante el día en el invernadero será más alta que en el exterior. Durante las noches ocurre el fenómeno denominado “inversión térmica”, el cual provoca que la temperatura interna del invernadero sea más baja que la externa (Ibarra, 1997). Es por esto por lo que en la composición de las cubiertas se usan polímeros con cierto valor termoaislante y aditivos capaces de bloquear la radiación infrarroja lejana (FIR) originada por la superficie de la tierra, plantas y demás objetos situados dentro del invernadero (Palma, 2009).

Los invernaderos en donde se emplean estructuras simples y de bajo coste, el control de la temperatura queda limitado a la ventilación natural (Abreu y Meneses, 1994). Pero en zonas cálidas donde se alcanzan altas temperaturas en primavera, verano y otoño debido a la alta irradiancia, la ventilación natural no es suficiente para extraer el exceso de calor (Baille, 1999). Por ello se recurre al empleo de pantallas térmicas, mallas de sombreado o pintado de cubiertas aplicando carbonato cálcico, técnica conocida como blanqueo o encalado (Gálvez *et al.*, 2007).

Sin embargo, esta práctica presenta una serie de inconvenientes como son la permanencia durante días nublados, falta de homogeneidad en su aplicación provocando el paso dispar de las radiaciones hacia el cultivo, el coste de mano de obra en su aplicación, lavado durante las lluvias y, sobre todo, la falta de selectividad que hace reflejar por igual el mismo porcentaje de radiaciones, viéndose así reducida la radiación PAR (Meca, 2012). Además, afecta negativamente a las propiedades radiométricas y mecánicas de las cubiertas plásticas ya que deteriora los aditivos que estas contienen (Samaniego *et al.*, 2002).

4.4.3 Humedad relativa

Según el meteglosario de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (2018), la humedad relativa es la relación entre la presión de vapor efectiva y la tensión del vapor saturante con respecto al agua a la misma temperatura y presión. Esta variable informa de la cantidad de vapor de agua que contiene una masa de aire con respecto a la cantidad máxima que podría contener para la misma temperatura. Se expresa en tanto por ciento y varía entre 0 %, para el aire seco, y el 100 % para el aire saturado, que es cuando no puede contener más vapor de agua.

Siempre y cuando exista un contenido absoluto de vapor de agua constante en el aire, existirá una relación inversa entre la temperatura y la humedad relativa (Huertas, 2008).

5. ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO

5.1 SITUACIÓN Y LOCALIZACIÓN

El ensayo se llevó a cabo en cuatro invernaderos piloto análogos tipo capilla con pendientes simétricas de 45° y estructura metálica, cada uno con una superficie de 3 m² (1,5 m de ancho x 2,0 m de largo) y una altura en cumbrera de 2,5 m, todos ellos con orientación Este-Oeste. No disponen de ventilación lateral, solamente una pequeña ventilación natural en la parte delantera y trasera, entre el larguero transversal y la cumbrera superior en dónde se colocará malla de protección de 16 x 10 hilos cm⁻² con una porosidad del 55%.

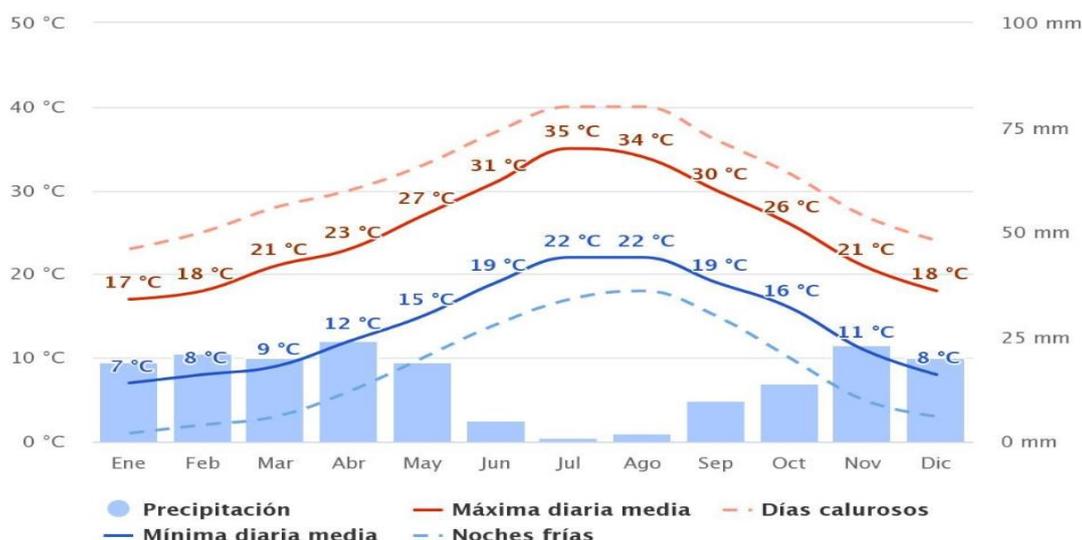
Dichos invernaderos se instalaron en la fábrica industrial Plastimer-Macresur S.L., situada en La Venta del Viso (Almería) a una altitud de 194 m.s.n.m, con coordenadas 36° 47 ' 55.2 '' latitud Norte y 2° 41 ' 54.1'' longitud Oeste.

5.2 CLIMA

El clima predominante en el lugar del ensayo es el mismo que el de Almería capital, ya que por su proximidad a ésta y por no existir diferencias micro-climáticas apreciables se consideran zonas geo-climáticas idénticas.

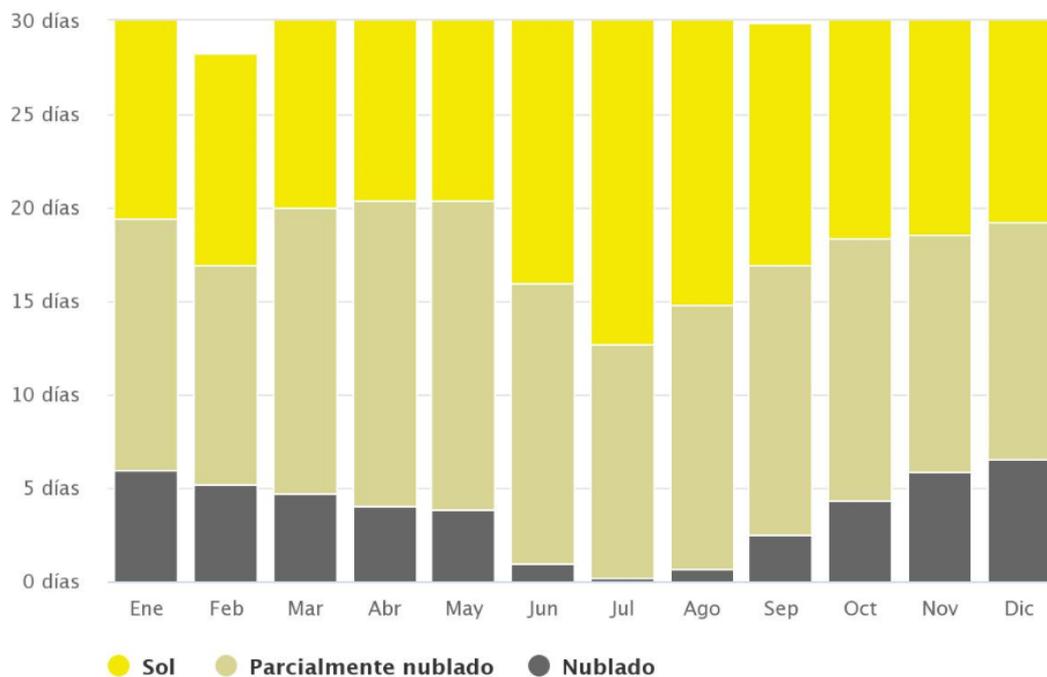
En general Almería presenta una media de temperaturas máximas elevadas desde primavera a otoño, siendo julio y agosto los meses más calurosos con temperaturas medias máximas de 35°C y 34°C. En cuanto a la media de temperaturas mínimas ningún mes de los citados anteriormente desciende de los 22°C, siendo el invierno la época más fría con temperaturas máximas de 18°C y mínimas de 7°C. Las escasas precipitaciones (aprox. 25 L m⁻² al mes) se concentran en otoño y primavera, siendo prácticamente nulas en verano (sequía estival) (gráfica 5).

Caracterización y evaluación de cubiertas plásticas experimentales de invernadero.

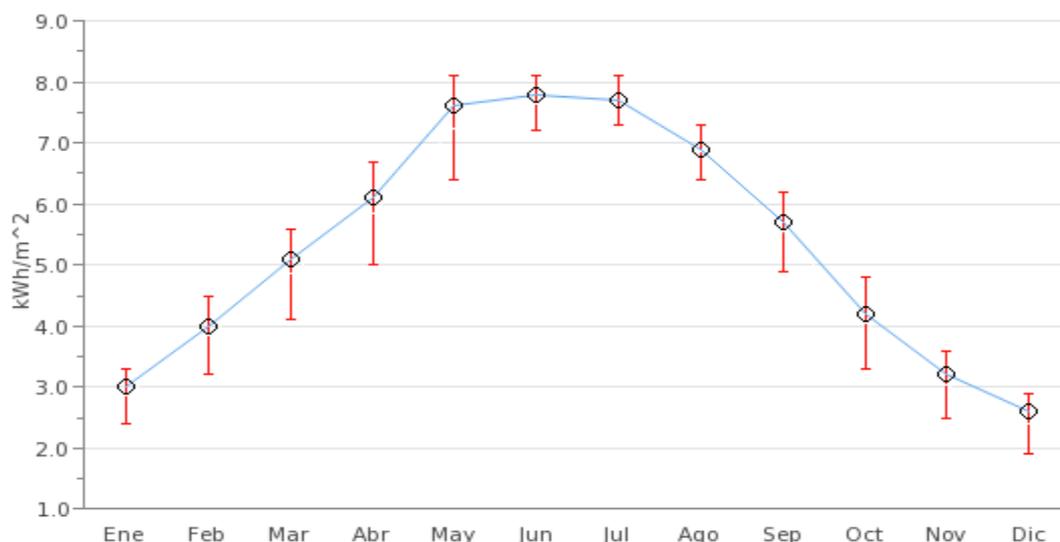


Gráfica 5. Representación de temperaturas y precipitaciones medias mensuales, así como de días calurosos y noches frías (Meteoblue, 1989-2019).

Los cielos se mantienen totalmente o prácticamente despejados la mayor parte del año (gráfica 6). Hecho que añadido a los altos niveles de irradiancia existentes (gráfica 7) hacen que se alcancen temperaturas diarias muy elevadas en el interior de un invernadero la mayor parte del año.



Gráfica 6. Representación mensual de los días de sol. Los días con menos del 20% de cubierta de nubes se consideran como soleados, entre 20-80% de cubierta de nubes como parcialmente nublado y más del 80% como nublado (Meteoblue, 1989-2019).



Gráfica 7. Representación mensual de irradiación solar en Almería (ADRASE, 2019).

A continuación, se define la zona climática donde se sitúa el ensayo mediante la aplicación de dos índices termo-pluviométricos:

Índice de Lang

Se calcula mediante la expresión: $I_L = P/T$. Siendo: P = precipitación media anual (mm) y T = temperatura media anual (°C).

Usando los datos termo-pluviométricos medios anuales de los últimos 45 años en Almería (tabla 6), obtenemos un valor de 11,36, con lo que según la tabla 7, Almería se sitúa en zona desértica.

Tabla 6. Temperaturas y Precipitaciones medias históricas de Almería (Estación meteorológica aeropuerto de Almería. Icao (OACI): LEAM).

Años	Temperatura media (°C)	Precipitación media (mm)
1975-2019	18,7	212,47

Tabla 7. Zonas climáticas de Lang (Urbano, 2010).

I_L	Zonas climáticas
$0 \leq I_L < 20$	Desiertos
$20 \leq I_L < 40$	Zona árida
$40 \leq I_L < 60$	Zona húmeda de estepa y sabana
$60 \leq I_L < 100$	Zona húmeda de bosques ralos
$100 \leq I_L < 160$	Zona húmeda de bosques densos
$I_L \geq 160$	Zona híper húmeda de prados y tundras

Índice de Martonne

Se calcula de la forma: $I_M = P / (T + 10)$. Siendo: P = precipitación media anual (mm) y T = temperatura media anual (°C).

Aplicando los datos de la tabla 6, obtenemos un valor de 7,40, con lo que según la tabla 8 Almería se encuentra en una zona semidesértica.

Tabla 8. Zonas climáticas de Martonne (Urbano, 2010).

I_M	Zonas climáticas
$0 \leq I_M < 5$	Desiertos
$0 \leq I_M < 10$	Semidesiertos
$0 \leq I_M < 20$	Estepas y países secos mediterráneos
$0 \leq I_M < 30$	Regiones del olivo y de los cereales
$0 \leq I_M < 40$	Regiones subhúmedas de prados y bosques
$I_M \geq 40$	Zonas húmedas a muy húmedas

5.3 MATERIAL

Los materiales objeto de ensayo han sido cuatro cubiertas plásticas tricapa, fabricadas todas ellas en la fábrica industrial Plastimer-Macresur S.L. Sus características se muestran a continuación:

- CPE₁: Espesor teórico: 200 μ (800 gg). Espesor medio real: 219 μ (876 gg). Color: azul. Composición y distribución de materiales entre capas: Capa externa: 35% mLLDPE + 57.5% LDPE + 7.5% aditivo UV tipo HALS; capa intermedia: 35% mLLDPE + 55.5% LDPE + 7.5% aditivo UV tipo HALS + 2% aditivo pigmento azul y capa interna: 96% LDPE + 4% aditivo térmico FR.

- CPE₂: Espesor teórico: 200 μ (800 gg). Espesor medio real: 213 μ (852 gg). Color: gris plateado. Composición y distribución de materiales entre capas: capa externa: 35% mLLDPE + 57.5% LDPE + 7.5% aditivo UV tipo HALS; capa intermedia: 35% mLLDPE + 50.5% LDPE + 7.5% aditivo UV tipo HALS + 7% aditivo antitérmico NIR y capa interna: 96% LDPE + 4% aditivo térmico FR.

- CPE₃: Espesor teórico: 180 μ (720 gg). Espesor medio real: 187 μ (748 gg). Color: amarillo-verdoso. Composición y distribución de materiales entre capas: capa externa: 32.5% mLLDPE + 60% LDPE + 7.5% aditivo UV tipo Niquel Quenchers; capa intermedia: 32.5% mLLDPE + 60% LDPE + 7.5% aditivo UV tipo Niquel Quenchers y capa interna: 100% LDPE.

- CPE₄: Espesor teórico: 200 μ (800 gg). Espesor medio real: 204 μ (816 gg). Color: incoloro. Composición y distribución de materiales entre capas: capa externa: 30% mLLDPE + 62.5% LDPE + 7.5% aditivo UV tipo HALS; capa intermedia: 30% mLLDPE + 62.5% LDPE + 7.5% aditivo UV tipo HALS y capa interna: 100% LDPE.



Imagen 16. De izq. a drcha. CPEs 1,2,3 y 4 colocadas en invernaderos piloto.

5.4 INSTRUMENTOS Y MÉTODOS

5.4.1 Determinación de propiedades ópticas

Mediante un espectroradiómetro LICOR-1800 (imágenes 17 y 18) se realizaron medidas tanto por la cara externa como interna de la reflectancia, transmitancia y absorbancia de cada una de las CPEs, en la región espectral comprendida entre los 350 nm y los 1.100 nm.



Imagen 17. Partes del espectroradiómetro.



Imagen 18. Equipo de adquisición de datos.

Para ello, se procedió a cortar un pequeño fragmento de cada una de las CPEs, cuyo tamaño fuese lo suficientemente grande como para cubrir la lente de la esfera integradora que forma parte del espectroradiómetro. Antes de ser introducido se limpió con un papel húmedo y otro seco para eliminar posibles partículas de polvo. Posteriormente, se procedió a la medición y volcado de datos según el manual del equipo. El análisis se efectuó en los laboratorios de Física Aplicada de la Universidad de Almería.

Por otro lado, se empleó un espectrofotómetro SHIMADZU UV-2401PC (imagen 19) para medir la capacidad de difusión de cada CPE en la región espectral comprendida entre los 380 nm y 780 nm.

El procedimiento se realizó de igual forma que con el espectroradiómetro. Las medidas se realizaron en el laboratorio de control de calidad perteneciente a la fábrica industrial Plastimer-Macresur S.L.

Para estos dos análisis se consultaron las Normas UNE: EN-2155-5 y EN-2155-9.



Imagen 19. Espectrofotómetro SHIMADZU UV-2401PC.

5.4.2 Determinación de propiedades mecánicas

A través de un dinamómetro METROTEC HOUNSFIELD (imagen 20) se sometió cada una de las CPEs a un ensayo a tracción, tanto en dirección transversal (D.T) como longitudinal (D.L) respecto al sentido de extrusión. Con el objeto de determinar las deformaciones producidas y resistencia ofrecida en las CPEs cuando se someten a esfuerzos axiales.



Imagen 20. Dinamómetro METROTEC HOUNSFIELD.

Para ello, se tomó la CPE a ensayar y se cortó con un troquel 5 probetas por cada dirección (D.L y D.T), con las dimensiones mostradas en la imagen 21. A continuación, se observó que ninguna de ellas tuviese defectos físicos apreciables y que estuviesen correctamente cortadas. Una vez comprobadas, se midió el ancho y espesor en los diferentes puntos a lo largo de su sección y se realizaron las marcas correspondientes a la longitud L_0 y L_1 (imagen 21). Seguidamente, se colocaron dentro de las mordazas tensoras del equipo, de manera que quedasen bien adaptadas y alineadas. Por último, se introdujo en el equipo, el parámetro de velocidad constante de estiramiento, que para todas las probetas fue de 500 mm min^{-1} y se inició el ensayo. Una vez finalizado, se extrajeron del equipo informático todos los datos generados para el posterior procesado.

El ensayo se efectuó en los laboratorios de Resistencia de Materiales de la Universidad de Almería y se tomó como referencia y consulta las Normas UNE: EN-13206, EN ISO-527-1 y EN ISO-527-3

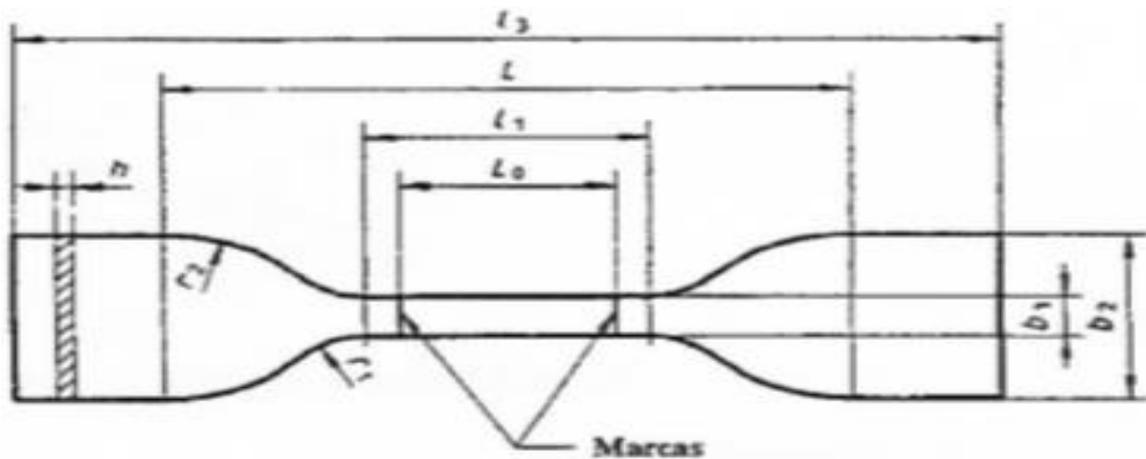


Imagen 21. Dimensiones de la probeta utilizada: b_1 . Anchura de la parte estrecha: $6 \text{ mm} \pm 0,4 \text{ mm}$; b_2 . Anchura en los extremos: $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$; h . Espesor: $\leq 1 \text{ mm}$; L_0 . Distancia entre marcas: $25 \text{ mm} \pm 0,25 \text{ mm}$; L_1 . Longitud de la parte estrecha: $33 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$; L . Distancia inicial entre mordazas: $80 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$; L_3 . Longitud total: $\geq 115 \text{ mm}$; r_1 . Radio menor: $14 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$; r_2 . Radio mayor: $25 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ (Norma UNE EN ISO-527-3).

Por otro lado, se utilizó un impactómetro CEAST L-5 (imagen 22) para determinar el peso que soportan las CPEs previo a su rotura, cuando son impactadas por la caída libre de un peso a una determinada altura.



Imagen 22. Impactómetro CEAST L-5.

En nuestro caso usamos como objeto peso un dardo de cabeza semiesférica de 38 mm \pm 1 mm de diámetro, cuyo peso fue aumentando de 15 en 15 gr en el transcurso del ensayo mediante el añadido de pequeñas pesas. El dardo se situó acoplado a un electroimán a una altura de 66 cm \pm 1 cm respecto a la base donde se colocaron las muestras. Para cada CPE se procedió a cortar muestras alargadas de 20 cm \pm 2 cm de ancho y un largo de 5 m, tantas como pesos ensayados. A continuación, se introdujeron en las mordazas del aparato de manera que las muestras quedasen bien tensas y alineadas dentro de estas, se cargó el dardo con un peso inicial próximo al valor que se esperaba que pudiera provocar rotura, se colocó en el electroimán y se accionó el mecanismo que lo deja caer. Por cada peso ensayado se realizaron 20 impactos a lo largo de la muestra, y se anotó el nº de impactos que produjeron rotura y los que no. La prueba acaba en el momento en el que el nº de impactos con rotura fueron \geq 10.

El ensayo se llevó a cabo en el laboratorio de control de calidad perteneciente a la fábrica industrial Plastimer-Macresur S.L, tomándose como referencia y consulta las Normas UNE: EN-13206 y EN ISO-7765-1.

5.4.3 Evaluación de factores ambientales en campo

Se colocaron sensores HOBO SHUTTLE (modelo H 08-004-02), para el registro continuo (cada hora) de la temperatura (°C) y humedad relativa (%). Se dispusieron enumerados uno por cada invernadero piloto (imágenes 23 y 24), así como otro en el exterior. Estos se situaron a una altura respecto del terreno de 0,5 m, dentro de cajas de corcho con aperturas laterales, frontal y trasera, con objeto de eliminar posibles fluctuaciones las cuales impidiesen una correcta toma de datos.

La toma de medidas se inició el 11 de septiembre de 2019 y finalizó el 10 de octubre de 2019. Posteriormente se procedió al volcado de datos con el software propio del sensor y a su procesado



Imágenes 23 y 24. Sensor enumerado HOBO SHUTTLE (modelo H 08-004-02). Izq. Situación de este en el interior de caja de corcho. Drcha.

Mediante el sensor DELTA OHM, se realizaron mediciones manuales diarias a las 12h solar de la radiación PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en dirección al sol (formando un ángulo de 90° entre el sol y la superficie del sensor).

La toma de datos se realizó durante 48 días en el periodo de tiempo comprendido entre el 2 de septiembre de 2019 y terminó el 15 de noviembre de 2019. Además, el día 25 de septiembre del 2019 entre las 5:00 y 19:00 horas se realizaron medidas de la radiación PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) incidente al inicio de cada hora. Todas las medidas se realizaron tanto en el interior de cada uno de los invernaderos piloto como en el exterior



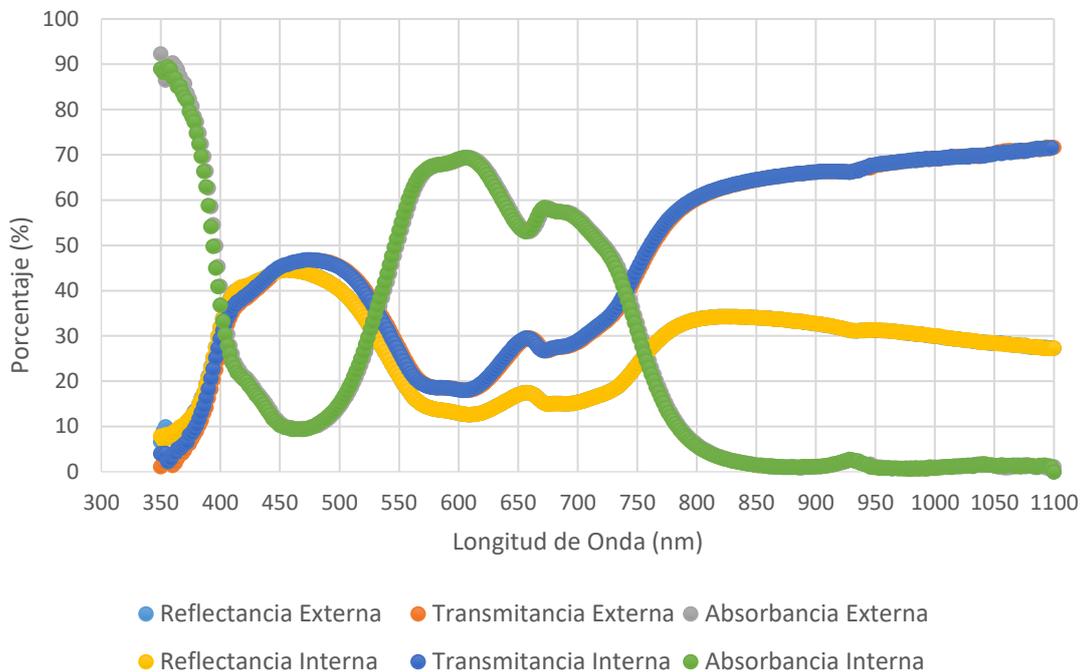
Imagen 25. Sensor DELTA OHM para la medida de radiación PAR.

5.5 PROCESADO Y ANÁLISIS DE DATOS

Para este trabajo se utilizaron los programas informáticos Microsoft Excel y Statgraphic Centurión 18. Mediante ellos se procesaron los datos obtenidos en cada uno de los análisis y ensayos, para más tarde extraer los resultados y conclusiones que se muestran en los apartados sucesivos.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 PROPIEDADES ÓPTICAS



Gráfica 8. Comportamiento óptico de la CPE₁. Los valores de la cara interna solapan a los de la cara externa.

Según se observa en la gráfica 8, la CPE₁ presenta un alto grado de simetría entre sus caras, quedando así solapadas en su representación los porcentajes de las caras internas y externas.

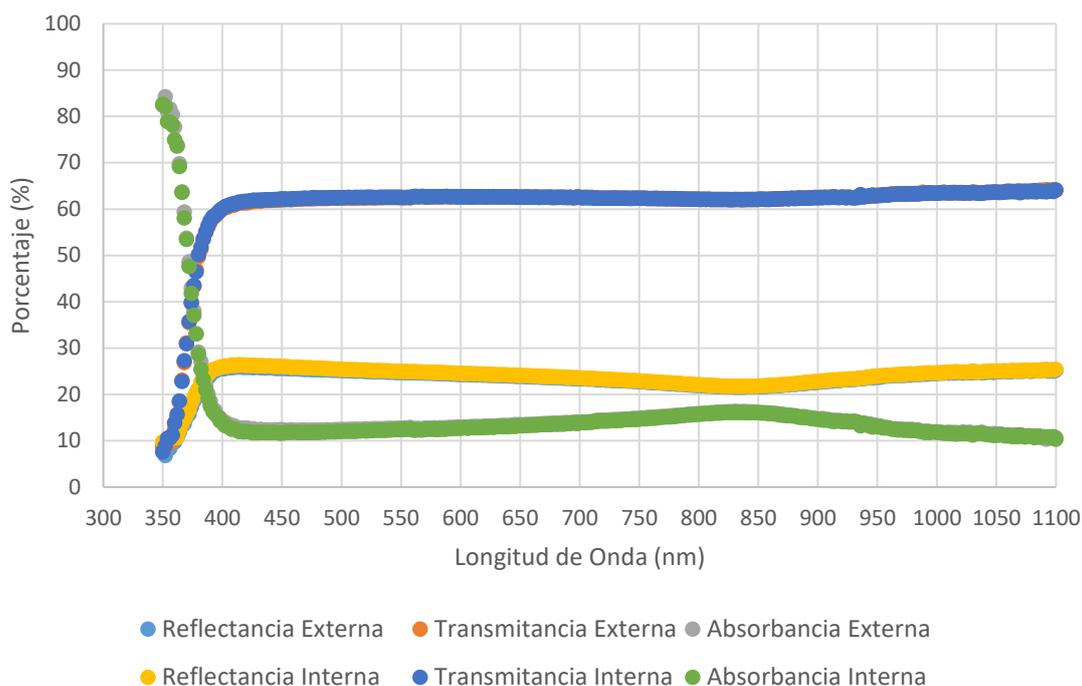
Los patrones de los tres componentes mostrados en la región espectral visible son los esperados debido al color azul de la cubierta: la transmisión y la reflectancia máxima se alcanzan en su respectivo color (400-500 nm) (Larsen *et al.*, 2003). Posteriormente decrece de 500 nm a 600 nm y aumenta de nuevo de 600 nm a 700 nm, siendo el comportamiento de la absorbancia inversamente proporcional a la transmitancia y a la reflectancia (Del Ángel-Hernández *et al.*, 2017).

Tabla 9. Valores porcentuales promedio de reflectancia, transmitancia y absorbancia en las regiones espectrales UV-A, PAR y NIR en ambas caras de la CPE₁.

Componentes	Cara	Región espectral (nm)		
		UV-A (350-400)	PAR (400-700)	NIR (700-1100)
Reflectancia	Externa	14,77	26,80	29,33
	Interna	14,69	26,78	29,33
Transmitancia	Externa	9,45	32,04	61,45
	Interna	11,10	32,11	61,26
Absorbancia	Externa	75,78	41,16	9,23
	Interna	73,21	41,21	8,99

Tabla 10. Valores porcentuales promedio de reflectancia, transmitancia y absorbancia en las regiones espectrales AZUL, ROJO Y ROJO LEJANO en ambas caras de la CPE₁.

Componentes	Cara	Región espectral (nm)		
		AZUL (400-500)	ROJO (600-700)	ROJO LEJANO (700-800)
Reflectancia	Externa	41,93	14,94	24,05
	Interna	41,91	14,92	24,03
Transmitancia	Externa	42,20	24,66	44,06
	Interna	42,65	24,90	44,69
Absorbancia	Externa	15,86	60,40	31,89
	Interna	15,28	60,13	30,92



Gráfica 9. Comportamiento óptico de la CPE₂. Los valores de la cara interna solapan a los de la cara externa.

La CPE₂ posee un alto grado de simetría entre sus caras, por lo que la representación de los porcentajes de sus caras también queda solapada.

La gráfica 9, muestra desde los 400 nm a 1.100 nm un comportamiento uniforme de la reflectancia, transmitancia y absorbancia. Es decir, el aditivo antitérmico que se le añadió a esta cubierta ha afectado por igual a todos las componentes. Como son consecutivos los espectros PAR y NIR, al intentar reducir el segundo no se ha podido evitar reducir también el primero (Hemming *et al.*, 2006).

Abdel *et al.* (2012), sugieren que una cubierta con aditivos reflectivos a la radiación NIR para poder considerarse antitérmica, debe proporcionar una alta transmisión de la radiación PAR y una alta reflexión de la radiación NIR.

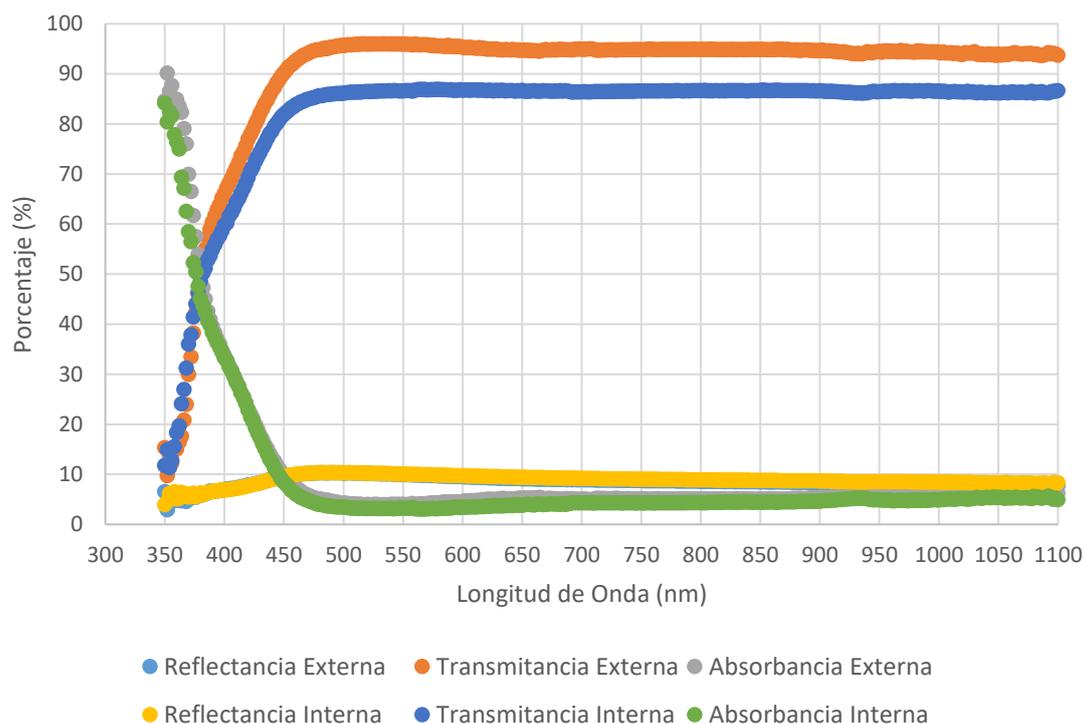
Otros autores como Schwart *et al.* (2005), mencionan que las películas antitérmicas deben presentar transmisiones menores del 25% en la NIR.

Tabla 11. Valores porcentuales promedio de reflectancia, transmitancia y absorbancia en las regiones espectrales UV-A, PAR y NIR en ambas caras de la CPE₂.

Componentes	Cara	Región espectral (nm)		
		UV-A (350-400)	PAR (400-700)	NIR (700-1100)
Reflectancia	Externa	17,39	24,76	23,32
	Interna	18,12	25,03	23,48
Transmitancia	Externa	36,85	62,33	62,83
	Interna	37,10	62,42	62,80
Absorbancia	Externa	45,76	12,91	13,85
	Interna	44,78	12,55	13,72

Tabla 12. Valores porcentuales promedio de reflectancia, transmitancia y absorbancia en las regiones espectrales AZUL, ROJO Y ROJO LEJANO en ambas caras de la CPE₂.

Componentes	Cara	Región espectral (nm)		
		AZUL (400-500)	ROJO (600-700)	ROJO LEJANO (700-800)
Reflectancia	Externa	25,61	23,91	22,74
	Interna	25,98	24,11	22,90
Transmitancia	Externa	61,84	62,61	62,34
	Interna	62,00	62,63	62,34
Absorbancia	Externa	12,55	13,48	14,92
	Interna	12,03	13,26	14,76



Gráfica 10. Comportamiento óptico de la CPE₃. Los valores de la cara interna solapan a los de la cara externa en la reflectancia y absorbancia, pero no en la transmitancia.

Observando la gráfica 10, se puede distinguir como la transmitancia externa aumenta linealmente desde los 400 nm a 450 nm mientras que la absorbancia desciende de manera proporcional a esta, hasta llegar a los 500 nm, punto a partir del cual se comportan uniformemente a lo largo de todo el espectro mostrado. Este hecho se debe a que en la composición de la CPE₃ se usaron aditivos fotoestabilizadores del tipo Niquel Quenchers, los cuales al absorber las radiaciones UV para evitar la degradación, han absorbido también parte de la banda de la PAR (Godoy, 2007).

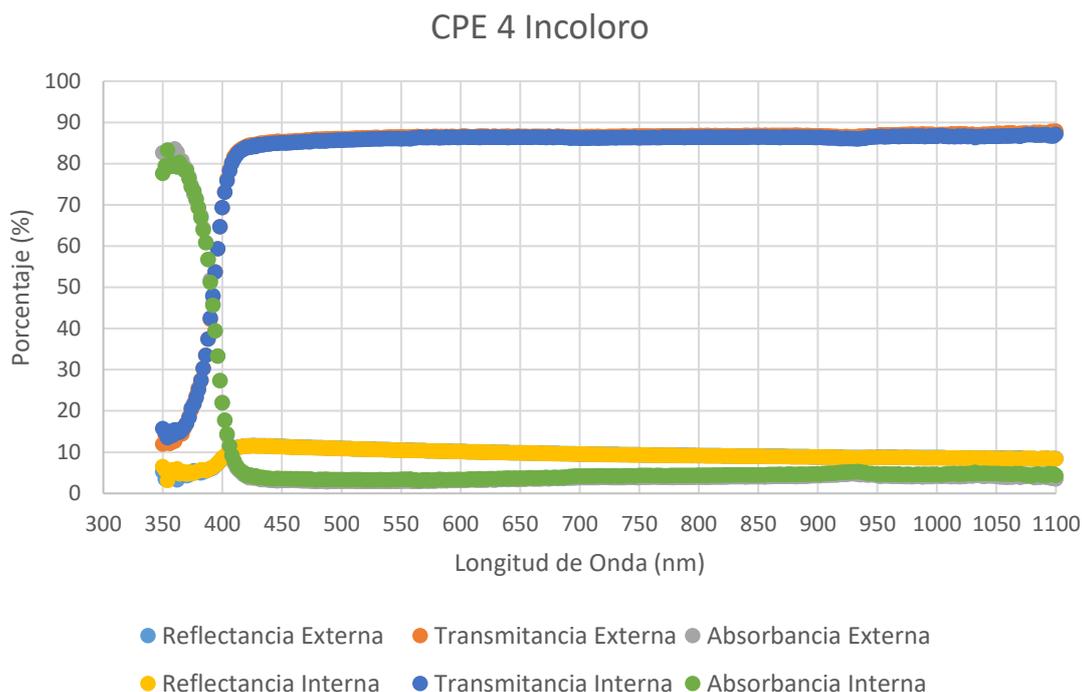
La diferencia asimétrica entre la transmitancia externa e interna no se tiene muy claro a qué se debe, quizás los fotoestabilizadores hayan influido en ello, ya que hasta los 350 nm si existe un alto grado de simetría, y a medida que se desplaza hacia la región PAR esta diferencia va aumentando hasta llegar a los 450 nm, punto a partir del cual el desfase entre una cara y otra se mantiene en torno a un 9%.

Tabla 13. Valores porcentuales promedio de reflectancia, transmitancia y absorbancia en las regiones espectrales UV-A, PAR y NIR en ambas caras de la CPE₃.

Componentes	Cara	Región espectral (nm)		
		UV-A (350-400)	PAR (400-700)	NIR (700-1100)
Reflectancia	Externa	5,75	9,44	8,40
	Interna	6,03	9,56	8,70
Transmitancia	Externa	38,64	92,34	94,55
	Interna	38,21	83,77	86,53
Absorbancia	Externa	61,36	7,66	5,45
	Interna	55,76	6,68	4,77

Tabla 14. Valores porcentuales promedio de reflectancia, transmitancia y absorbancia en las regiones espectrales AZUL, ROJO Y ROJO LEJANO en ambas caras de la CPE₃.

Componentes	Cara	Región espectral (nm)		
		AZUL (400-500)	ROJO (600-700)	ROJO LEJANO (700-800)
Reflectancia	Externa	9,17	9,19	8,80
	Interna	9,15	9,46	9,08
Transmitancia	Externa	86,42	94,91	94,88
	Interna	78,11	86,64	86,58
Absorbancia	Externa	13,58	5,09	5,12
	Interna	12,74	3,90	4,35



Gráfica 11. Comportamiento óptico de la CPE₄. Los valores de la cara interna solapan a los de la cara externa.

La gráfica 11, nos muestra como la CPE₄ presenta un alto grado de simetría entre sus caras, siendo evidente el solape entre ellas.

En este caso, se demuestra como el uso de fotoestabilizadores del tipo HALS son más eficientes a la hora de comenzar a transmitir en la región PAR que los del tipo Niquel Quenchers (Martínez, 2008), ya que la CPE₄ justo al inicio de la región PAR produce una alta transmisión que se mantiene a lo largo de todo el espectro, en comparación con la CPE₃ que hasta los 450/500 nm no se produce una transmisión considerable. Por contra, la CPE₄ no llega a alcanzar valores tan altos de transmisión como los de la CPE₃.

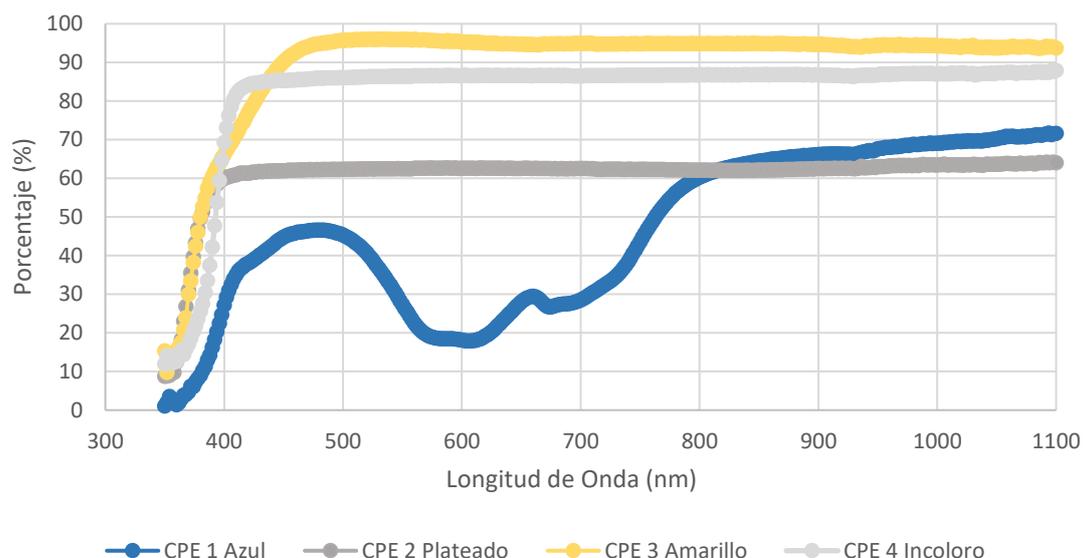
Esta característica de los fotoestabilizadores del tipo HALS también la podemos apreciar en la CPE₂, donde el patón de transmisión al inicio de la región PAR es prácticamente idéntico, aunque a porcentajes inferiores causados por el aditivo "antitérmico". La CPE₁ también lleva incorporados estos aditivos, pero debido al pigmento azul añadido, el comportamiento está algo distorsionado y no es tan evidente.

Tabla 15. Valores porcentuales promedio de reflectancia, transmitancia y absorbancia en las regiones espectrales UV-A, PAR y NIR en ambas caras de la CPE₄.

Componentes	Cara	Región espectral (nm)		
		UV-A (350-400)	PAR (400-700)	NIR (700-1100)
Reflectancia	Externa	5,26	10,52	8,95
	Interna	5,76	10,49	8,90
Transmitancia	Externa	28,11	85,77	86,93
	Interna	28,56	85,47	86,48
Absorbancia	Externa	66,63	3,71	4,12
	Interna	65,68	4,04	4,61

Tabla 16. Valores porcentuales promedio de reflectancia, transmitancia y absorbancia en las regiones espectrales AZUL, ROJO Y ROJO LEJANO en ambas caras de la CPE₄.

Componentes	Cara	Región espectral (nm)		
		AZUL (400-500)	ROJO (600-700)	ROJO LEJANO (700-800)
Reflectancia	Externa	11,13	9,88	9,40
	Interna	11,09	9,86	9,35
Transmitancia	Externa	84,26	86,63	86,70
	Interna	83,90	86,40	86,33
Absorbancia	Externa	4,61	3,49	3,90
	Interna	5,01	3,74	4,32



Gráfica 12. Transmitancia de las CPEs en sus caras externas.

De todas las CPEs, La CPE₁ mostró ser la de menor transmisividad en todas las regiones espectrales analizadas.

En la región UV-A, la baja transmisión de la CPE₁ (9,45%), pudo ser debido a su alto espesor real (876gg) y al pigmento azul utilizado en su composición. La baja transmisión de radiación UV-A hacia el interior podría ayudar al control de insectos, aunque también podría influir de igual manera al comportamiento de abejas y abejorros (Soler *et al.*, 2005; Espí y García, 2009). Los valores de la CPE₄ y CPE₂ (tabla 17) se deben como ya se comentó en el apartado anterior, a que los fotoestabilizadores del tipo HALS bloquean de manera más eficiente gran parte de la radiación UV-A en comparación con la CPE₃, que al usar fotoestabilizadores del tipo Niquel Quenchers dejan pasar un mayor porcentaje de esta radiación. Soler (2010), menciona que una cubierta plástica anti-insectos debe ser capaz de bloquear entre el 80% y el 100% de la radiación UV, y que los aditivos utilizados no deben influir en las cualidades fotoselectivas a lo largo de su vida útil.

En cuanto a la transmisión PAR, Ilić *et al.* (2017) reportaron como una malla de sombreado de color azul transmitió un 46,5% de la PAR incidente. En nuestro caso para la CPE₁ fue de 32,04%, diferencia que puede deberse a que una malla presenta porosidad mientras que el plástico no, además de otros factores: espesor, cantidad y calidad del pigmento. La transmisión de la PAR en la CPE₂ fue de un 62,33 %, mientras que en la CPE₄ y CPE₃ fue de un 85,77% y 92,34% respectivamente. La diferencia entre la primera y las dos últimas se debe al uso de aditivos empleados en la CPE₂ para evitar el paso de la radiación NIR. López-Marín *et al.* (2008) compararon un plástico convencional testigo (similar a la CPE₄) con un plástico con pigmentos que reflejaban la NIR, mostrando una reducción de un 15% de la PAR del primero respecto al segundo. En cuanto a la mayor transmisión de PAR por parte de la CPE₃ respecto a la CPE₄ puede

ser debida a que esta última presenta un mayor espesor además de la naturaleza de los fotoestabilizadores (Orden *et al.*, 1997; Godoy, 2007).

La baja transmisión de radiación PAR repercute directamente sobre los cultivos, según diferentes estudios realizados en invernadero por Sandri *et al.* (2003) demuestran que una baja incidencia de PAR sobre cultivos de tomate (*Solanum lycopersicum*) produce una clara reducción en los rendimientos productivos. Bagdonavičienė *et al.* (2015) demostraron que tanto en tomate como en pepino (*Cucumis sativus*) se produce menor asimilación de CO₂ cuando la radiación PAR es menor. Aunque es seguro que la tasa de fotosíntesis se incrementa conforme lo hace la PAR y viceversa, dependerá de cada cultivo que este hecho se produzca en mayor o en menor medida (Moen, 1991).

Por lo que se refiere a la transmisión de la radiación NIR, la CPE₁ mostró un comportamiento heterogéneo a lo largo del espectro debido a su coloración azul, al igual que un ensayo realizado por Larsen *et al.* (2003) donde una lámina de celofán de color azul mostró el mismo patrón, aunque a porcentajes inferiores, debido a la cantidad de pigmento utilizado. La CPE₂ arrojó valores muy similares a la CPE₁ (tabla 17), aunque en este caso el patrón de comportamiento fue muy homogéneo a lo largo de toda la banda. Lo mismo ocurre en la CPE₃ y CPE₄ donde a pesar de presentar altos porcentajes de transmisión (tabla 17), su comportamiento es muy homogéneo a lo largo de toda la región espectral de la NIR. López-Marín *et al.* (2008) compararon un plástico convencional testigo (similar a nuestro CPE₄) con un plástico con pigmentos que reflejaban la NIR, mostrando una reducción de un 19,2% de la NIR del primero respecto al segundo.

Tabla 17. Valores porcentuales promedio de la transmitancia en las regiones espectrales UV-A, PAR y NIR en las caras externas de las CPEs.

CPE	Componente	Cara	Región espectral (nm)		
			UV-A (350-400)	PAR (400-700)	NIR (700-1100)
1	Transmitancia	Externa	9,45	32,04	61,45
2	Transmitancia	Externa	36,85	62,33	62,83
3	Transmitancia	Externa	38,64	92,34	94,55
4	Transmitancia	Externa	28,11	85,77	86,93

Tabla 18. Valores porcentuales promedio de la transmitancia en las regiones espectrales AZUL, ROJO Y ROJO LEJANO en las caras externas de las CPEs.

CPE	Componente	Cara	Región espectral (nm)		
			AZUL (400-500)	ROJO (600-700)	ROJO LEJANO (700-800)
1	Transmitancia	Externa	42,20	24,66	44,06
2	Transmitancia	Externa	61,84	62,61	62,34
3	Transmitancia	Externa	86,42	94,91	94,88
4	Transmitancia	Externa	84,26	86,63	86,33

En lo que se refiere a la ratio PAR/NIR, valores por encima de 1 nos indicaría que la cubierta es capaz de transmitir más PAR que NIR, lo que sería ideal en climas cálidos donde durante el verano se alcanza temperaturas muy elevadas (Kittas *et al.*, 1996). En nuestro caso, las CPEs 2,3 y 4 muestran valores cercanos a 1, es decir, transmiten igual la PAR que la NIR. La peor en este aspecto sería la CPE 1 (0,52), la cual transmite bastante menos PAR en relación a la transmisión de NIR.

Respecto a la ratio R/RL, los valores de la CPE 2,3 y 4 son todos 1, mientras que la CPE₁ muestra una ratio de 0,56. La relación R/FL es de vital importancia para la respuesta de los fitocromos (Batschaucer, 1998). Valores bajos de esta ratio pueden causar características menos deseables como el alargamiento del tallo, potenciación de la dominancia apical, reducción en la ramificación e inhibición de la floración (Smith y Whitelam, 1997).

Observando la ratio A/R, nuestros resultados arrojan valores próximos a 1 para las CPEs 2,3 y 4 mientras que para la CPE₁ muestra un valor alto (1,71). Lin (2000), encontró que cantidades altas dentro del espectro azul respecto a las del espectro rojo tiene diversos efectos morfológicos. Oliviera *et al.* (2016), observó como para un cultivo de *Melissa officinalis* L. valores altos de esta relación provocaron aumentos en la altura de las plantas, área foliar y contenido de clorofila.

Tabla 19. Valores promedio de la relación existente entre diferentes regiones espectrales Radiación fotosintéticamente activa (PAR), Radiación infrarrojo cercano (NIR), AZUL (A), ROJO (R) Y ROJO LEJANO (RL) en las caras externas de las CPEs.

CPE	Componente	Cara	Regiones espectrales		
			PAR/NIR	R/RL	A/R
1	Transmitancia	Externa	0,52	0,56	1,71
2	Transmitancia	Externa	0,99	1,00	0,99
3	Transmitancia	Externa	0,98	1,00	0,91
4	Transmitancia	Externa	0,99	1,00	0,97

Tras analizar el comportamiento al paso de la radiación difusa (tabla 20), se comprobó que ninguna de ellas supera el 50% de difusión, valor mínimo que ha de alcanzarse para confirmar que una cubierta dispone en su composición de aditivos especiales para este fin y poder considerarse la cubierta como altamente difusa (Díaz, 2000). La CPE₂ fue la que mayor porcentaje de difusión alcanzó, debido seguramente a las partículas aluminizadas que se utilizaron en su composición para reflejar la NIR. El porcentaje de difusión del resto de las cubiertas se debe a la naturaleza propia de los polímeros y aditivos empleados.

Pese a presentar valores por debajo del 50%, según la norma ASTM D1003 basta con tener un porcentaje >30% para poder considerarse a una cubierta difusora, por lo que todas las CPEs analizadas en este estudio pueden considerarse como tal.

Tabla 20. Valores porcentuales promedio de difusión de luz de las CPEs.

CPE	Región espectral (380 - 780 nm)
	Porcentaje de difusión
1	31
2	40
3	27
4	34

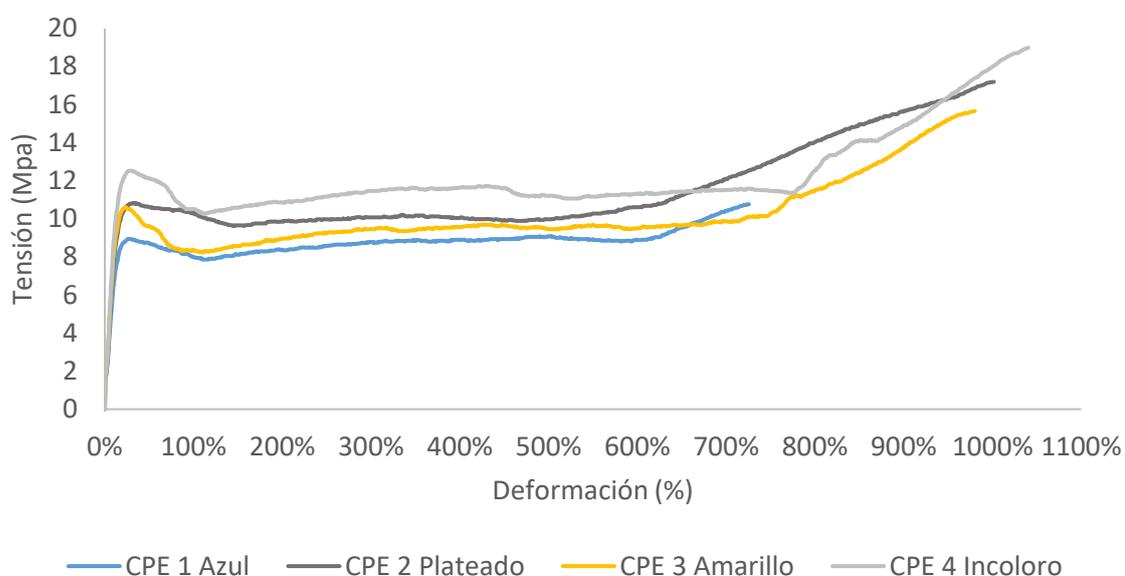
6.2 PROPIEDADES MECÁNICAS

6.2.1 Ensayo de tracción

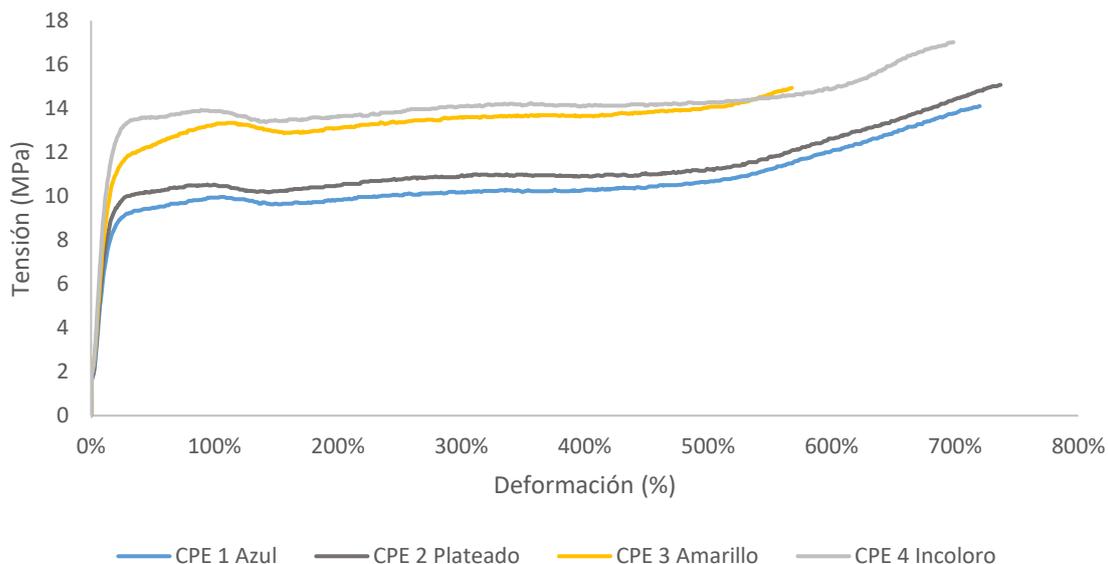
Observando las curvas de esfuerzo-deformación de las gráficas 13 y 14, se comprueba como las cuatro CPEs se comportan en ambas direcciones (D.T y D.L) como un material blando y tenaz, en donde se aprecia un punto de fluencia, es decir, presentan un límite elástico a partir del cual, si se supera este punto, el material no podrá volver a recuperar su estado original (si se retiran las fuerzas ejercidas sobre él) siendo las deformaciones permanentes (Garzón *et al.*, 2017). Todas las curvas de tensión-deformación analizadas, muestran al inicio una región lineal a bajas tensiones, y una línea tangente a esa porción de curva, la cual marca el límite de proporcionalidad. Según la norma UNE-EN ISO 527-1, estas curvas están clasificadas como tipo b, que son las correspondientes a materiales dúctiles con punto de fluencia.

Cada curva representada en las gráficas 13 y 14 está realizada con la media de 5 probetas. Para el cálculo de esta media se tuvo que optar por un punto límite común en la toma de datos, el cual fue, el de aquella probeta más desfavorable en cuanto a su punto de rotura se refiere. Por ello, los gráficos son representativos solamente para los valores que aparecen en las tablas 21 y 22. Los valores reales de las tensiones y deformaciones máximas y de rotura se encuentran en la tabla 23 y 24.

En los ANEXOS aparecen las curvas tensión-deformación de las 5 probetas analizadas por cada cubierta, tanto en dirección transversal como longitudinal.



Gráfica 13. Curvas comparativas tensión-deformación de las CPEs (D.T). Obtenidas cada una de la media de las 5 probetas analizadas por cubierta.



Gráfica 14. Curvas comparativas tensión-deformación de las CPEs (D.L). Obtenidas cada una de la media de las 5 probetas analizadas por cubierta.

En el apartado 6.4.1 aparecen las gráficas y ecuaciones obtenidas a través de regresiones simples donde se verifica la relación proporcional que existe dentro del límite elástico de proporcionalidad.

Tabla 21. Valores obtenidos de las curvas tensión-deformación de las CPEs (D.T). Obtenidos de la media de las 5 probetas analizadas por cubierta.

CPE	Tensión lím. de fluencia (MPa)	Deformación lím. de fluencia (%)	Tensión lím. de proporcionalidad (MPa)	Deformación lím. de proporcionalidad (%)
1	8,955	26,3	7,585	13,3
2	10,824	31,4	8,268	11,5
3	10,606	22,6	7,3086	8,8
4	12,527	27,9	9,5859	11,4

Tabla 22. Valores obtenidos de las curvas tensión-deformación de las CPEs (D.L). Obtenido de la media de las 5 probetas analizadas por cubierta.

CPE	Tensión lím. de fluencia (MPa)	Deformación lím. de fluencia (%)	Tensión lím. de proporcionalidad (MPa)	Deformación lím. de proporcionalidad (%)
1	9,97	104,6	7,94	15,1
2	10,537	99,7	8,8421	15,7
3	13,339	110	11,4378	23,9
4	13,943	89,2	12,391	19,3

Como se ha podido observar en las tablas 21 y 22, existen diferencias significativas entre los valores obtenidos en las probetas analizadas en dirección transversal (D.T) con las obtenidas en dirección longitudinal (D.L). Esto es debido a que la estructura interna del polietileno y su comportamiento varía en función de la orientación de las cadenas de etileno que lo componen (Garzón *et al.*, 2017).

Este hecho no solo influye en los valores ya vistos, si no que afecta también a la resistencia a la ruptura (tablas 23 y 24). Ensayos realizados por Godoy (2007), donde se analizaron diversas cubiertas con diferentes características mostraron que, en todas ellas la resistencia a la ruptura en dirección transversal fue ligeramente mayor a la de dirección longitudinal. En nuestro caso ocurrió lo mismo excepto en para la CPE₄, donde la resistencia fue mayor en la dirección longitudinal.

La resistencia a tracción expresada en MPa de cada una de las CPEs en ambas direcciones (D.T y D.L), se muestra en las tablas 23 y 24. La cual corresponde a la tensión de rotura, que es la máxima tensión que un material puede soportar antes de que su sección transversal se contraiga de manera significativa. Es por ello que tanto los valores de la tensión de rotura como los de la tensión máxima son idénticos, al igual que sus respectivas deformaciones (Degarmo *et al.*, 2003; Smith y Hashemi, 2006).

Tabla 23. Valores reales de las tensiones y deformaciones máximas y de rotura en las CPEs (D.T). Obtenido del promedio de las 5 probetas analizadas por cubierta.

CPE	Tensión máxima (MPa)	Deformación máxima (%)	Tensión de rotura (MPa)	Deformación de rotura (%)
1	16,46	1058,59	16,46	1058,59
2	20,08	1162,43	20,08	1162,43
3	17,56	1099,11	17,56	1099,11
4	20,589	1133,37	20,59	1133,37

Tabla 24. Valores de los parámetros evaluados en las CPEs (D.L). Obtenido del promedio de las 5 probetas analizadas por cubierta.

CPE	Tensión máxima (MPa)	Deformación máxima (%)	Tensión de rotura (MPa)	Deformación de rotura (%)
1	15,96	846,94	15,96	846,94
2	17,06	872,13	17,058	872,13
3	17,56	715,44	17,56	715,44
4	21,84	943,08	21,84	943,08

Los datos mostrados en este ensayo de la deformación a la rotura en ambas direcciones sobrepasan el valor del 500% dado por Matallana y Montero (1995) y los proporcionados por Briassoulis *et al.* (1997), que oscilan entre el 375-600% para cubiertas de PELD, y entre el 500-700% para el PE-IR. El alto valor obtenido en nuestro caso puede deberse a que los polímeros y los aditivos utilizados actualmente han

mejorado sustancialmente respecto a aquellos que había en el momento en el que se realizaron sus estudios.

6.2.2 Ensayo de impacto al dardo

Tanto el ensayo de la CPE₁ y la CPE₂ terminaron en 895 gr sin llegar a producir un nº de impactos con rotura ≥ 10 , no se pudo continuar aumentando pesos ya que no existían más pesas homologadas que se pudiesen añadir al dardo.

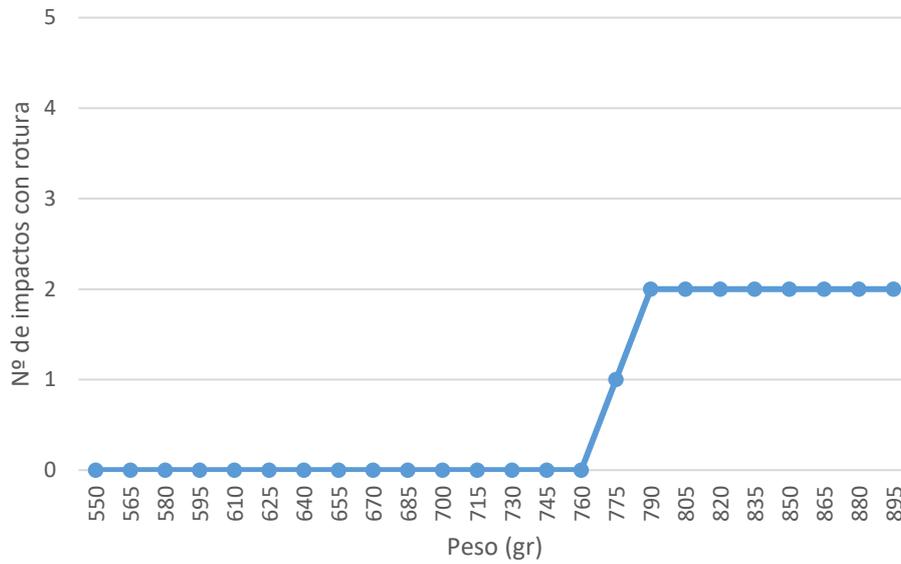
La CPE que mostró mejor respuesta a la rotura fue la CPE₁, seguida de la CPE₂, CPE₄ y CPE₃. Sabemos que las propiedades mecánicas de todas las cubiertas plásticas dependen directamente del tipo de materia prima con la que estén fabricadas y en concreto del tipo de polietileno empleado, así como de las condiciones de transformación en que hayan producido (Waldo, 2005). Como nuestras CPEs a pesar de tener aditivos diferentes están fabricadas con similares porcentajes y tipo de polietileno, podemos intuir que el comportamiento frente a la rotura por impacto está relacionado con el espesor de las CPEs, según los valores de la tabla 25 se aprecia como a mayor espesor medio, mayor es el peso soportado y viceversa. Para afirmar con rotundidad esta hipótesis se debería hacer un estudio más exhaustivo donde se comparasen cubiertas con los mismos componentes y cantidades a diferentes espesores.

En todas las roturas producidas, la señal dejada tuvo forma circunferencial, síntoma de que existe conservación de las propiedades elásticas, si la marca dejada fuese sido en forma de "L", denotaría un deterioro de estas propiedades (Godoy, 2007).

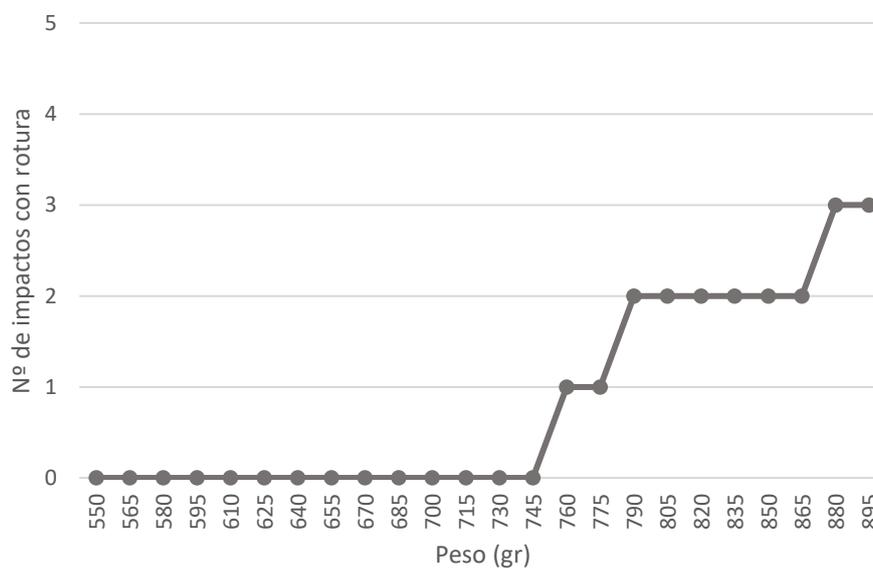
Tabla 25. Espesores medios reales y resistencia al impacto de las CPEs.

CPE	Espesor medio real (μ)	Peso máximo soportado sin producir rotura (gr)	Peso máximo alcanzado al final del ensayo (gr)
1	219	760	895
2	213	745	895
3	187	445	490
4	204	490	610

Los siguientes gráficos muestran el comportamiento de las CPEs ante el ensayo de impacto al dardo.

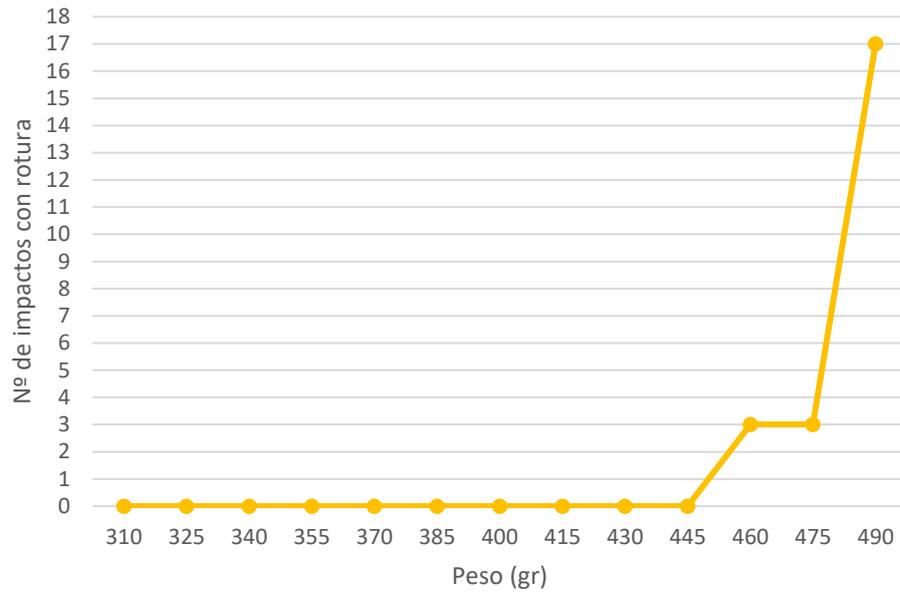


Gráfica 15. Comportamiento de la CPE₁ al impacto.

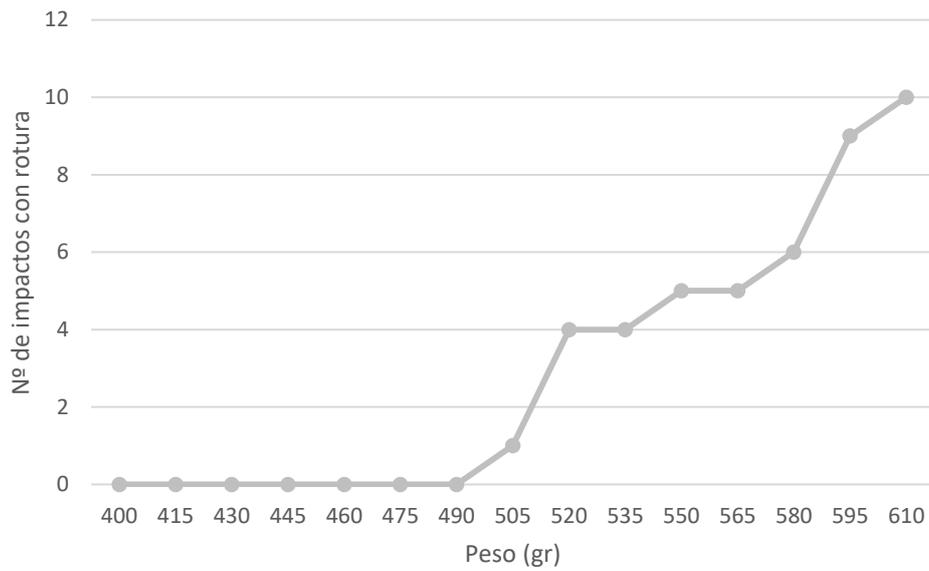


Gráfica 16. Comportamiento de la CPE₂ al impacto.

Caracterización y evaluación de cubiertas plásticas experimentales de invernadero.



Gráfica 17. Comportamiento de la CPE₃ al impacto.

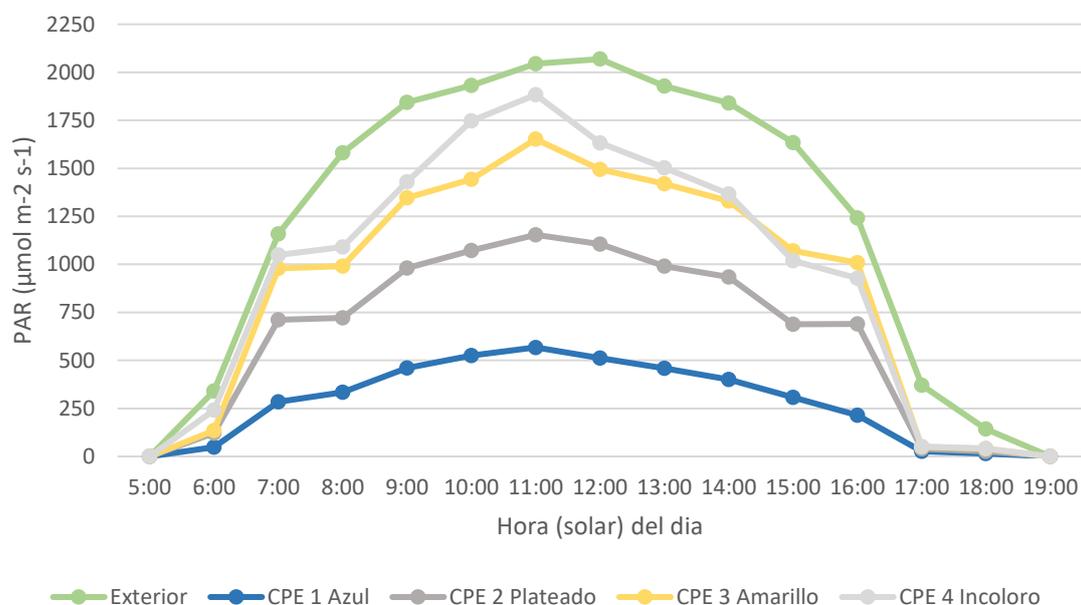


Gráfica 18. Comportamiento de la CPE₄ al impacto.

6.3 EVALUACIÓN DE FACTORES AMBIENTALES EN CAMPO

6.3.1 Radiación fotosintéticamente activa (PAR)

La gráfica 19 muestra la cantidad de radiación PAR exterior hora a hora, así como el patrón de transmisión de las CPEs durante la mañana del 25 de septiembre de 2019. Un ensayo realizado por Del Ángel-Hernández *et al.* (2017) en Nuevo León (México), muestra como para los meses de junio, julio, agosto y septiembre, en un día despejado cualquiera, la cantidad de radiación PAR incidente del exterior y la hora del día son muy similares a la obtenida en nuestro ensayo. Al igual que en su estudio, la hora de mayor radiación PAR fue entre las 10:00 y 13:00 hora solar, lo que corresponde a una hora oficial de entre las 12:00 y las 15:00 horas. De igual forma Samaniego *et al.* (2002), experimentó la mayor radiación PAR en esta franja horaria durante un ciclo de primavera-verano.



Gráfica 19. Radiación PAR incidente del exterior y la transmitida a través de las CPEs, medidas el día 25 de septiembre del 2019 entre las 6:00 h y 18:00 h (hora solar).

Tabla 26. Valores promedio de la radiación PAR que se transmite a través las CPEs instaladas en los invernaderos, y su relación porcentual con la radiación PAR incidente del exterior ($1.394,56 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Medidas el día 25 de septiembre del 2019 entre las 6:00 h y 18:00 h (hora solar).

CPE	Radiación PAR transmitida ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Transmitancia (%)
1	319,51	22,91
2	710,28	50,93
3	997,08	71,50
4	1075,6	77,13

Tabla 27. Valores promedio de la radiación PAR que se transmite a través las CPEs instaladas en los invernaderos y su relación porcentual con la radiación PAR incidente del exterior ($1.671,09 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) a las 12 hora solar. Medidas acumulativas en un periodo de 48 días, comprendido entre el 2 de septiembre de 2019 y el 15 de noviembre de 2019.

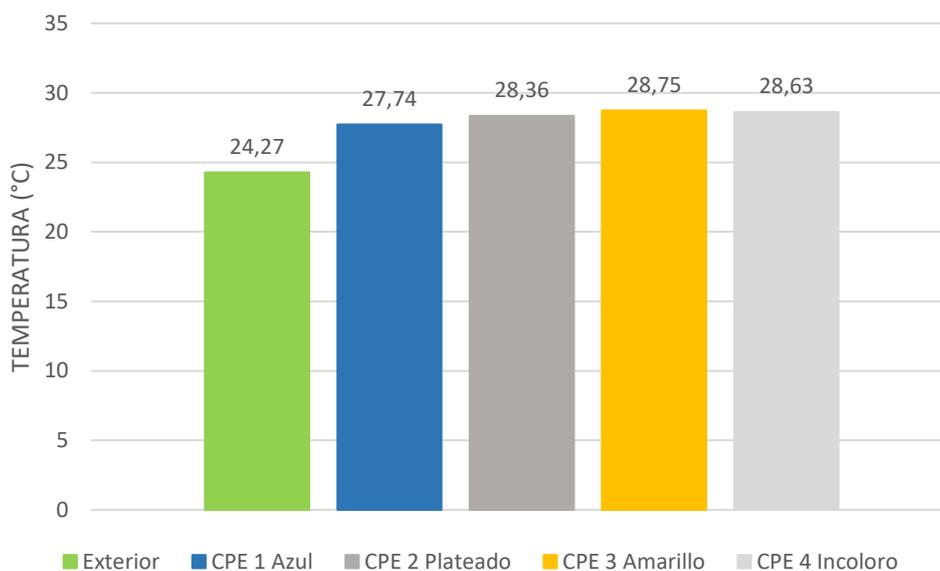
CPE	Radiación PAR transmitida ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Transmitancia (%)
1	469,44	28,09
2	941,48	56,34
3	1.352,38	80,93
4	1.387,8	83,05

Las diferencias de transmitancia PAR entre los resultados de las tablas 26 y 27 y los del espectroradiómetro (tabla 17) pueden deberse a la degradación y acumulación de polvo en las cubiertas. Ya que cuando se realizaron los análisis de las propiedades ópticas con el espectroradiómetro, las muestras se limpiaron antes de analizarlas, mientras que una vez colocadas en los invernaderos para evaluarlas en campo quedaron totalmente expuestas a la degradación y suciedad. Según Sangpradit (2014), la acumulación de polvo y suciedad es una de las principales fuentes de pérdida de transmisión solar en los invernaderos. Pudiendo llegar a reducirla hasta un 40%.

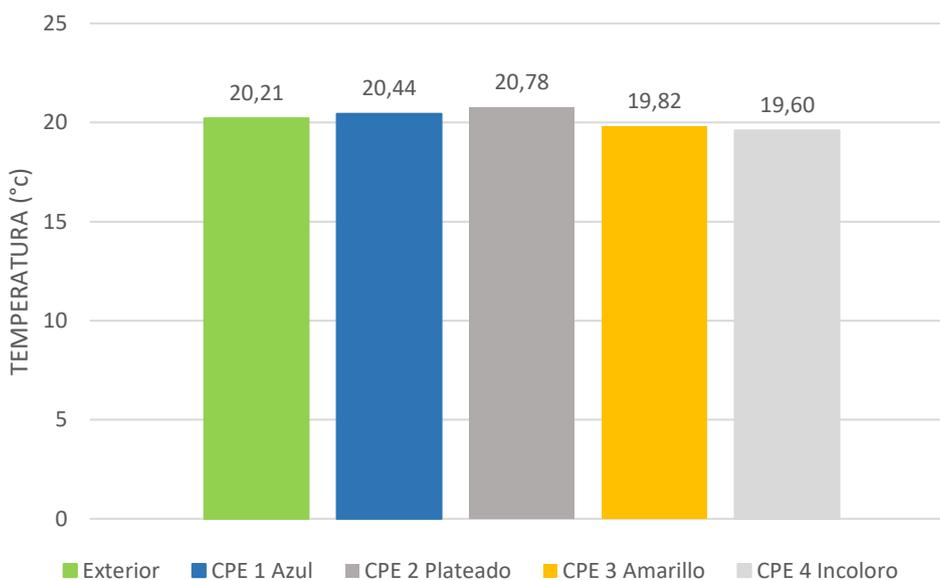
6.3.2 Temperatura

Las siguientes gráficas muestran distintos promedios de temperatura mensuales registrados en el interior de cada invernadero y en el exterior, desde el día 11 de septiembre del 2019 al día 10 de octubre del 2019.

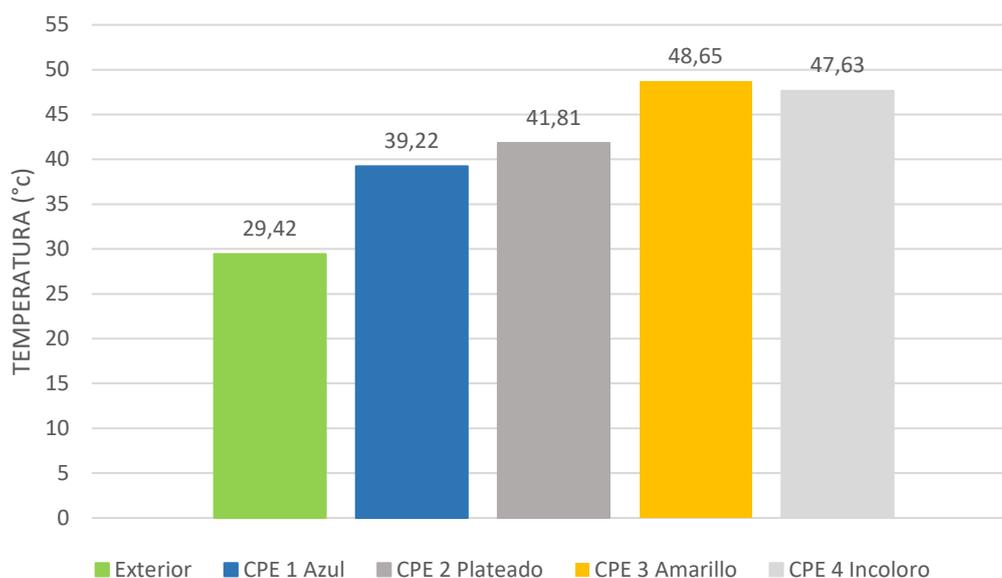
En los ANEXOS aparecen representadas desde día 11 de septiembre del 2019 al 10 de octubre del 2019, la temperatura diaria media, mínima y máxima.



Gráfica 20. Promedio de temperatura (°C) media mensual.



Gráfica 21. Promedio de temperatura (°C) mínima mensual.



Gráfica 22. Promedio de temperatura (°C) máxima mensual.

Tabla 28. Diferencia de temperaturas (°C) promedio registradas en el interior de cada invernadero respecto al exterior.

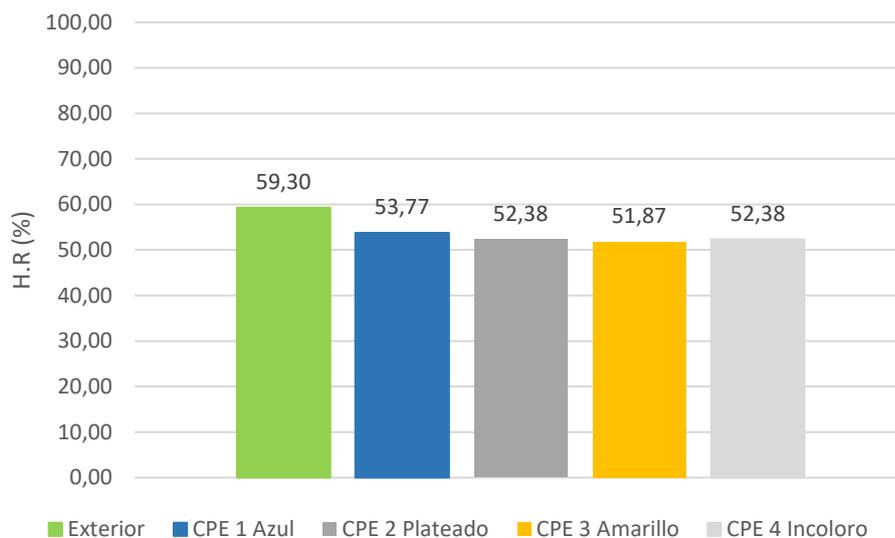
CPE	Temperatura media (°C)	Temperatura mínima(°C)	Temperatura máxima (°C)
1	+ 3,47	+ 0,23	+ 9,8
2	+ 4,09	+ 0,57	+ 12,39
3	+ 4,48	- 0,39	+ 19,23
4	+ 4,36	-0,61	+ 18,21

Dada la escasa ventilación, poco volumen de aire y falta de humedad de los invernaderos, se han alcanzado temperaturas máximas muy altas. La CPE₁ y CPE₂ han sido las que han registrado diferencias de temperaturas máximas mucho más pequeñas, debido a que presentan porcentajes de transmisión PAR y NIR más bajos en comparación con la CPE₄ y CPE₃. García *et al.*, (2006) realizaron un ensayo en la región de Murcia con cubiertas antitérmicas, donde obtuvieron una reducción de las temperaturas máximas de 4,5°C respecto a una cubierta convencional incolora de características similares a la CPE₄.

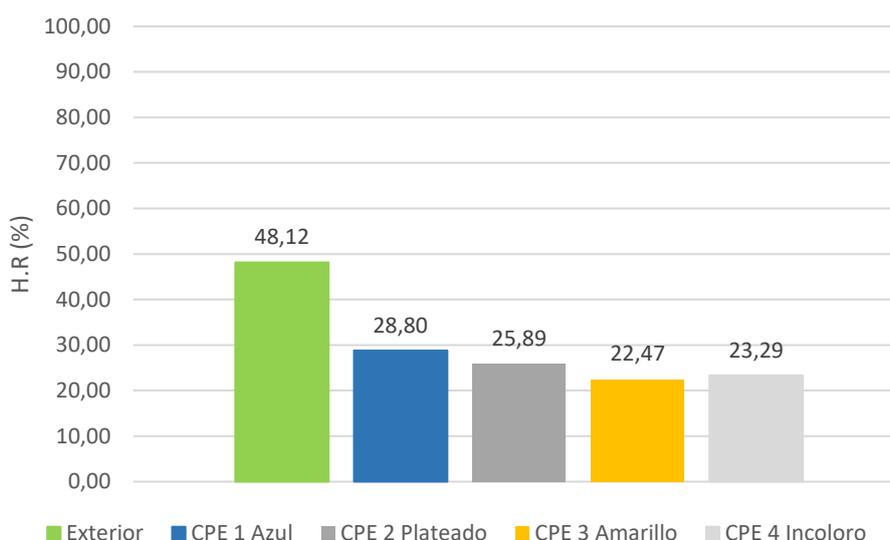
6.3.3 Humedad relativa

Las siguientes gráficas muestran distintos promedios de humedad relativa mensuales registrados en el interior de cada invernadero y en el exterior, desde el día 11 de septiembre del 2019 al día 10 de octubre del 2019.

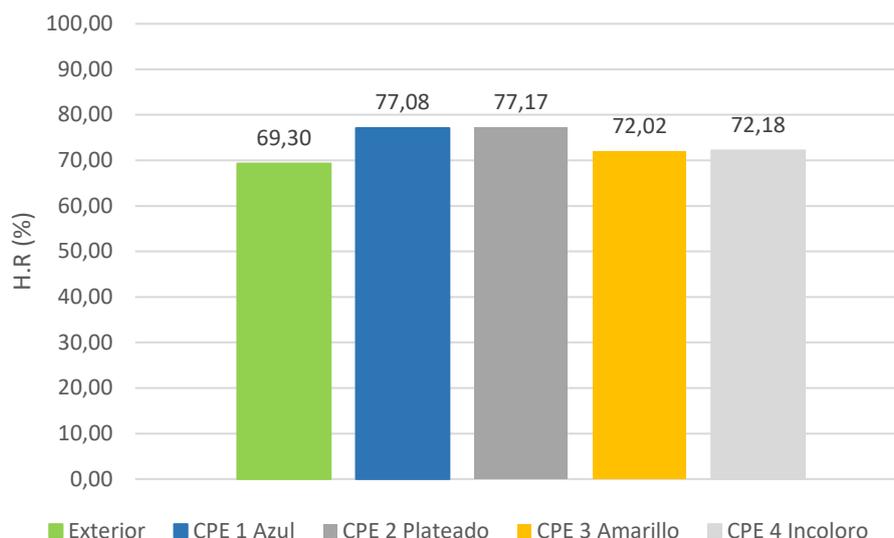
En los ANEXOS aparecen representadas desde día 11 de septiembre del 2019 al 10 de octubre del 2019, la humedad relativa diaria media, mínima y máxima.



Gráfica 23. Promedio de humedad relativa (%) media mensual.



Gráfica 24. Promedio de humedad relativa (%) mínima mensual.



Gráfica 25. Promedio de humedad relativa (%) máxima mensual.

Tabla 29. Diferencia de H.R (%) promedio registradas en el interior de cada invernadero respecto al exterior.

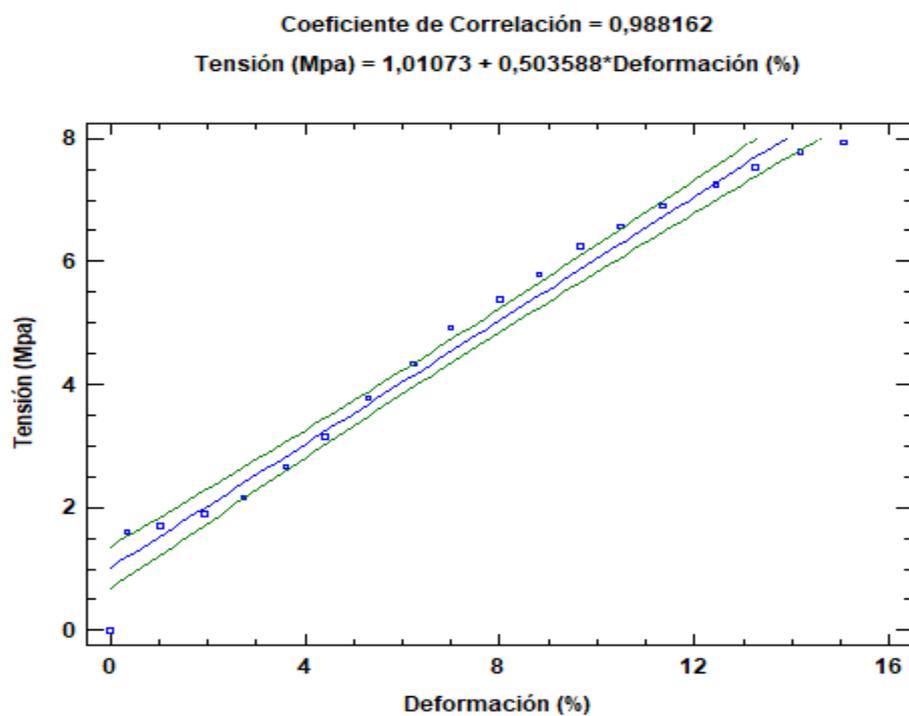
CPE	H.R media (%)	H.R mínima (%)	H.R máxima (%)
1	-5,53	-19,32	+7,78
2	-6,92	-22,23	+ 7,87
3	-7,43	-25,65	+2,72
4	-6,92	-24,83	+2,88

Como era de esperar el menor porcentaje de humedad relativa se encuentra en la CPE₃ y CPE₄, que son aquellas en dónde se han registrado las mayores temperaturas, por el contrario, las CPE₁ y CPE₂ que son las que registran menor temperatura son las que muestran mayores porcentajes de humedad relativa. Estudios similares realizados por González (2010), mostraron resultados semejantes. Los porcentajes de humedad relativa mínimos y máximos son más acusados dentro de todos los invernaderos respecto al exterior debido a que el volumen de aire dentro de ellos es menor y la renovación de aire escasa, ya que la capacidad de ventilación natural está muy limitada.

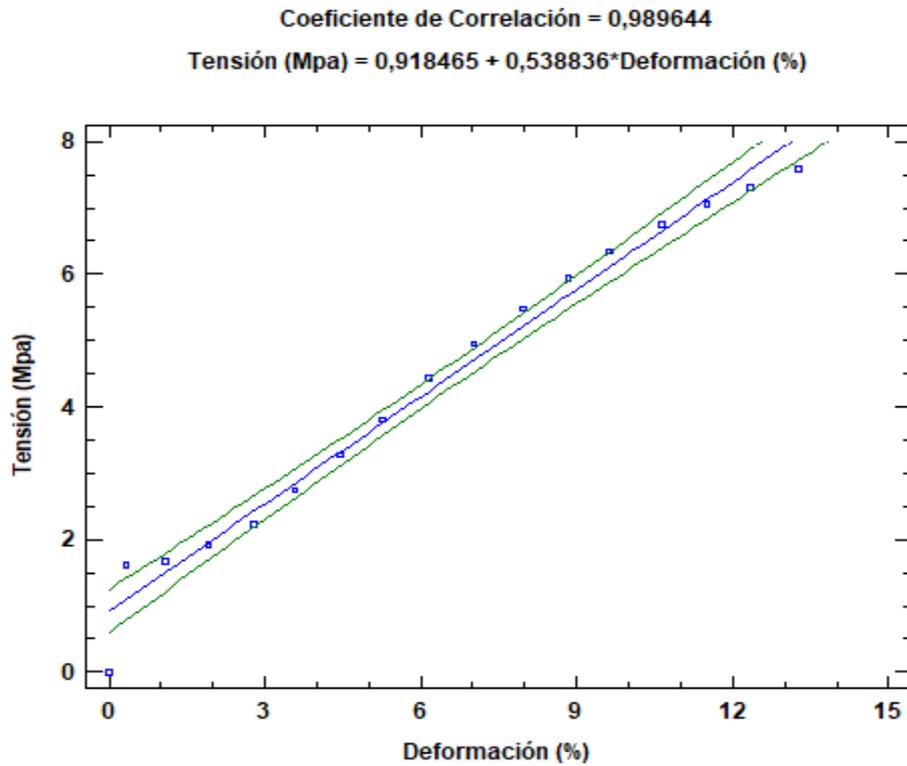
6.4 Relaciones entre distintos parámetros

6.4.1 Relación tensión-deformación

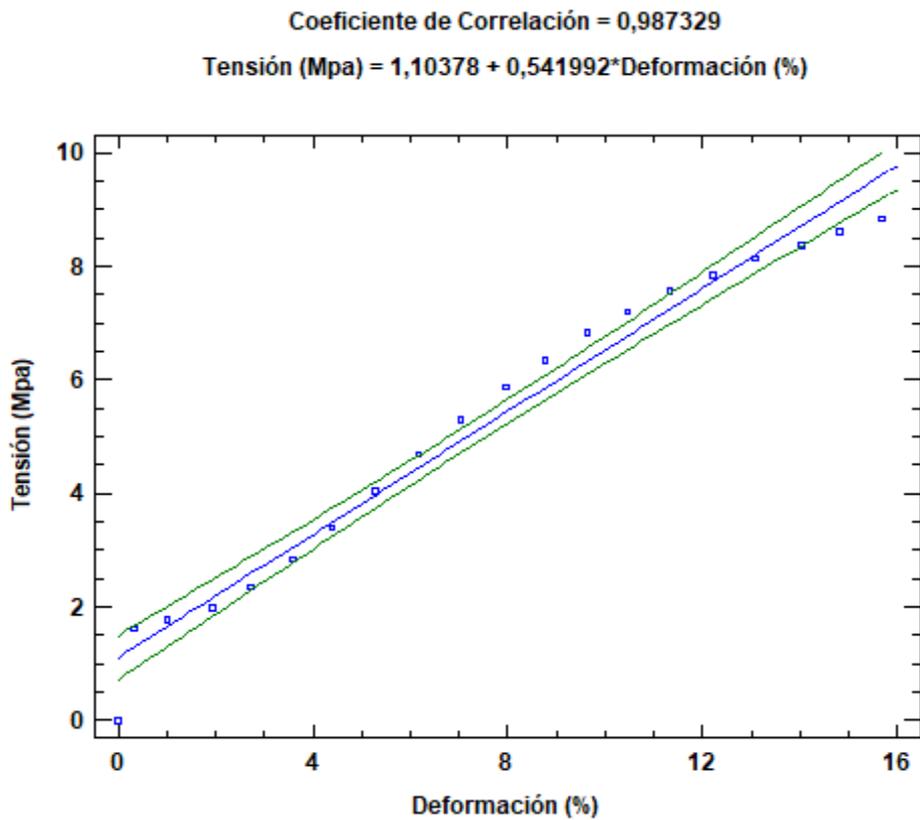
Este apartado muestra como en todas las CPEs analizadas existe una relación lineal positiva estadísticamente significativa (confianza mayor del 95%) dentro del límite elástico de proporcionalidad entre la tensión ejercida y la deformación experimentada en el ensayo a tracción. Esta razón de proporcionalidad es la que determina el módulo de Young, la cual es característica para cada material (Castañeda *et al.*, 2010).



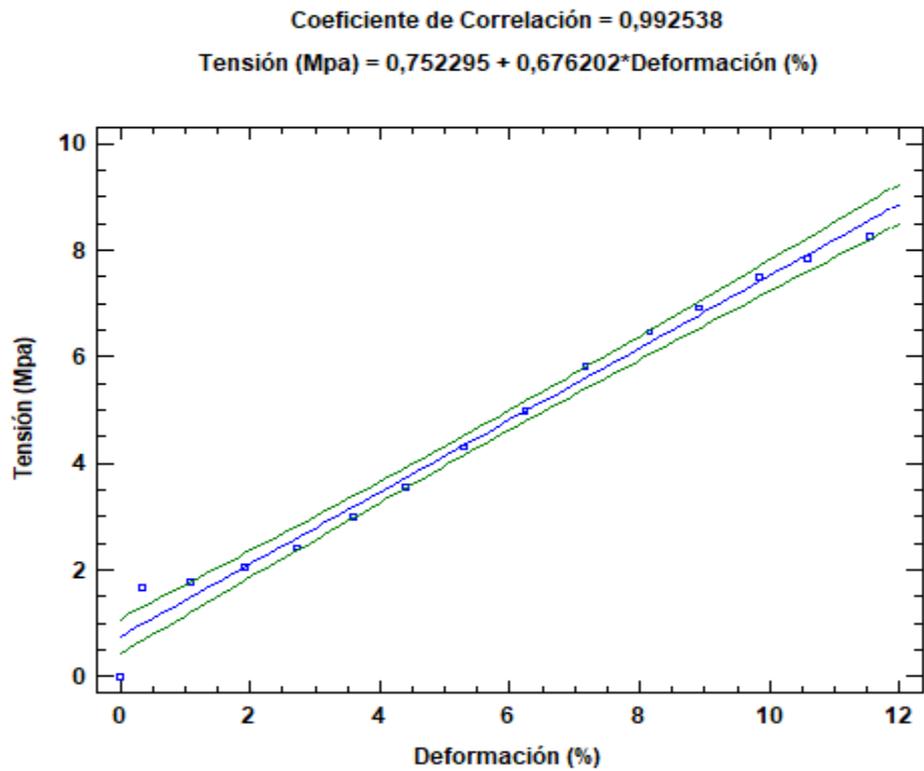
Gráfica 26. Regresión lineal de la CPE₁ (D.L). Media de las 5 probetas analizadas.



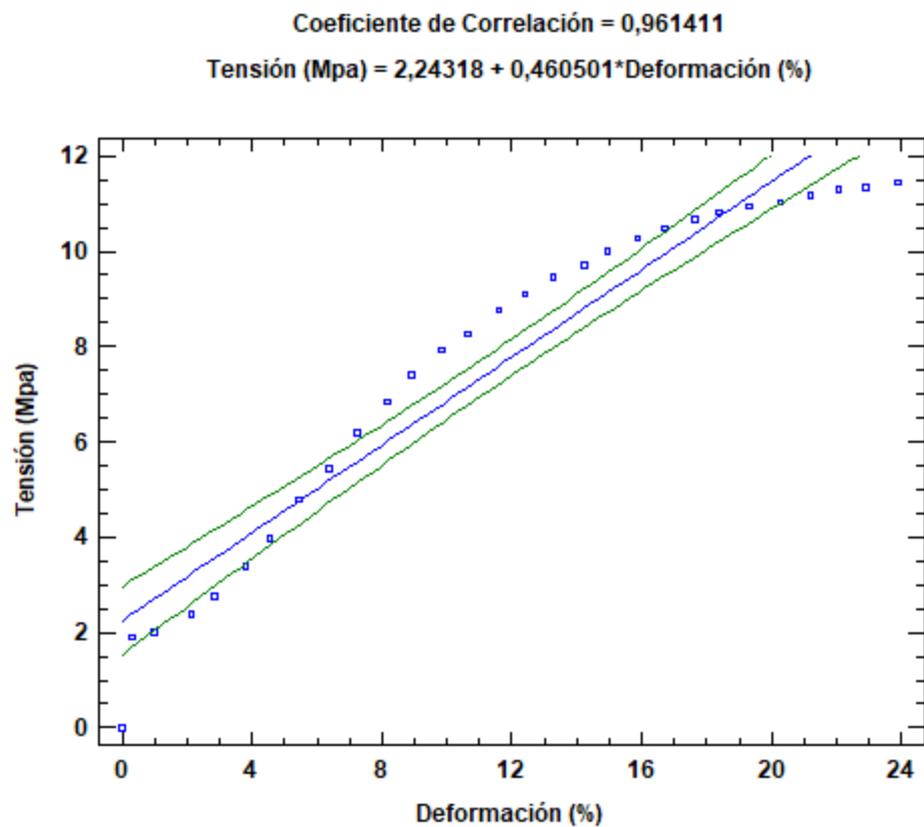
Gráfica 27. Regresión lineal de la CPE₁ (D.T). Media de las 5 probetas analizadas.



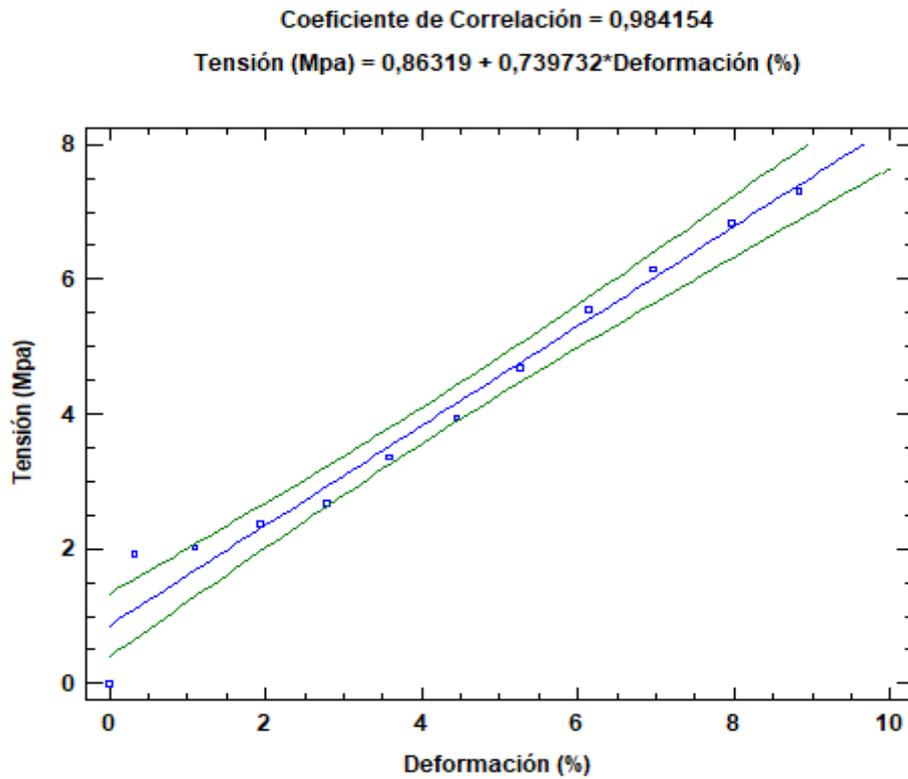
Gráfica 28. Regresión lineal de la CPE₂ (D.L). Media de las 5 probetas analizadas.



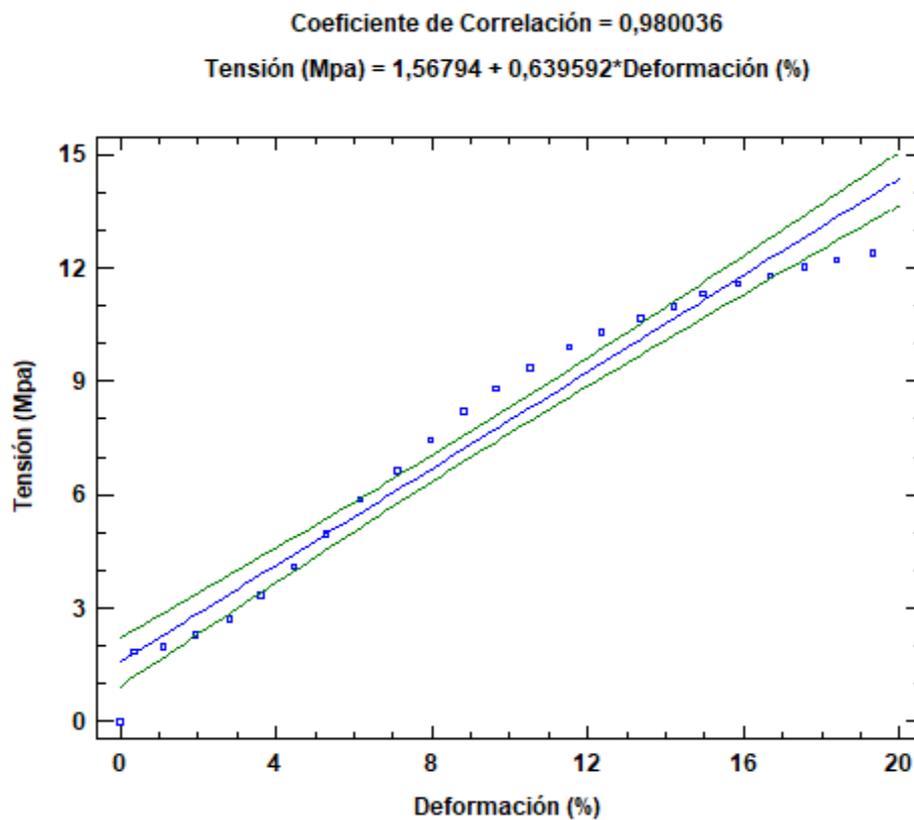
Gráfica 29. Regresión lineal de la CPE₂ (D.T). Media de las 5 probetas analizadas.



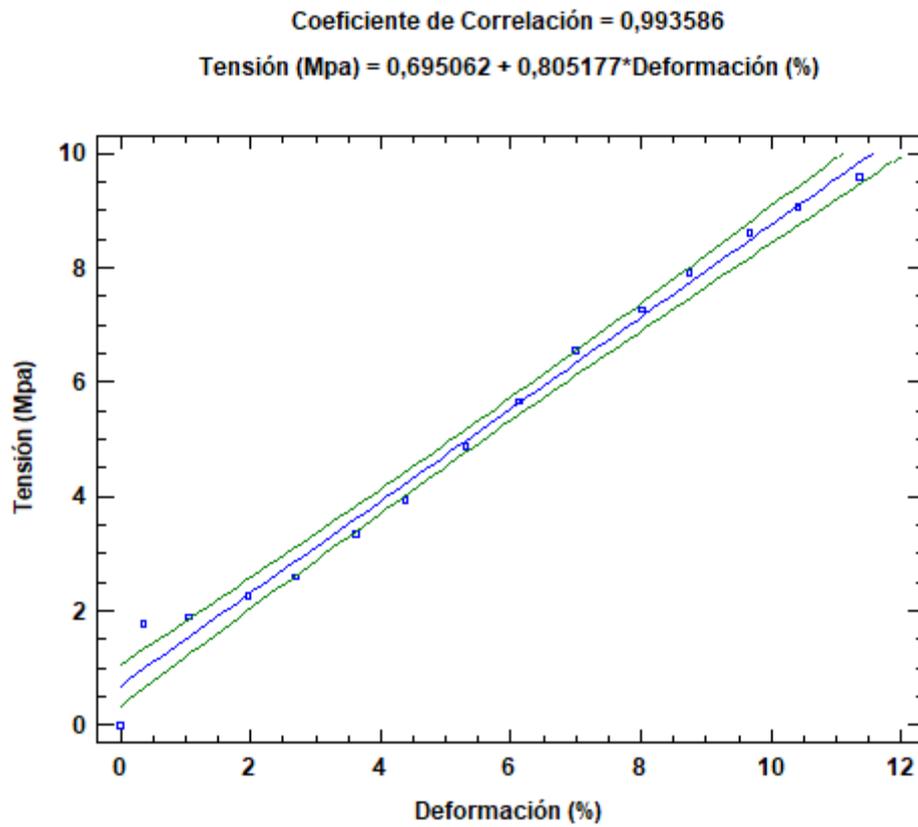
Gráfica 30. Regresión lineal de la CPE₃ (D.L). Media de las 5 probetas analizadas.



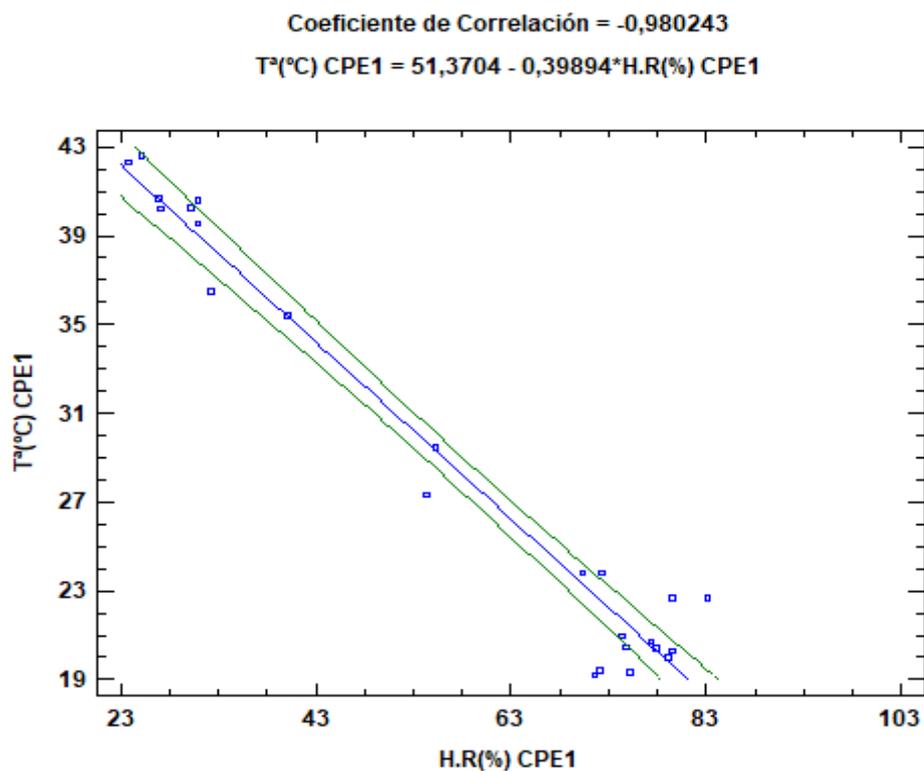
Gráfica 31. Regresión lineal de la CPE₃ (D.T). Media de las 5 probetas analizadas.



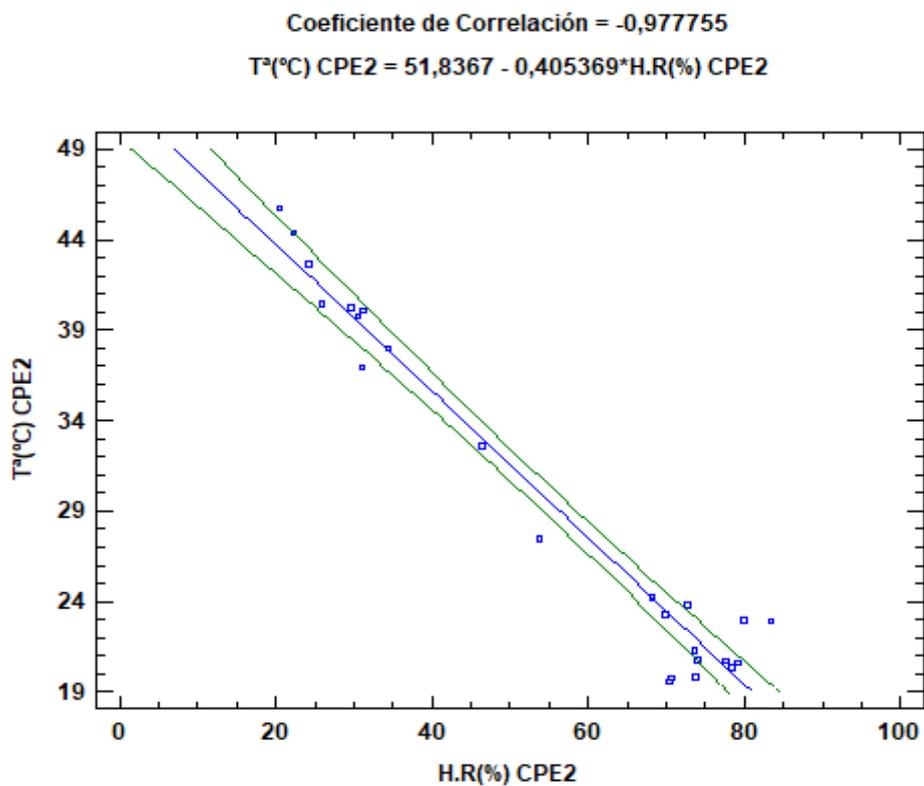
Gráfica 32. Regresión lineal de la CPE₄ (D.L). Media de las 5 probetas analizadas.



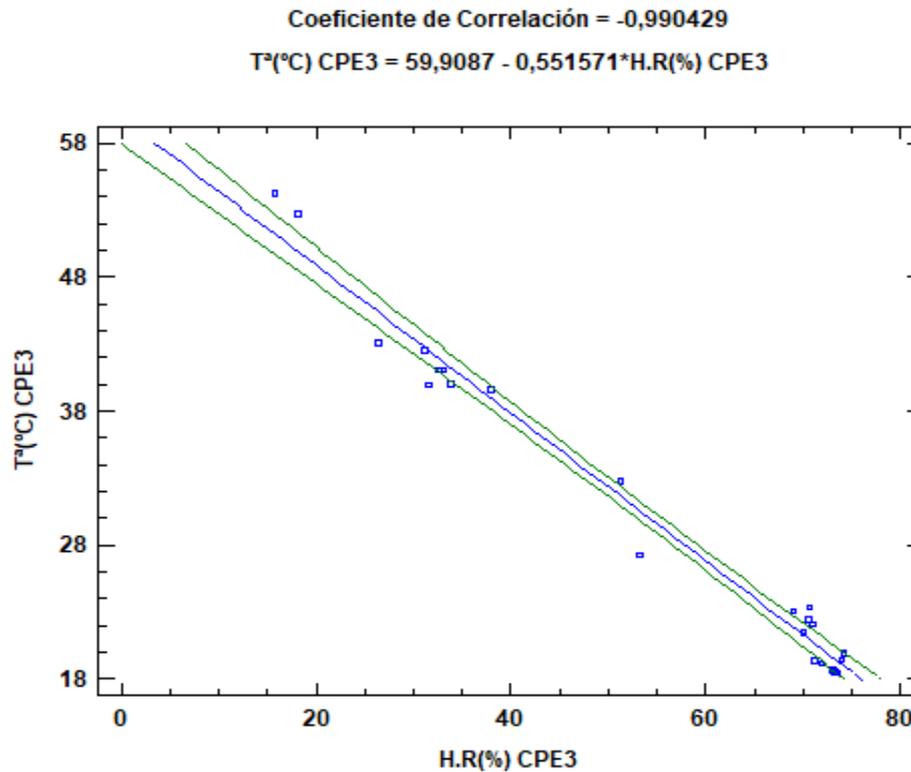
Gráfica 33. Regresión lineal de la CPE₄ (D.T). Media de las 5 probetas analizadas.



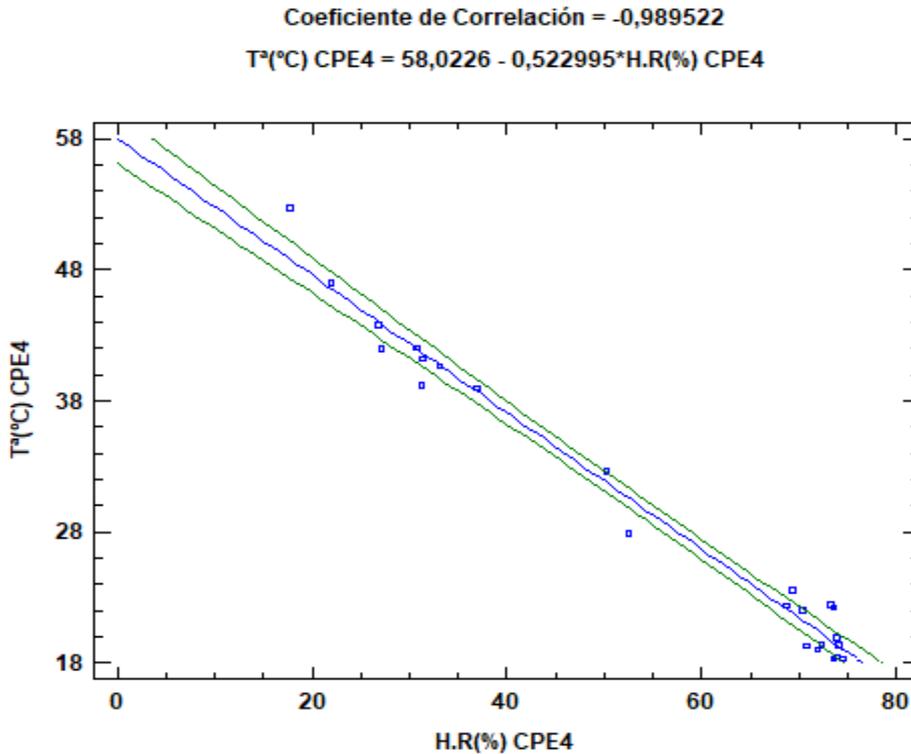
Gráfica 35. Regresión lineal entre la temperatura y humedad relativa registrada en el interior del CPE₁ durante las 24 horas del día 25 de septiembre de 2019.



Gráfica 36. Regresión lineal entre la temperatura y humedad relativa registrada en el interior del CPE₂ durante las 24 horas del día 25 de septiembre de 2019.



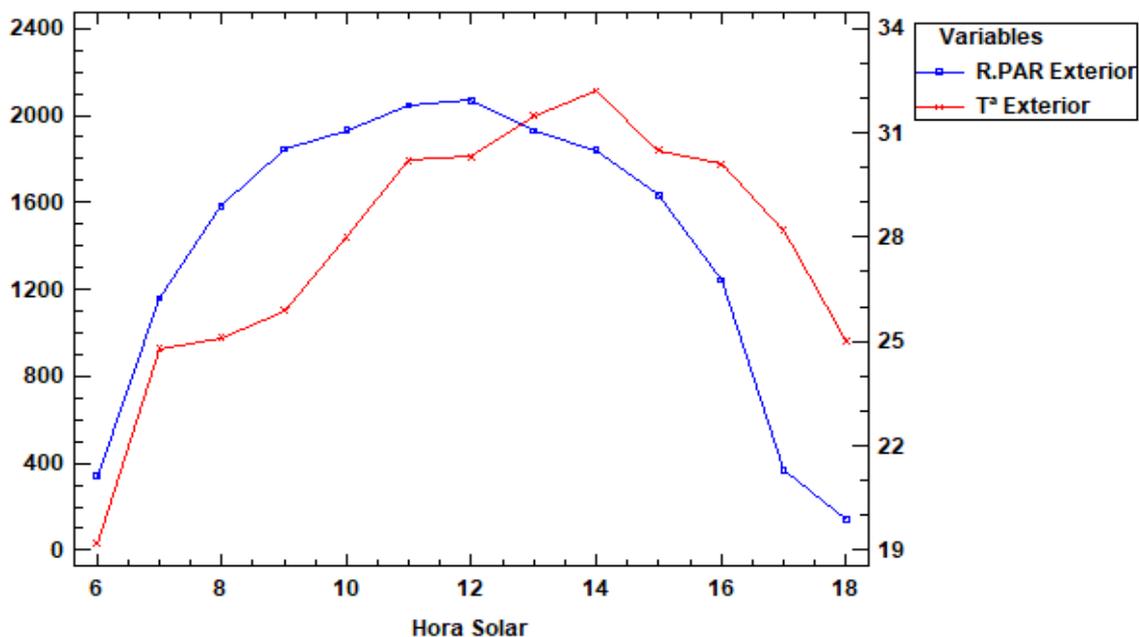
Gráfica 37. Regresión lineal entre la temperatura y humedad relativa registrada en el interior del CPE₃ durante las 24 horas del día 25 de septiembre de 2019.



Gráfica 38. Regresión lineal entre la temperatura y humedad relativa registrada en el interior del CPE₄ durante las 24 horas del día 25 de septiembre de 2019

6.4.3 Relación radiación PAR-temperatura-hora solar.

En este apartado se incluyen las gráficas y regresiones multivariantes realizadas entre la radiación PAR, temperatura y hora solar lo largo de la mañana del día 25 de septiembre de 2019. Tanto en el exterior como en el interior de cada invernadero.



Gráfica 39. Radiación PAR incidente ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Izq. Temperatura($^{\circ}\text{C}$). Drcha. Exterior.

La regresión lineal múltiple realizada para describir la relación entre T^{a} exterior (variable dependiente) y las dos variables independientes (Radiación PAR exterior y Hora solar) muestra los siguientes resultados:

Tabla 30. Análisis de varianza de regresión múltiple en el exterior.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	146,82	2	73,41	57,79	0,0000
Residuo	12,70	10	1,27		
Total (Corr.)	159,53	12			

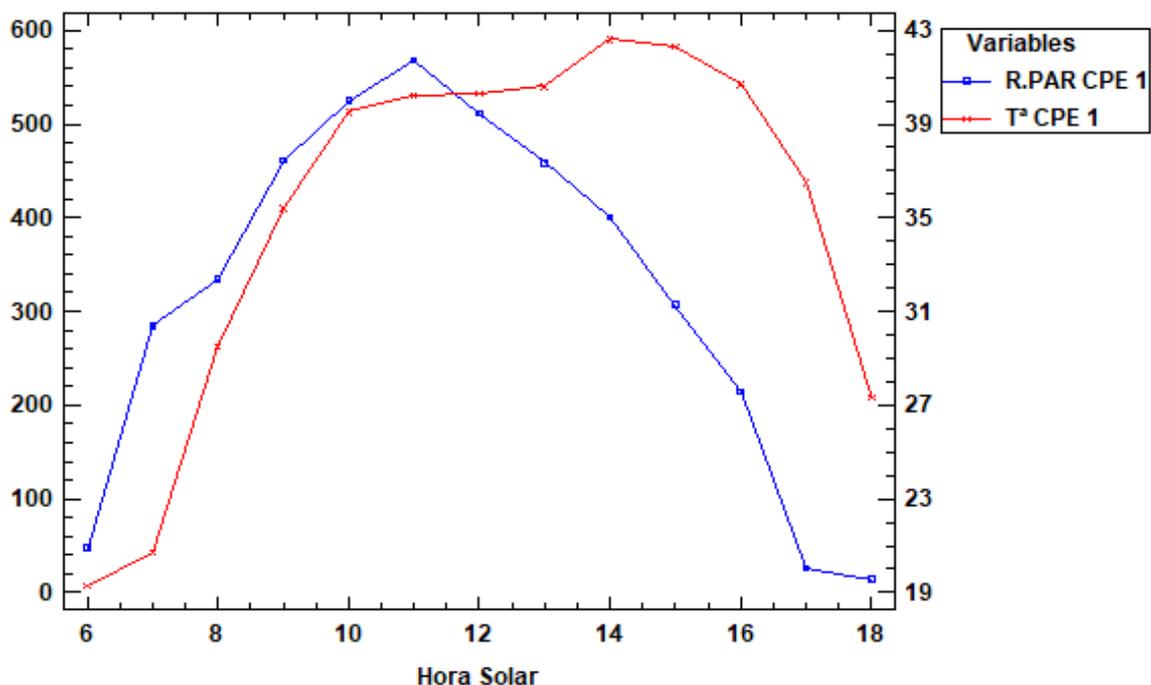
$R^2 = 92,04$

Error estándar del estimado = 1,13

La ecuación del modelo ajustado es:

$$T^{\text{a}} \text{ Exterior} = 13,54 + 0,70 * \text{Hora Solar} + 0,004 * \text{R.PAR Exterior}$$

Puesto que el valor-P de la tabla es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95%.



Gráfica 40. Radiación PAR incidente ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Izq. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$). Drcha. CPE₁.

La regresión lineal múltiple realizada para describir la relación entre Tª CPE₁ (variable dependiente) y las dos variables independientes (Radiación PAR CPE₁ y Hora solar) muestra los siguientes resultados:

Tabla 31. Análisis de varianza de regresión múltiple en la CPE₁.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	672,28	2	336,14	27,80	0,0001
Residuo	120,93	10	12,09		
Total (Corr.)	793,21	12			

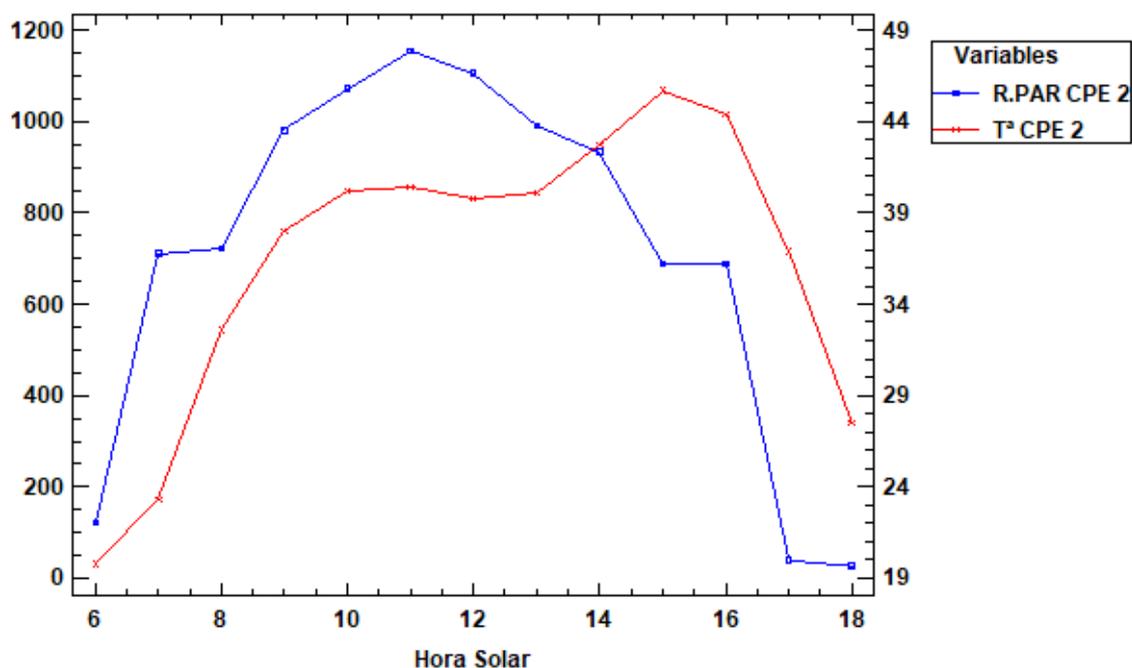
$R^2 = 84,76$

Error estándar del estimado = 3,48

La ecuación del modelo ajustado es:

$$T^{\circ} \text{CPE}_1 = 5,08 + 1,61 * \text{Hora Solar} + 0,033 * \text{R.PAR CPE}_1$$

Puesto que el valor-P de la tabla es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.



Gráfica 41. Radiación PAR incidente ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Izq. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$). Drcha. CPE₂.

La regresión lineal múltiple realizada para describir la relación entre Tª CPE₂ (variable dependiente) y las dos variables independientes (Radiación PAR CPE₂ y Hora solar) muestra los siguientes resultados:

Tabla 32. Análisis de varianza de regresión múltiple en la CPE₂.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	635,86	2	317,93	20,73	0,0003
Residuo	153,40	10	15,34		
Total (Corr.)	789,25	12			

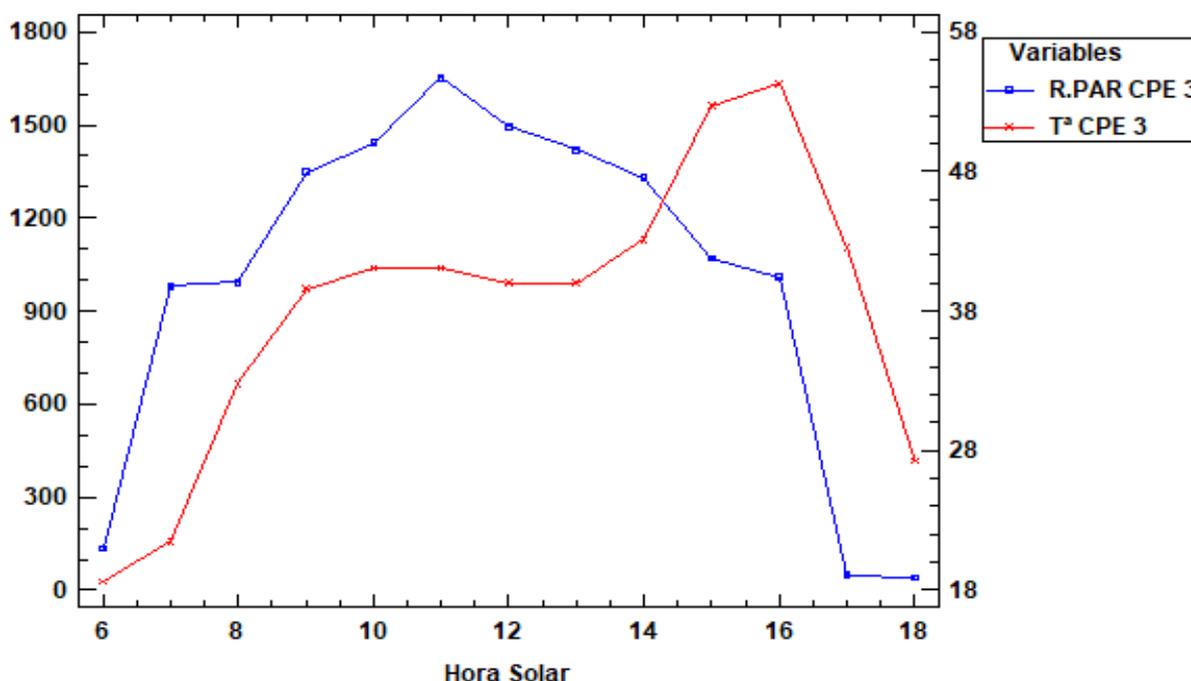
$R^2 = 80,56$

Error estándar del estimado = 3,92

La ecuación del modelo ajustado es:

$$T^{\text{a}} \text{ CPE}_2 = 7,13 + 1,50 * \text{Hora Solar} + 0,016 * \text{R.PAR CPE}_2$$

Puesto que el valor-P en la tabla es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.



Gráfica 42. Radiación PAR incidente ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Izq. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$). Drcha. CPE₃.

La regresión lineal múltiple realizada para describir la relación entre Tª CPE₃ (variable dependiente) y las dos variables independientes (Radiación PAR CPE₃ y Hora solar) muestra los siguientes resultados:

Tabla 33. Análisis de varianza de regresión múltiple en la CPE₃.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	932,48	2	466,24	11,22	0,0028
Residuo	415,46	10	41,55		
Total (Corr.)	1347,93	12			

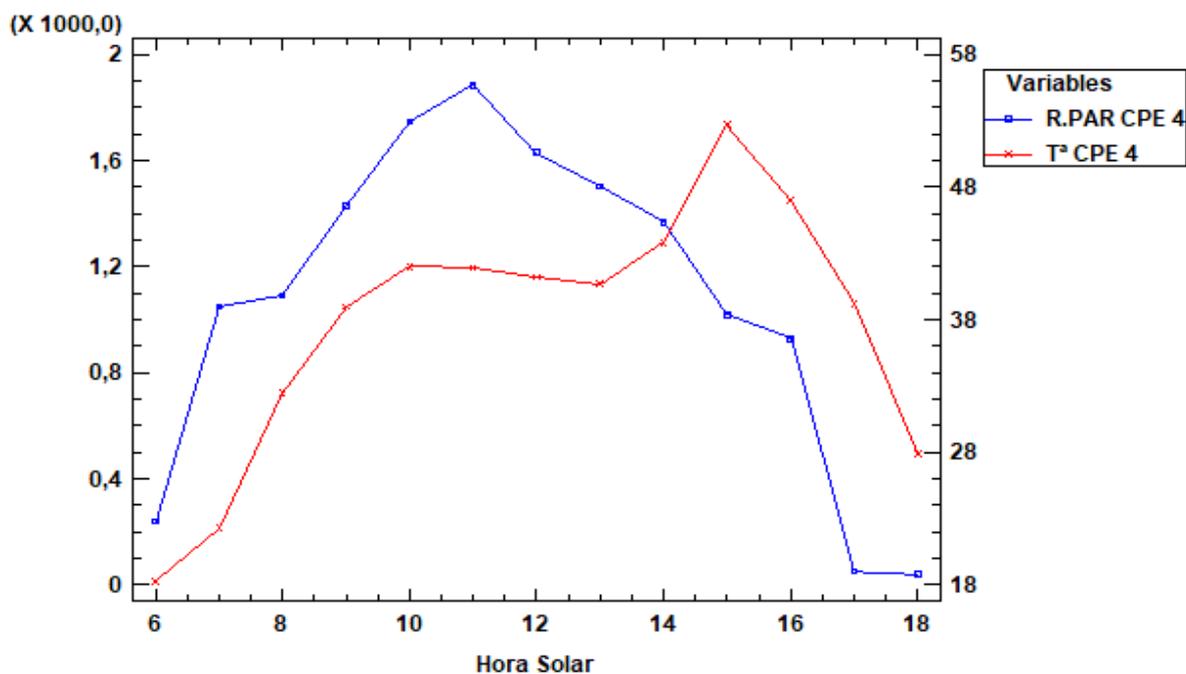
$R^2 = 69,18$

Error estándar del estimado = 6,45

La ecuación del modelo ajustado es

$$T^{\circ}\text{CPE}_3 = 2,78 + 1,98 * \text{Hora Solar} + 0,0116 * \text{R.PAR CPE}_3$$

Puesto que el valor-P en la tabla es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.



Gráfica 43. Radiación PAR incidente ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Izq. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$). Drcha. CPE₄.

La regresión lineal múltiple realizada para describir la relación entre T^a CPE₄ (variable dependiente) y las dos variables independientes (Radiación PAR CPE₄ y Hora solar) muestra los siguientes resultados:

Tabla 34. Análisis de varianza de regresión múltiple en la CPE₄.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	854,13	2	427,07	14,61	0,0011
Residuo	292,29	10	29,23		
Total (Corr.)	1146,42	12			

$R^2 = 74,50$

Error estándar del estimado = 5,41

La ecuación del modelo ajustado es:

$$T^a \text{ CPE}_4 = 2,59 + 1,91 * \text{Hora Solar} + 0,011 * \text{R.PAR CPE}_4$$

Puesto que el valor-P en la tabla es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

7. CONCLUSIONES

- La adición del pigmento color azul en la composición de la CPE₁ provoca una reducción considerable en la transmisión de todos los espectros, manifestándose claramente en una disminución de las temperaturas máximas respecto a las otras cubiertas.
- El aditivo antitérmico empleado en la CPE₂ no ha conseguido el efecto deseado, ya que reduce por igual tanto la transmisión PAR como la NIR.
- Ninguna CPE ha conseguido una ratio PAR/NIR mayor de 1.
- Los aditivos fotoestabilizadores HALS bloquean de manera más eficiente la radiación UV-A en comparación con los del tipo Niquel Quenchers, ya que permiten una transmisión más temprana de la PAR.
- Las CPEs presentan porcentajes de difusión de luz relativamente aceptables ya que ninguna dispone en su composición de un aditivo específico para tal finalidad.
- El ensayo a tracción demuestra que todas las CPEs se comportan como un material blando y tenaz tanto en dirección longitudinal como transversal, manifestando dentro del límite elástico de proporcionalidad, una relación lineal entre tensión y deformación la cual define el módulo de Young. También queda reflejado como la orientación de las cadenas poliméricas influyen en la resistencia y deformación a la rotura, así como en otros parámetros registrados.
- Cuanto mayor es el espesor de la cubierta mayor es el peso necesario para producir una rotura por impacto.

8. RECOMENDACIONES

En línea con este proyecto experimental se aconseja:

- Realizar futuros ensayos donde se examine la respuesta de diferentes cultivos hortofrutícolas y ornamentales bajo las cubiertas experimentales aquí vistas y posteriormente en invernaderos con mayores dimensiones que permitan aproximarse a un modelo más real.
- Optimizar sus características mediante cambios en su composición y realizar estimaciones de costo de producción y viabilidad en el mercado.
- Realizar análisis ópticos y mecánicos durante la vida de la cubierta, para evaluar la pérdida propiedades a causa de los factores ambientales, químicos y biológicos a las que se exponen.

En definitiva, continuar con la investigación y experimentación, en busca de mejoras agronómicas que permitan un desarrollo productivo, sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

9. BIBLIOGRAFÍA

Abdel, A., Al-Helal, I. y Alzahrani, S. (2012). Covering materials incorporating radiation-preventing techniques to meet greenhouse cooling challenges in arid regions. *The Scientific World Journal*. 1, 1-11. [http:// DOI: 10.1100/2012/906360](http://DOI:10.1100/2012/906360).

Abreu, P. E. y Meneses, J. F. (1994). Climatic characterization of two plastic covered greenhouses under different natural ventilation methods, with a cold season tomato crop. *Acta. Horticulture*. 366, 195-200. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1994.366.23>

Acceso a Datos de Radiación Solar en España (ADRASE). (2020). *Irradiación solar global horizontal*. http://www.adrase.com/adrasemaps/php/monthly_popup.php?lat=36.8&lon=-2.7&var_tipe=0.

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). (2018). *Meteoroglosario*. https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/485_humedad-relativa.

Almanza Montero, O. A. (2001). Polímeros espumados con base de polietileno y copolímero etileno acetato de vinilo: generalidades y estructura celular. *Revista de Física*. 23, 1-20. <http://dx.doi.org/10.15446/mo>.

Alpí, A. y Tognoni, F. (1999). *Cultivo en invernadero*. Madrid: Mundi-Prensa.

Antignus, Y., Mor, N., Joseph, R.B, Lapidot, M., Cohen, S. (1996). Ultraviolet-absorbing plastic sheets protect crops from insect pests and from virus diseases vectored by insects. *Environmental entomology*. 25, 919-924.

Arbolí, M. I. (2000). Los plásticos como cubierta de invernaderos y túneles. *Revista Plasticulture*. 119, 15-25.

Artiaga, R., Mier, J.L y Varela, A. (1996). *Elementos estructurales con materiales polímeros*. Ferrol, A Coruña: universidad da Coruña.

Bagdonavičienė, A., Brazaitytė, A., Jankauskienė, J., Vaštakaitė, V. y Duchovskis, P. (2015). Effect of the photosynthetic photon flux density of industrial light-emitting diode lamps on assimilative indices in salad and vegetable transplants. *Žemes Ukio Mokslai*. 22 (4), 173-180.

Baille, A. (1999). Greenhouse structure and equipment for improving crop production in mild winter climates. *Acta. Horticulture*. 491, 31-47. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1999.491.4>

Batschauer, A. (1998). Photoreceptors of higher plants. *Planta*. 206 (4), 479-492. <https://doi.org/10.1007/s004250050425>

Bastida, T. A., y Ramirez, J. A. (2002). *Invernaderos en México: diseño, construcción y manejo*. México: Agribot.

Bernat, C. J., Martínez, J. y Vitoria, A. (1990). *Invernaderos: construcción, manejo y rentabilidad*. Barcelona: Aedos.

Briassoulis, D., Waaijenberg, D., Gratraud, J., Von Elsner, B. (1997). Mechanical properties of covering materials for greenhouse. Part 2: quality assessment. *Journal of Agricultural Engineering*. 67, 171-217. <https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0155>

Callister, W. (2007). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Barcelona: Reverté.

Castañeda, H., Reyes, M., Graciela, M., Zitzumbo, R., Sánchez, J., Alonso, S. (2010). Análisis del módulo elástico y resistencia a la ruptura en mezclas de nanocompuestos de ABS/TPU. *Rev. Conciencia Tecnológica*. 39, 5-11.

Castilla Prados, N. (2004). *Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo*. Madrid: Mundi-Prensa.

Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural. Junta de Andalucía (2018). *Cartografía de invernaderos en Almería, Granada y Málaga*. https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/Cartografia%20inv_AL_GR_MA_180725.pdf

COTEC. (2009). *Invernaderos de plástico*. Madrid: fundación COTEC para la innovación tecnológica.

Del Ángel-Hernández, M., Zermeño-González, A., Melendres-Alvarez, A., Campos-Magaña, S., Cadena-Zapata, M., Bosque-Villareal, G. (2017). Características de la cubierta de un túnel efecto en radiación, clorofila y rendimiento de calabacita. *Rev. Mex. Cienc. Agrí.* 8(5), 1127-1142.

Deltour, J. y Niesen, A. (1986). Considérations pratiques sur la transmission du rayonnement solaire et de la chaleur pour les matériaux utilisés en serres comme couverture, ombrage et écran thermique. *IRSIA*.

Degarmo, E., Black, J. y Kohser, R. (2003). *Materials and processes in manufacturing*. New York, USA: John Wiley & Sons. 9th

Díaz Serrano, T. (2000). Plásticos, cubiertas a medida para invernaderos. *Rev. Horticultura*. 1, 138-143.

Garzón, E., Ortiz, M., Castillo, J., Rojano, A., Sánchez, P. (2017). Modelización del proceso de envejecimiento natural de un material polimérico utilizable como cubierta de invernaderos. *Rev. Latín. Am. Metal. Mat.* 37(1), 60-82.

Esrig Rondan, C. (2018). *Extrusión de film soplado*. Valencia, España: AIMPLAS instituto tecnológico del plástico.

Espí, E. y García, Y. (2009). *Invernaderos de plástico*. Madrid: Imprenta gráficas Arias Montano

Espí, E., Salmerón, A., García, Y. y Catalina, F. (2002). Pigmentos de inferencia como modificadores del espectro de transmisión de filmes agrícolas. *Revista de plásticos modernos*. 83, 50-56.

Estación Meteorológica de Almería/Aeropuerto. (2020). *Registro de históricos METAR en estación meteorológica: Icao (OACI): LEAM*. <https://www.tutiempo.net/clima/ws-84870.html>

FAO (2009). *La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050. Foro de expertos de alto nivel*. Roma: Italia, 12-13. http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf

Florián, M. P., Bimbo, B. (1992). Materiales plásticos para cubiertas de invernadero. *Rev. Horticultura*. 79, 13-23.

Gálvez, A., López-Marín, J., Benavente-García, A., (2007). *Uso de cubiertas en invernaderos con materiales plásticos fotoselectivos para variar la temperatura interior*. La Alberca, Murcia: Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario (IMIDA).

Global Solar Atlas (2017). *The World Bank, Solar resource data: Solargis*. <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/world>

Godoy Arias, D. H. (2007). *Análisis de películas utilizadas en invernadero*. Guayaquil, Ecuador: Escuela Politécnica Superior del Litoral.

González Argandar, C. (2010). *Evaluación agronómica de películas para invernadero formuladas con nanopartículas de óxido de Zinc*. Saltillo, Coahuila, México: Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA).

González López, J. (2003). Respuesta del tomate de industria a los plásticos biodegradables. *Rev. Vida Rural*. 162, 46-49.

García, A., Gonzalez, A., López, J. (2006). New cool plastic films for green house covering in tropical and subtropical areas. *Acta Hort*. 719, 131-137. [http:// DOI: 10.17660/ActaHortic.2006.719.12](http://DOI:10.17660/ActaHortic.2006.719.12)

García Gonzalo, A. M. (1995). La plasticultura en España. *Rev. Horticultura*. 102, 32-33.

Guzmán, P. M. (2000). *Respuesta fisiológica y control ambiental*. Guadalajara, Jalisco, México: Instituto Nacional de Capacitación para la Productividad Agrícola (INCAPA, S.C).

Hemming, S. (2008). Materiales difusos para cubiertas de invernadero no solamente para climas cálidos. *Revista Plasticulture*. 127, 25-39.

Hemming, S., Kempkes, F., Van der Braak, N., Dueck, T. y Marissen, N. (2006). Green house cooling by NIR-reflection. *Acta Hort*. 719, 97-105. [http:// DOI: 10.17660/ActaHortic.2006.719.8](http://DOI:10.17660/ActaHortic.2006.719.8)

Hernández, J., Escobar, I. y Castilla N. (2001). La radiación solar en invernaderos mediterráneos. *Rev. Horticultura*. 157, 18-27.

Huertas, L. (2008). El control ambiental en invernaderos: humedad relativa. *Rev. Industria Hortícola, tecnología de producción*. 205, 52-54.

Ibarra, J.L. (1997). *Acolchado de suelos*. Saltillo, Coahuila, México: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Ilić, Z., Milenković, L., Šunić, L., Barać, S., Mastilović, J., Kevrešan, Ž. y Fallik, E. (2017). Effect of shading by coloured nets on yield and fruit quality of sweet pepper. *Žemdirbystė (Agriculture)* 104, 53-62.

Jones, G. H. (1992). *Plants and microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology*. Cambridge, Great Britain: Cambridge university press: 428. Second Edition.

Kittas, C., Boulard, T., Mermier, M., Papadakis, G. (1996). Wind induced air exchange rates in a greenhouse tunnel with continuous side opening. *J Agric. Eng. Res.* 65 (1), 37-49. [http:// DOI: 10.1006/jaer.1996.0023](http://DOI: 10.1006/jaer.1996.0023).

Larsen, S., Hernández, A., Lesino, G. (2003). Transmitancia de materiales fotoselectivos para cubiertas de invernaderos. *Rev. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 7(2), 49-54.

Lin, C. (2000). Plant blue-light receptors. *Trends Plant Sci.* 5(8), 337-342. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(00\)01687-3](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(00)01687-3)

López Hernández, J. C. (2016). *Materiales de cubierta para invernadero y su eficiencia energética*. Barcelona: Fundación CAJAMAR.

López-Maestresalas, A. (2016). *Near-infrared spectroscopy and hyper spectral imaging for non-destructive quality inspection of potatoes*. Pamplona, Navarra: universidad pública de Navarra.

López-Marín, J., González, A., García Alonso, Y. (2008). Use of cool plastic films for green house covering in Southern Spain. *Acta hort.* 801, 181-186.

Mahdiyah, D. y Mukti, B. H. (2013). Isolation of polyethylene plastic degrading-Bacteria. *Bioscience. Int* 2, 29-32.

Martínez Ramírez, J. N. (2008). *Uso de diferentes cubiertas plásticas en invernadero para mejorar los efectos de radiación, temperatura y humedad relativa*. Saltillo, Coahuila, México: Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA).

Matallana, A. y Montero, J. I. 1995. *Invernaderos. Diseño, construcción y ambientación*. Madrid: Mundi-Prensa.

Meca Abad, D. E (2012). *Evaluación de un plástico fotoselectivo NIR como material de cubierta de invernadero*. Almería: Universidad de Almería.

Meteoblue. (2020). *Datos meteorológicos históricos (1989-2019)*. https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/almer%3%ada_espa%3%b1a_2521886

Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. (2008). *Estadísticas agrarias*. <https://www.interempresas.net/Agua/Articulos/28816-Espana-dispone-de-66000-hectareas-de-superficie-de-cultivos-en-invernaderos-de-plastico.html>

Moens, F. (1991). The use of Surface-active additives as anti-fog agents in agricultural films. In: *Proc. Nat. Agric. Plastics Congress American Society for Plastics*. Mobile, Alabama, U.S.A, 188-195.

Muñoz Escalona, A. (1999). *Los catalizadores metalocénicos en la producción de polímeros*. Valencia: Instituto Tecnológico del Envase, Embalaje y Transporte (ITENE).

Norma ASTM D1003. (2013). *Standard test method for haze and luminous transmittance of transparent plastics*. ASTM International, West Conshohocken: U.S.A.

Norma UNE-EN 2155-5. (1992). *Material aeroespacial. Métodos de ensayo de materiales transparentes para acristalamiento de construcciones aeroespaciales. Parte 5: medida de la transmisión de luz en la zona visible*. AENOR, Madrid: España.

Norma UNE-EN 2155-9. (1992). *Material aeroespacial. Métodos de ensayo de materiales transparentes para acristalamiento de construcciones aeroespaciales. Parte 9: determinación de la turbiedad*. AENOR, Madrid: España.

Norma UNE-EN ISO 7765-1. (2005). *Películas y láminas de plástico. Determinación de la resistencia al impacto por el método de caída de dardo. Parte 1: Método de la escalera*. AENOR, Madrid: España.

Norma UNE-EN ISO 527-1. (2012). *Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Principios generales*. AENOR, Madrid: España.

Norma UNE-EN ISO 527-3. (2019). *Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 3: condiciones de ensayo para películas y hojas*. AENOR, Madrid: España.

Norma UNE-EN 13206. (2017). *Plásticos. películas termoplásticas para cubiertas para su utilización en agricultura y horticultura*. AENOR, Madrid: España.

Oliveira, C., Vierira, L., Bertolli, C. y Pacheco, C. (2016). Photosynthetic behavior, growth and essential oil production of *Melissa officinalis* L. cultivated under colored shade nets. *Chilean J. Agric. Res.* 76 (1), 123-128. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392016000100017>.

Ordaz Baldera, J. F. (2007). *Estudio sobre películas plásticas para invernadero*. Saltillo, Coahuila, México: Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA).

Orden, S., Goldberg, M., Quartino, R., Mascarini, L., Landini, A., Malleville, H., y Bottini, L. (2000). Comparative study between natural exposition trial and accelerated

ageing of polyethylene films for greenhouses. *Agric. Téc.* 60, 295-304.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072000000300010>

Orden, S., Mascarini, L., Goldberg, M. y Sierra, E. (1997). Luz transmitida y dispersada por materiales para coberturas de invernaderos. *Revista de la Facultad de Agronomía, UBA.* 17(2), 177-180.

Orzolek, M. (2017). *A guide to the manufacture, performance and potencial of plastics in agriculture.* Oxford, U.K: Elsevier.

Palma Pérez, A. (2009). *Evaluación de las propiedades ópticas y mecánicas de diferentes cubiertas plásticas de invernadero.* Saltillo, Coahuila, México: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Panwar, N. y Rathore, N. (2007). *Renewable energy sources for sustainable development.* New Delhi, India: New Indian Publish Agency.

Pillajo Sinailin, J. P. (2017). *Evaluación de la incorporación de un masterbatch con efecto antitérmico en las propiedades de películas sopladas de polietileno de baja densidad.* Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18968>

Rabobank (2018). *World Vegetable Map 2018.*<https://fruittoday.com/espana-es-el-segundo-pais-del-mundo-en-superficie-de-invernaderos/>

Rodríguez, M., Castro, L y Del Real, J. (2010). *Procesos industriales para materiales no metálicos.* Toledo: Visión Net Grupo Editor

Ruiz, P., Sanders, B., Vulic, I., Zenner, J. (2004). Estabilización ultravioleta de películas de invernadero, experiencia de un proveedor de aditivos. *V Congreso Iberoamericano para el Desarrollo y Aplicación de Plásticos en la Agricultura (CIDAPA) 2004:* 55-62.

Samaniego, C.E., Quezada, M. R., De la Rosa, I. M., Munguia, L. J., Benavides, M. A., Ibarra, J. L. (2002). Tomato and bell pepper seedlings production under reflecting polyethylene covers to decrease temperature in greenhouse. *Rev. Agrobiencia.* 36(3), 305-318.

Sandri, M., Andriolo, J. L., Witter, M. y Dal Ross, T. (2003). Effect of shading on tomato plants grow under greenhouse. *Hortic. Bras.* 21 (4), 642-645. [http:// DOI: 10.1590/S0102-05362003000400013.](http://DOI:10.1590/S0102-05362003000400013)

Sangpradit, K. (2014). Study of the solar transmissivity of plastic cladding materials and influence of dust and dirt on greenhouse cultivations. *Energy Procedia.* 56, 566-573.
[https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.194.](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.194)

Schwartz H., Shachar, A., Kafrit I. (2005). *Absorbentes IR para filmes agrícolas. Memorias del 4º congreso europeo de aditivos y colores.* Alemania.

Serope, K. y Steven, R.S. (2002). *Manufacturing, Engineering and Technology.* Upper Saddle River, New Jersey, U.S.A: Prentice-Hall Inc. Fourth edition.

Shackelford, J.F. (2009). *Introduction materials science for engineers*. U.S.A: Library of Congress Cataloging Publication. Seventh Edition.

Smith, H. (2000). Phytochromes and light signal perception by plants an emerging synthesis. *Nature*. 407, 585-591. [http:// DOI: 10.12691/aees-1-6-6](http://DOI:10.12691/aees-1-6-6).

Smith, H y Whitelam, G. (1997). The shade avoidance syndrome: multiple responses mediated by multiple phytochromes. *Plant, cell and environment*, 20, 840-844. [http:// DOI: 10.1046/j.1365-3040.1997.d01-104.x](http://DOI:10.1046/j.1365-3040.1997.d01-104.x)

Smith, W.F. and Hashemi, J. (2006) *Foundations of Materials Science and Engineering*. New York: McGraw-Hill Higher Education. 4th Edition.

Soler, A. (2010). Aplicación de los plásticos antiplagas en los invernaderos hortícolas. *Horticom News*, periódico digital sobre la industria y el comercio hortícola.

Soler, A., Van Der Blom, J., Cabello, T. (2005). *Efectos de cubiertas de invernadero UV absorbentes en el comportamiento de polinizadores (Bombus terrestris y Apis mellifera: Hymenoptera, Apidae) en condiciones de bio-ensayo*. Actas IV congreso nacional de entomología aplicada. Bragança: 93.

Splittstoesser, W. E., Brown, J.E. (1991). *Current Changes in Plasticulture for Crop Production*. In: Proc. Nat. Agric. Plastics Congress. Amer. Soc. for Plast. Mobile. 241-253.

Urbano Terrón, P. (2010). *Tratado de fitotecnia general*. Madrid: Mundi-Prensa. Segunda Edición.

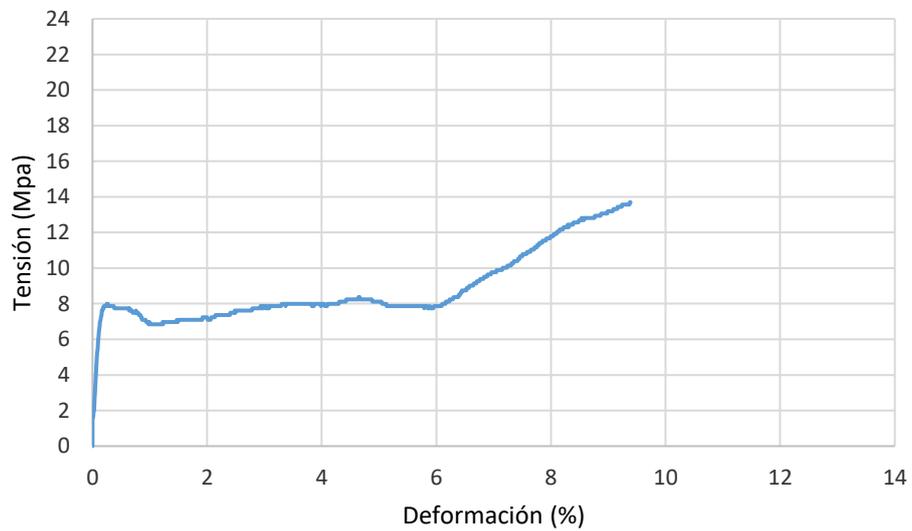
Ventura González, M. (2002). *Transformación de materiales plásticos por extrusión*. Valencia: Instituto Tecnológico del Plástico (AIMPLAS).

Waaijenbergh, D. (2006). *Design, construction and maintenance of greenhouse structures*. Acta Hortic. 710, 31-42. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.710.1>.

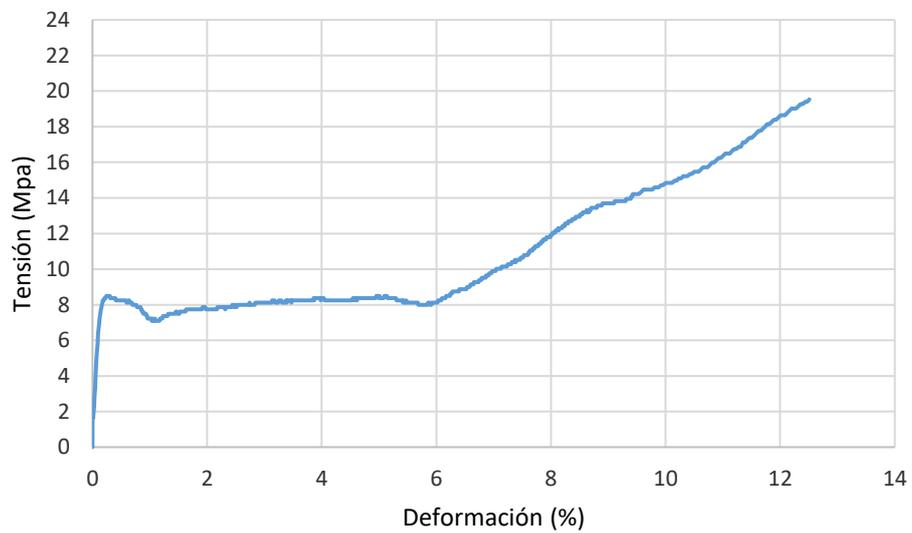
Waldo, M. (2005). *Tecnología en aditivos para películas de invernadero: de la estabilización UV a la funcionalización de propiedades plásticas*. Tercer Simposio internacional de producción de cultivos en invernadero. México.

10. ANEXOS

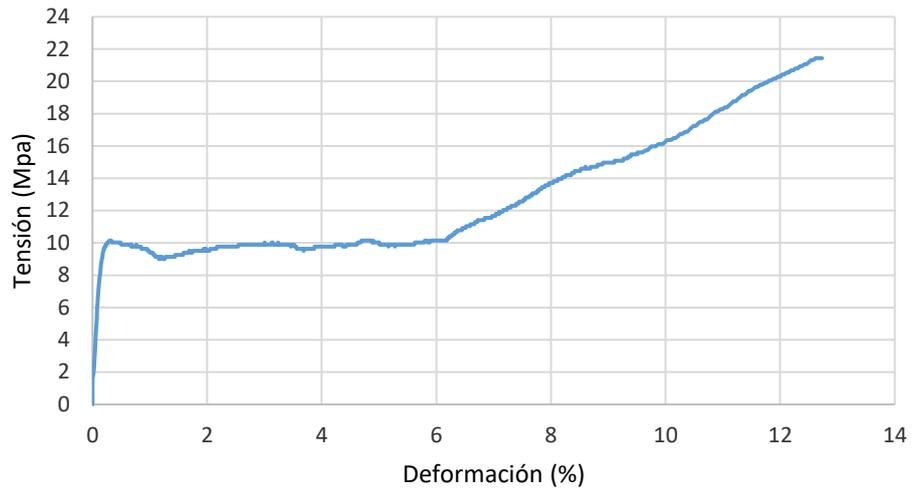
Anexo 1. Curvas tensión-deformación de las 5 probetas ensayadas en la CPE₁ Azul (D.T).



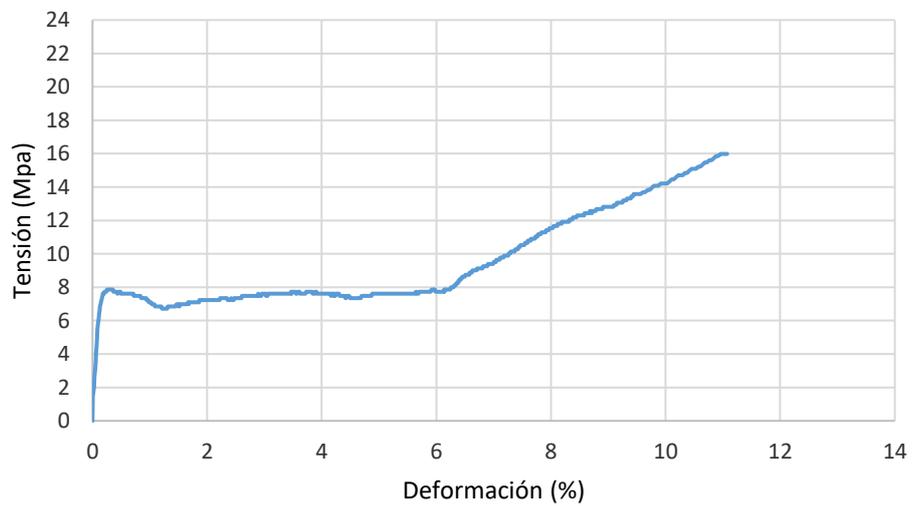
Gráfica 44. Curva tensión-deformación de la probeta nº1 CPE₁ (D.T).



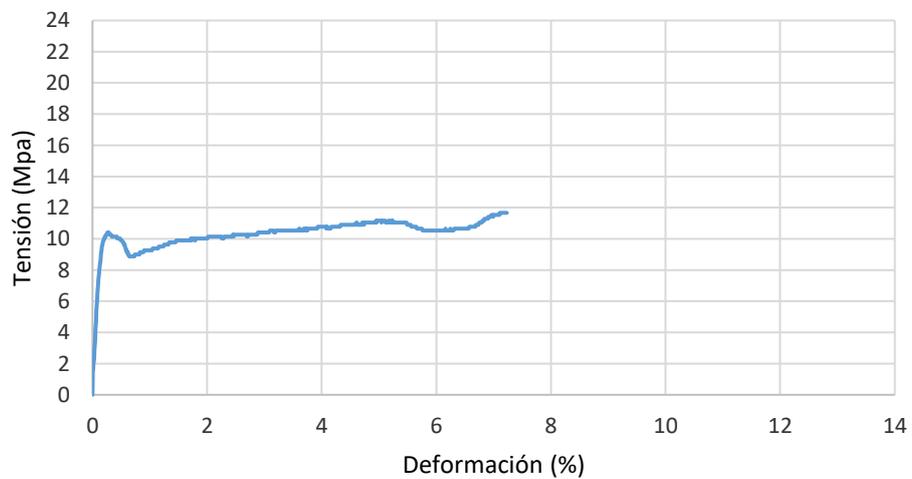
Gráfica 45. Curva tensión-deformación de la probeta nº2 CPE₁ (D.T).



Gráfica 46. Curva tensión-deformación de la probeta nº3 CPE₁ (D.T).

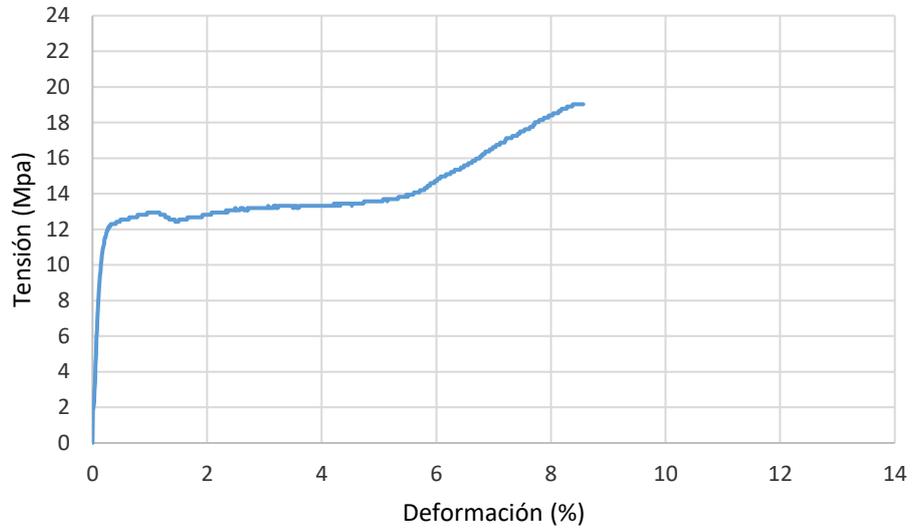


Gráfica 47. Curva tensión-deformación de la probeta nº4 CPE₁ (D.T).

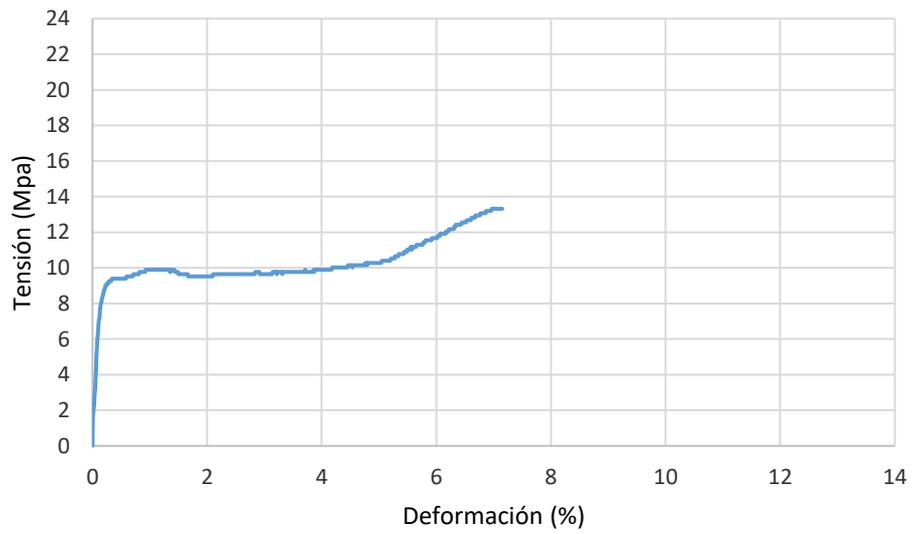


Gráfica 48. Curva tensión-deformación de la probeta nº5 CPE₁ (D.T).

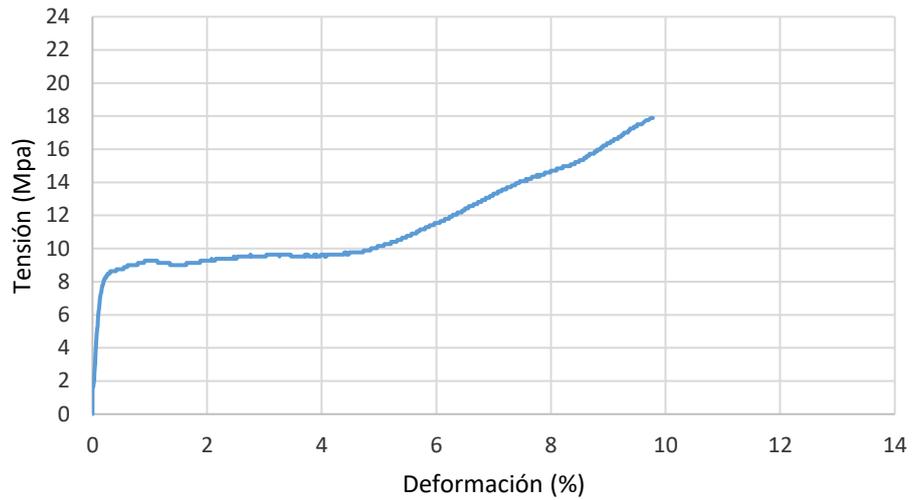
Anexo 2. Curvas tensión-deformación de las 5 probetas ensayadas en la CPE 1 Azul (D.L).



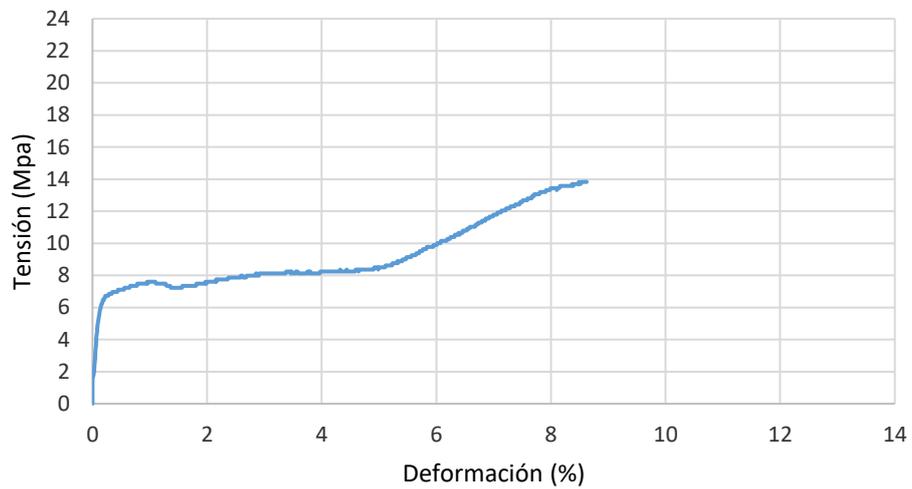
Gráfica 49. Curva tensión-deformación de la probeta nº1 CPE₁ (D.L).



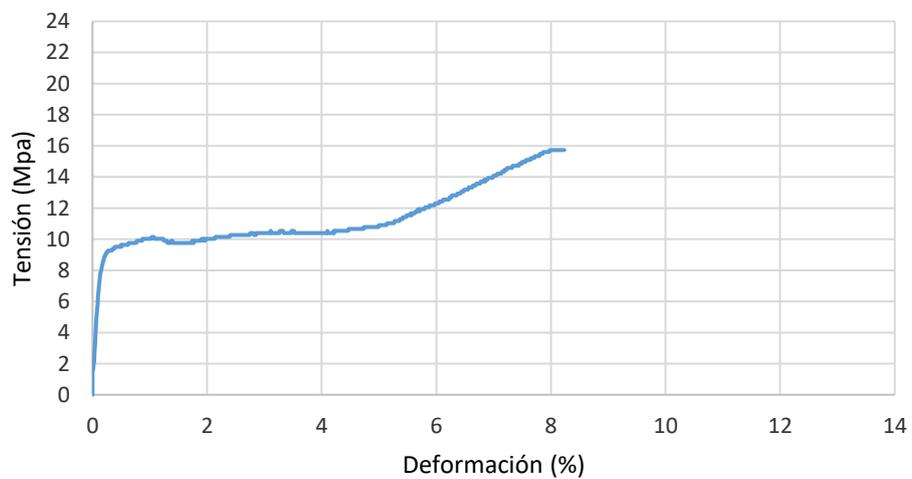
Gráfica 50. Curva tensión-deformación de la probeta nº2 CPE₁ (D.L).



Gráfica 51. Curva tensión-deformación de la probeta nº3 CPE₁ (D.L).

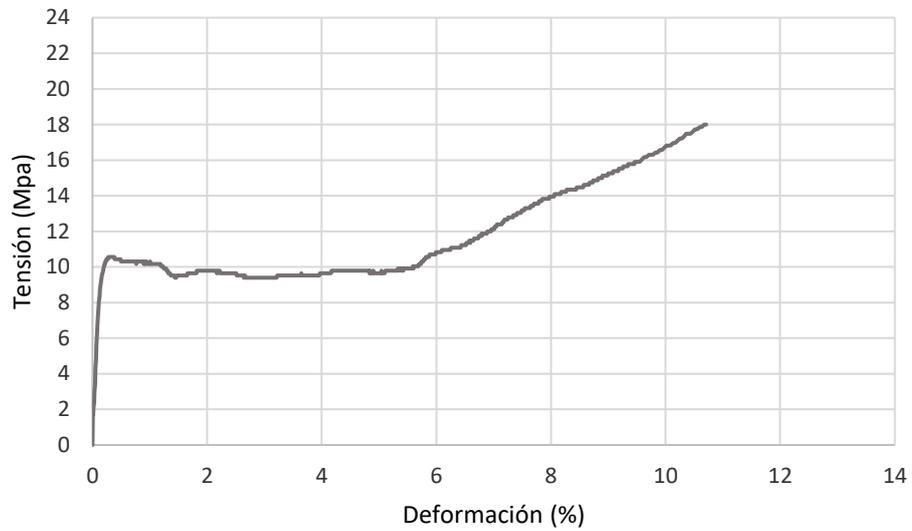


Gráfica 52. Curva tensión-deformación de la probeta nº4 CPE₁ (D.L).

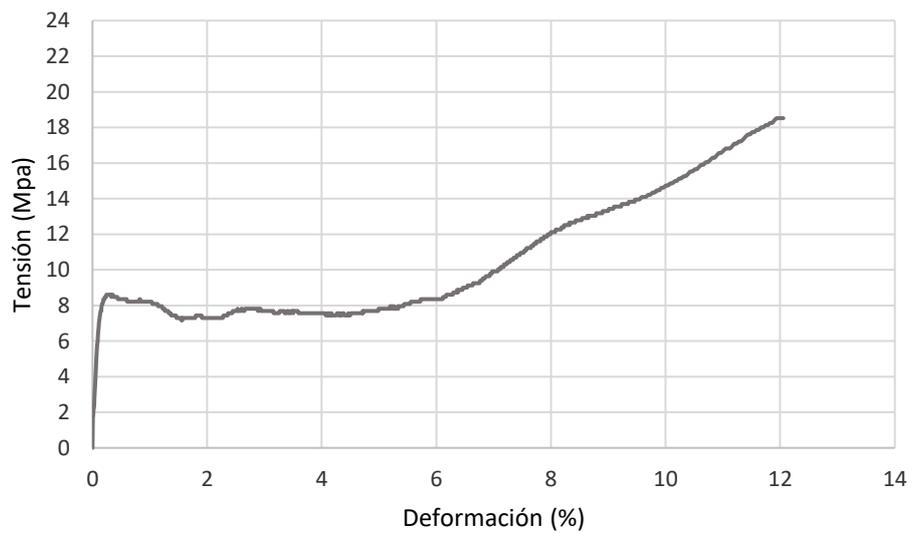


Gráfica 53. Curva tensión-deformación de la probeta nº5 CPE₁ (D.L).

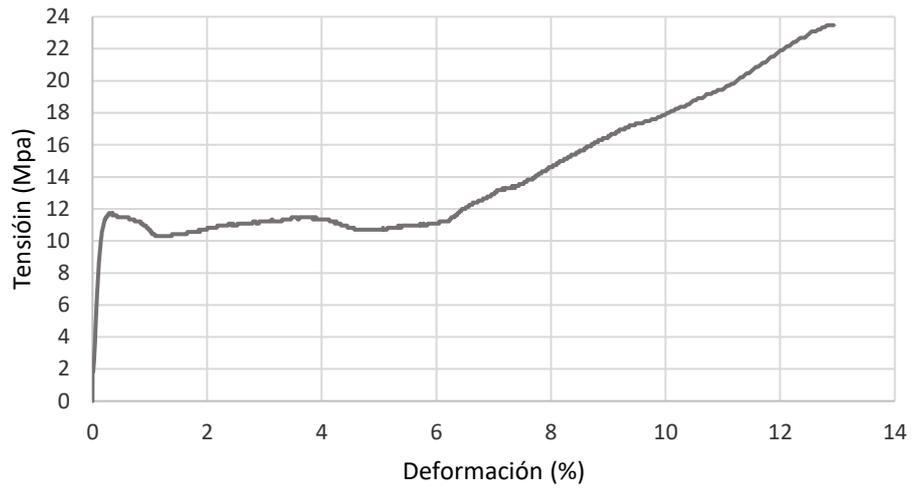
Anexo 3. Curvas tensión-deformación de las 5 probetas ensayadas en la CPE₂ Plateado (D.T).



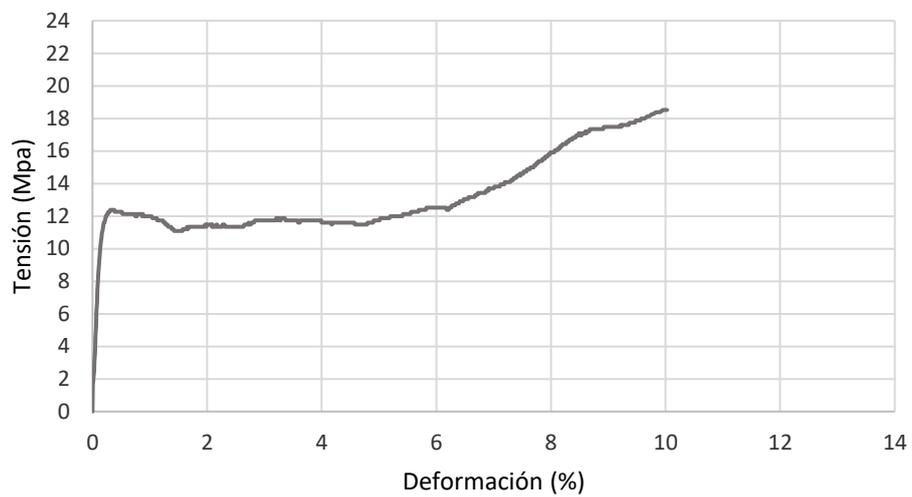
Gráfica 54. Curva tensión-deformación de la probeta nº1 CPE₂ (D.T).



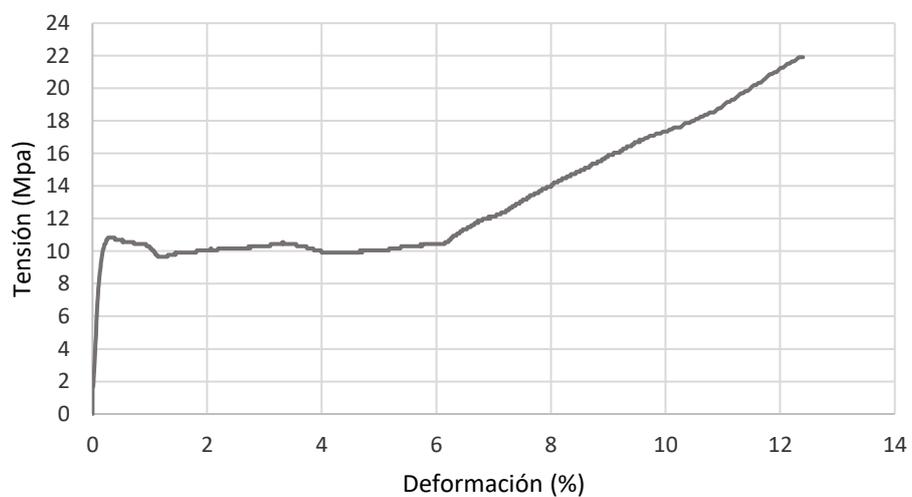
Gráfica 55. Curva tensión-deformación de la probeta nº2 CPE₂ (D.T).



Gráfica 56. Curva tensión-deformación de la probeta nº3 CPE₂ (D.T).

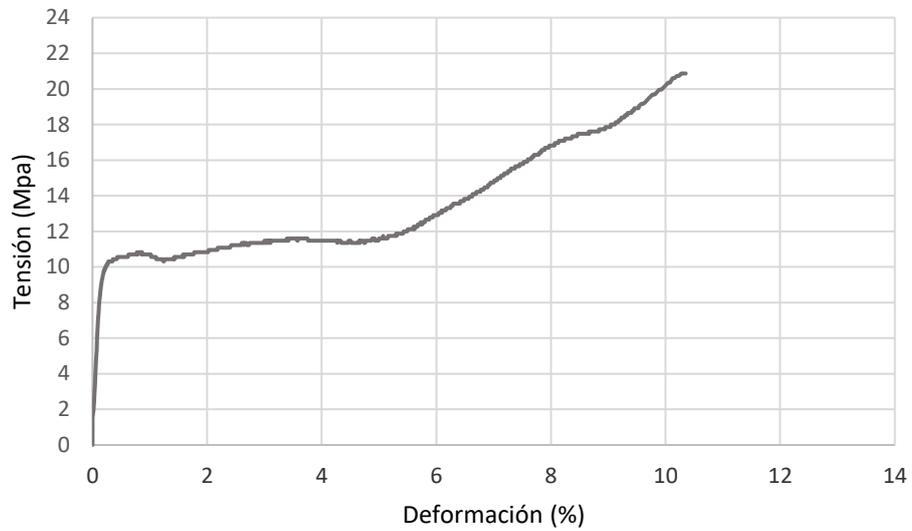


Gráfica 57. Curva tensión-deformación de la probeta nº4 CPE₂ (D.T).

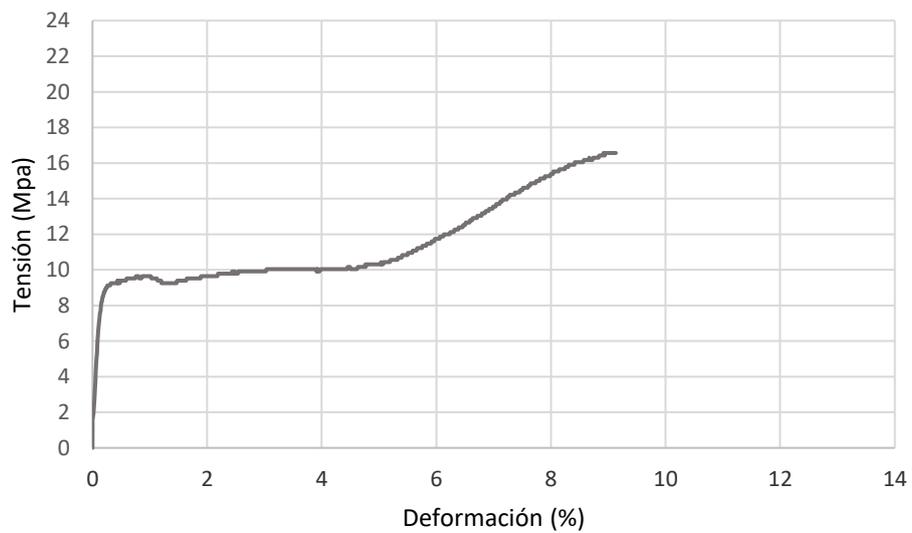


Gráfica 58. Curva tensión-deformación de la probeta nº5 CPE₂ (D.T).

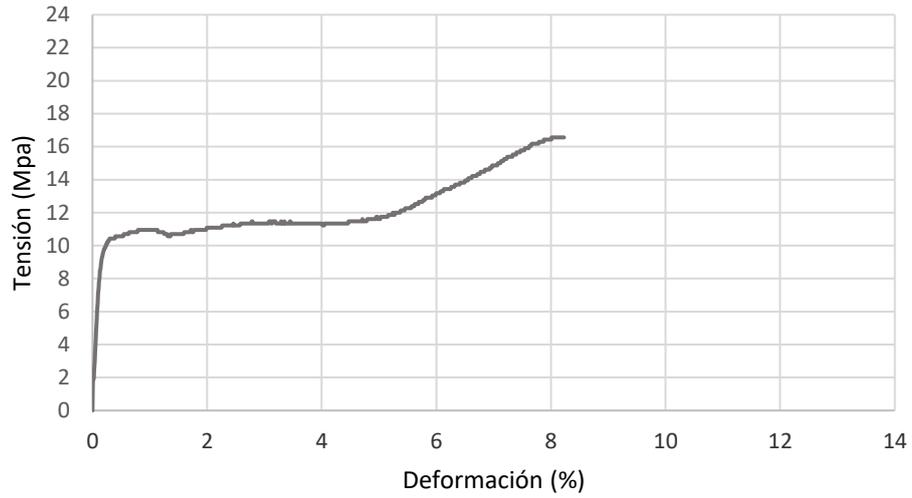
Anexo 4. Curvas tensión-deformación de las 5 probetas ensayadas en la CPE₂Plateado (D.L).



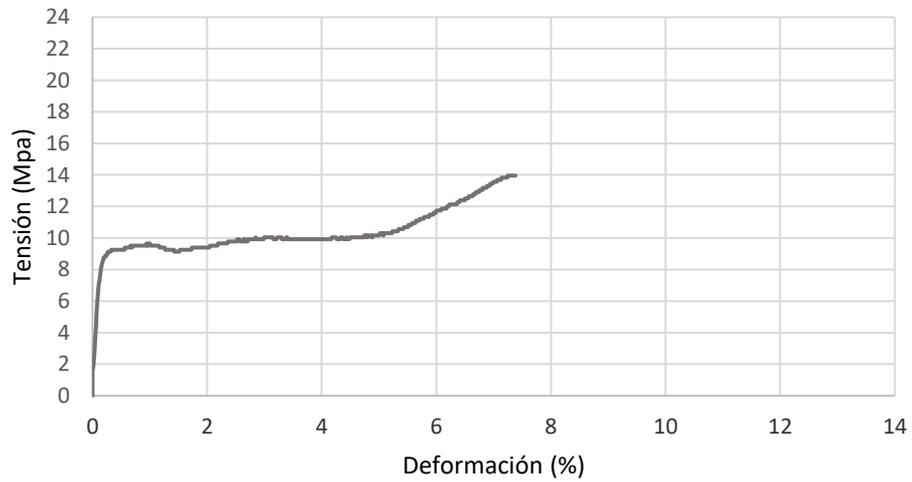
Gráfica 59. Curva tensión-deformación de la probeta nº1 CPE₂ (D.L).



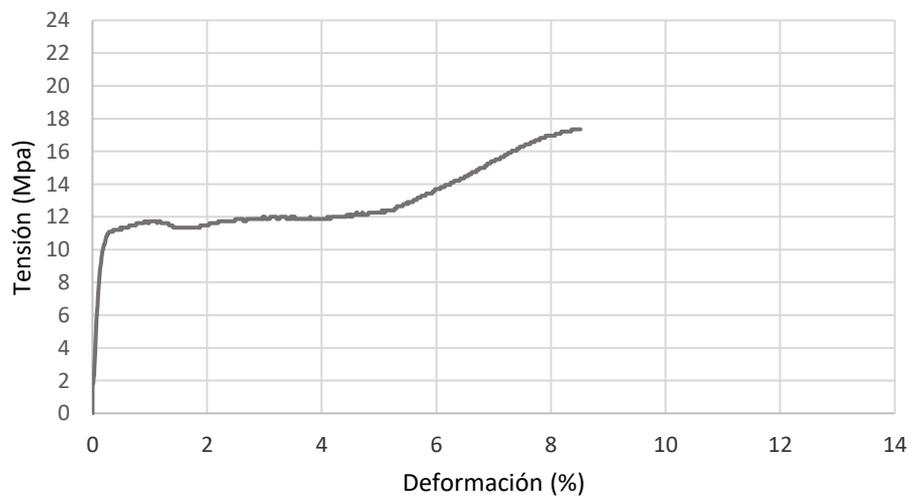
Gráfica 60. Curva tensión-deformación de la probeta nº2 CPE₂ (D.L).



Gráfica 61. Curva tensión-deformación de la probeta nº3 CPE₂ (D.L).



Gráfica 62. Curva tensión-deformación de la probeta nº4 CPE₂ (D.L).



Gráfica 63. Curva tensión-deformación de la probeta nº5 CPE₂ (D.L).

Anexo 5. Curvas tensión-deformación de las 5 probetas ensayadas en la CPE₃ Amarillo (D.T).



Gráfica 64. Curva tensión-deformación de la probeta nº1 CPE₃ (D.T).



Gráfica 65. Curva tensión-deformación de la probeta nº2 CPE₃ (D.T).



Gráfica 66. Curva tensión-deformación de la probeta nº3 CPE₃ (D.T).

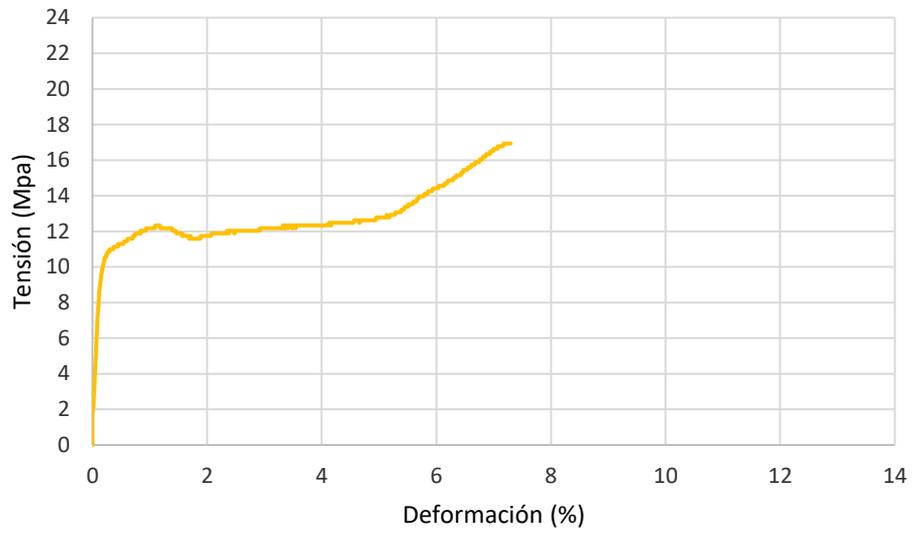


Gráfica 67. Curva tensión-deformación de la probeta nº4 CPE₃ (D.T).



Gráfica 68. Curva tensión-deformación de la probeta nº5 CPE₃ (D.T).

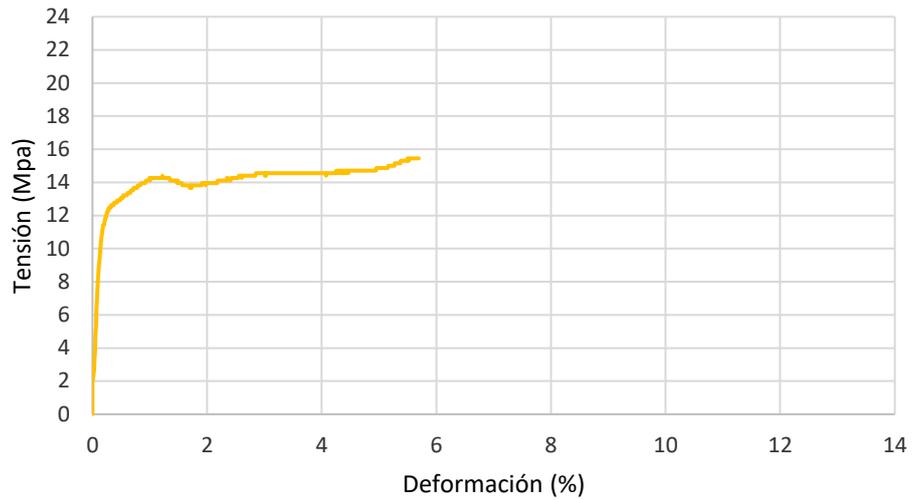
Anexo 6. Curvas tensión-deformación de las 5 probetas ensayadas en la CPE₃ Amarillo (D.L).



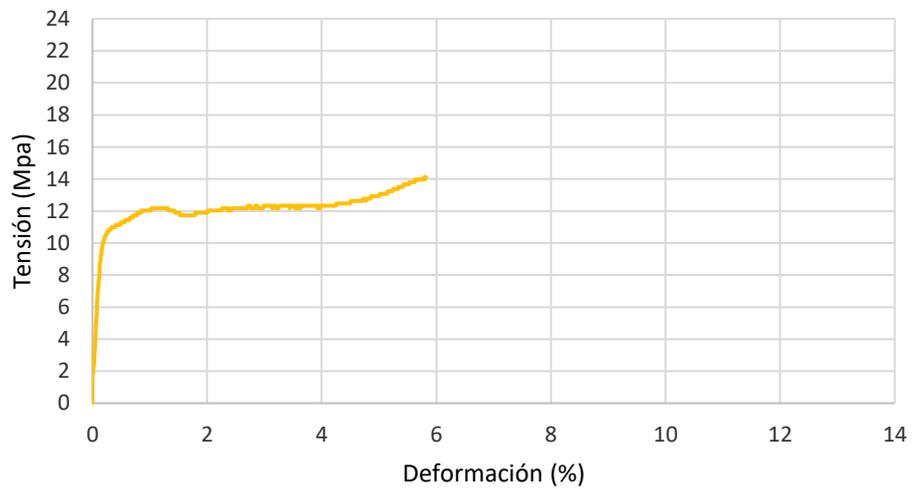
Gráfica 69. Curva tensión-deformación de la probeta nº1 CPE₃ (D.L).



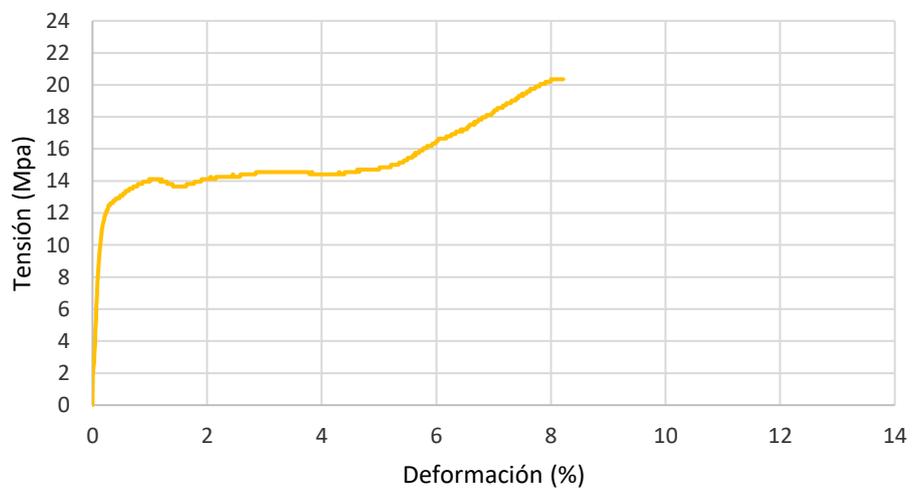
Gráfica 70. Curva tensión-deformación de la probeta nº2 CPE₃ (D.L).



Gráfica 71. Curva tensión-deformación de la probeta nº3 CPE₃ (D.L).

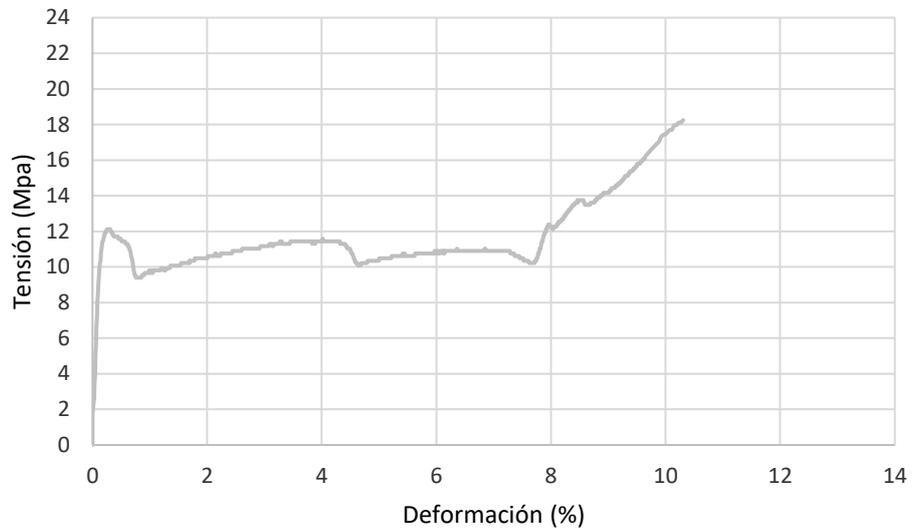


Gráfica 72. Curva tensión-deformación de la probeta nº4 CPE₃ (D.L).

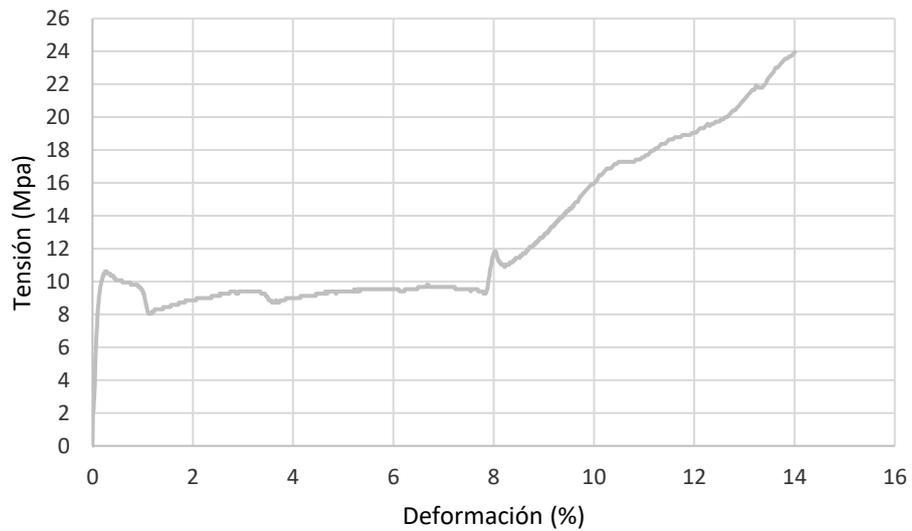


Gráfica 73. Curva tensión-deformación de la probeta nº5 CPE₃ (D.L).

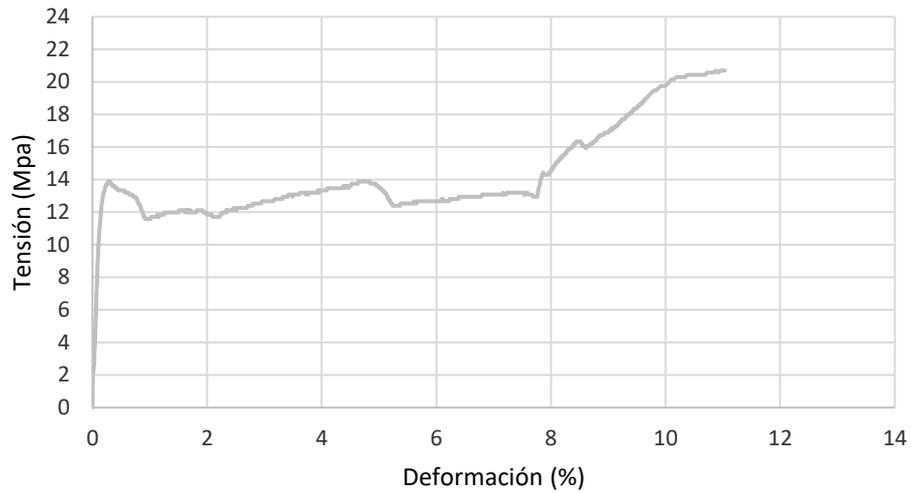
Anexo 7. Curvas tensión-deformación de las 5 probetas ensayadas en la CPE 4 Incoloro (D.T).



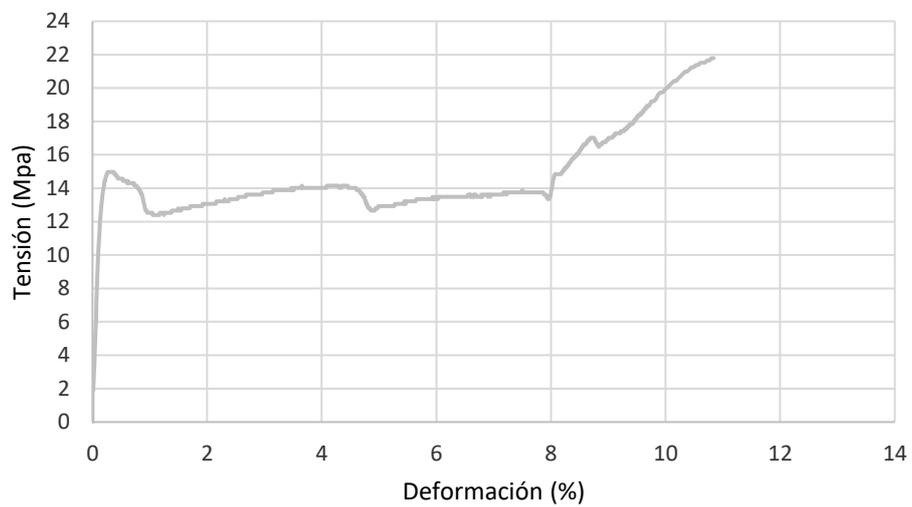
Gráfica 74. Curva tensión-deformación de la probeta nº1 CPE₄ (D.T).



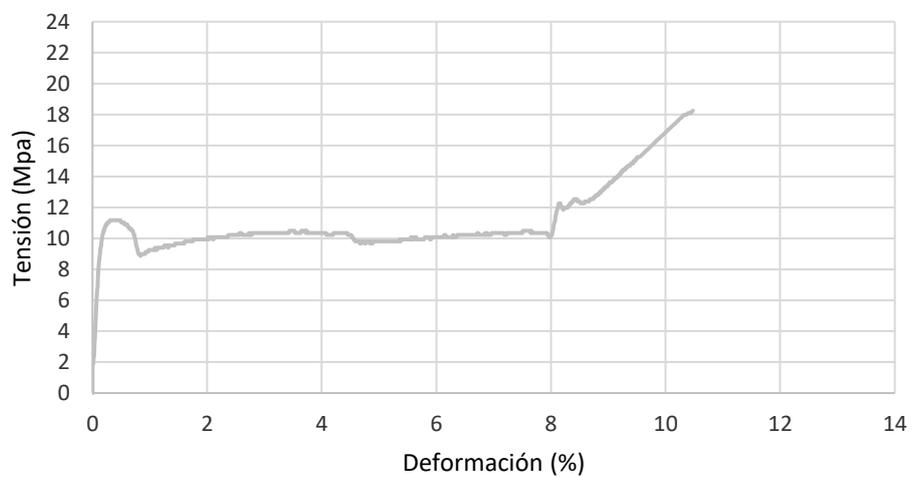
Gráfica 75. Curva tensión-deformación de la probeta nº2 CPE₄ (D.T).



Gráfica 76. Curva tensión-deformación de la probeta nº3 CPE₄ (D.T).

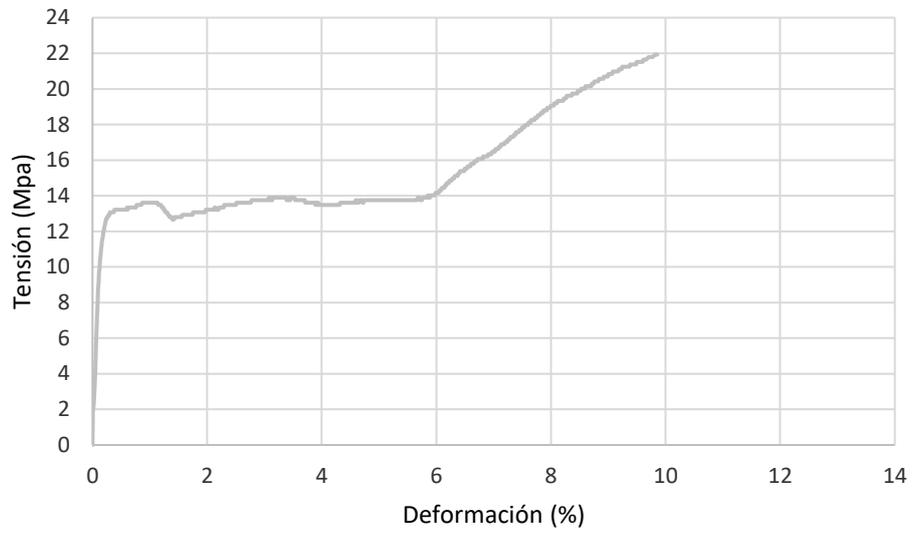


Gráfica 77. Curva tensión-deformación de la probeta nº4 CPE₄ (D.T).

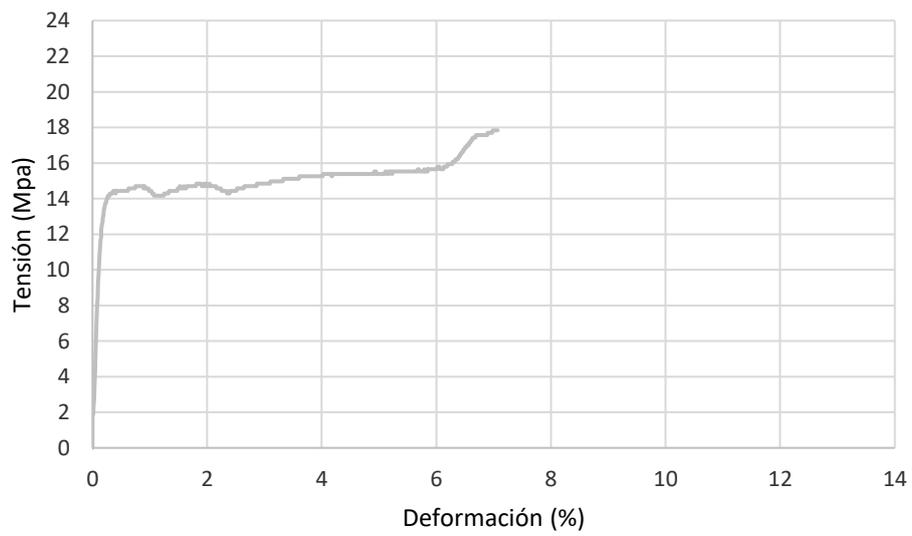


Gráfica 78. Curva tensión-deformación de la probeta nº5 CPE₄ (D.T).

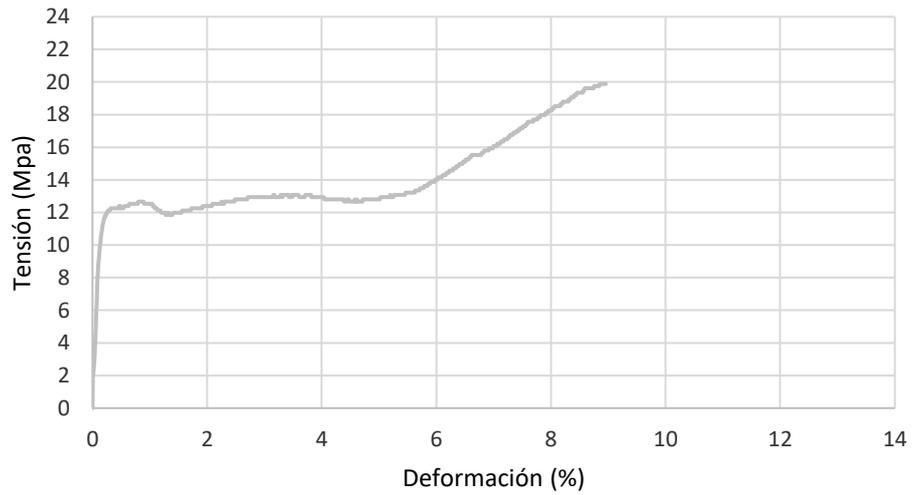
Anexo 8. Curvas tensión-deformación de las 5 probetas ensayadas en la CPE₄ Incoloro (D.L).



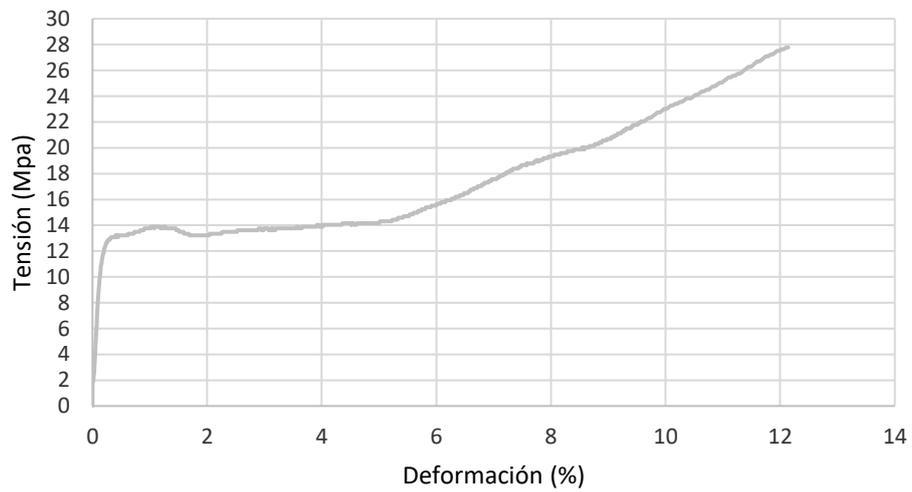
Gráfica 79. Curva tensión-deformación de la probeta nº1 CPE₄ (D.L).



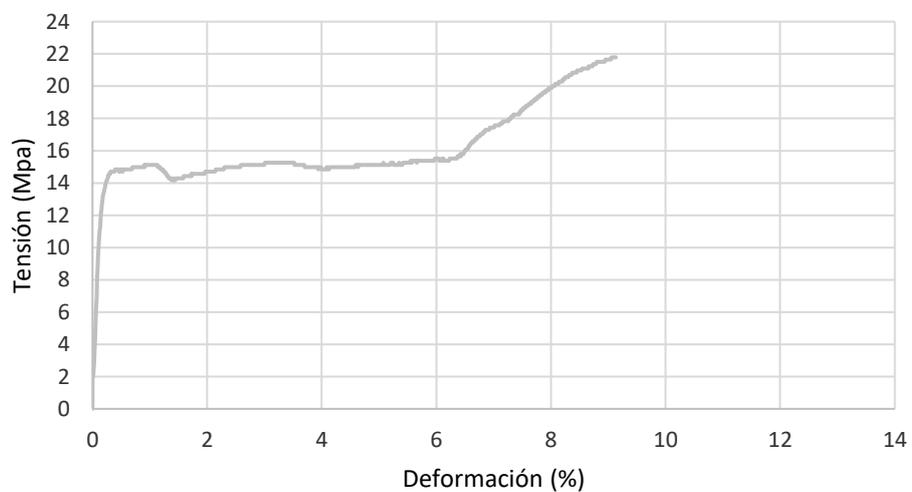
Gráfica 80. Curva tensión-deformación de la probeta nº2 CPE₄ (D.L).



Gráfica 81. Curva tensión-deformación de la probeta nº3 CPE₄ (D.L).

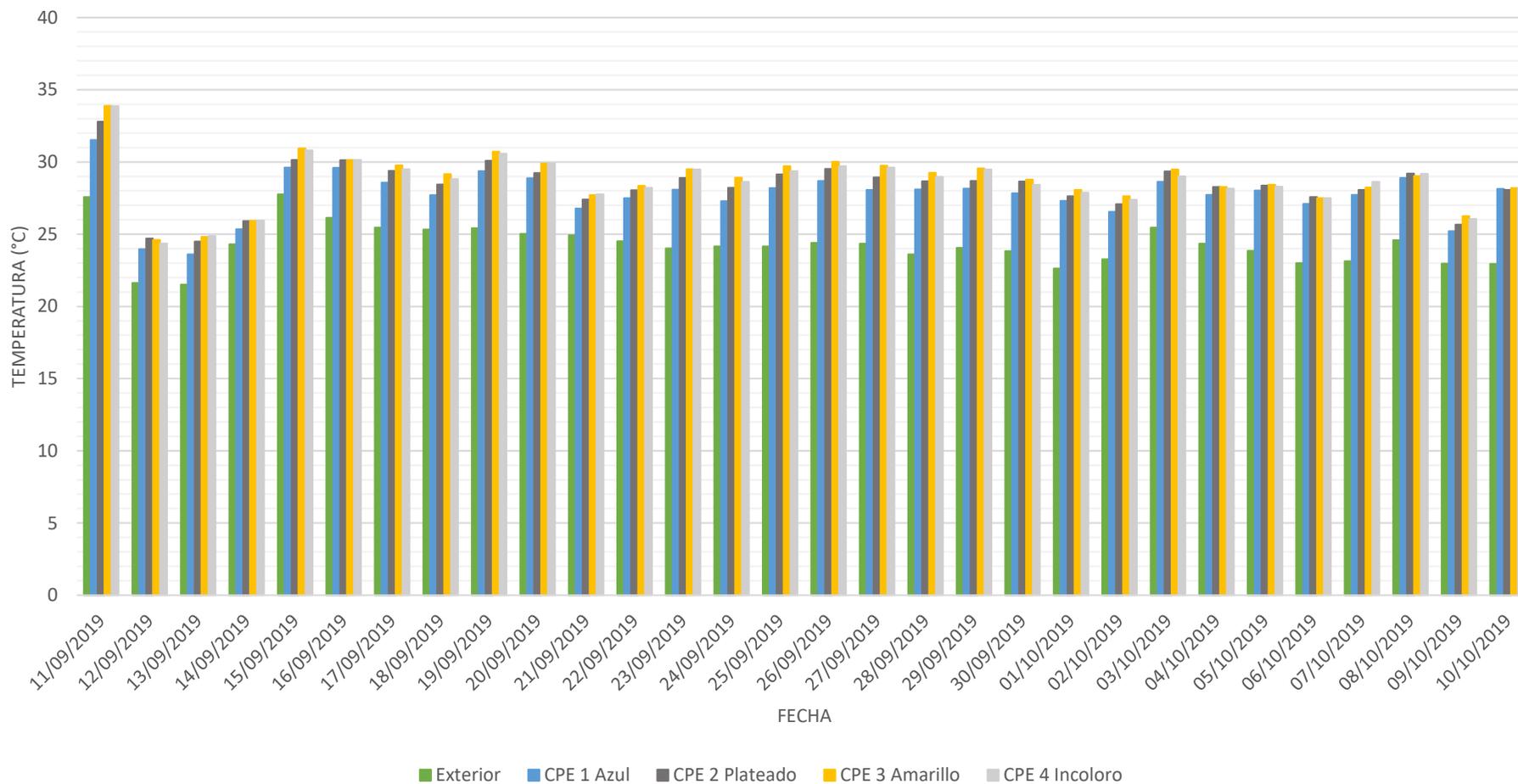


Gráfica 82. Curva tensión-deformación de la probeta nº4 CPE₄ (D.L).



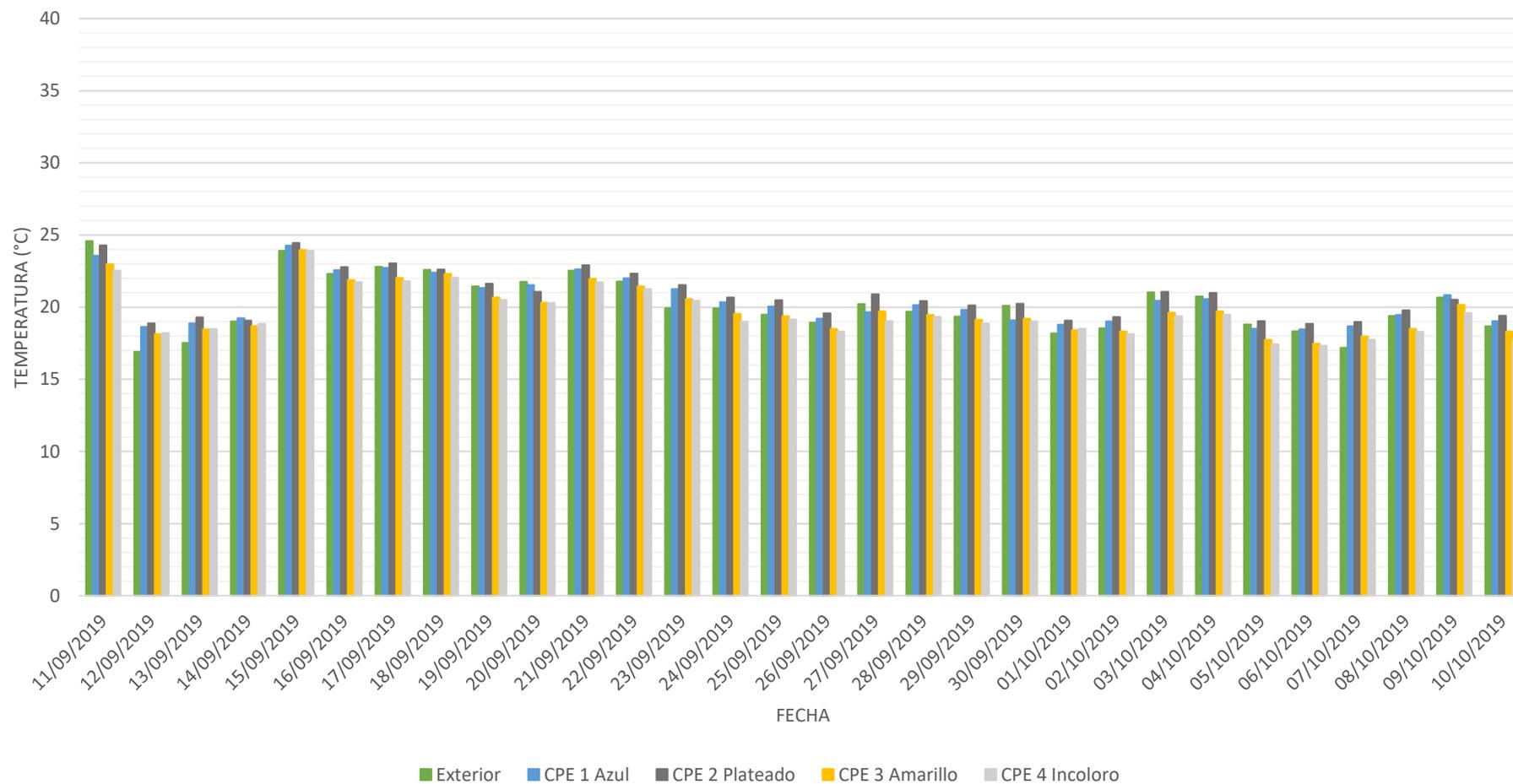
Gráfica 83. Curva tensión-deformación de la probeta nº5 CPE₄ (D.L).

Anexo 9. Temperatura (°C) media, mínima y máxima registrada cada día en el interior de los invernaderos y en el exterior desde día 11 de septiembre del 2019 al día 10 de octubre del 2019.



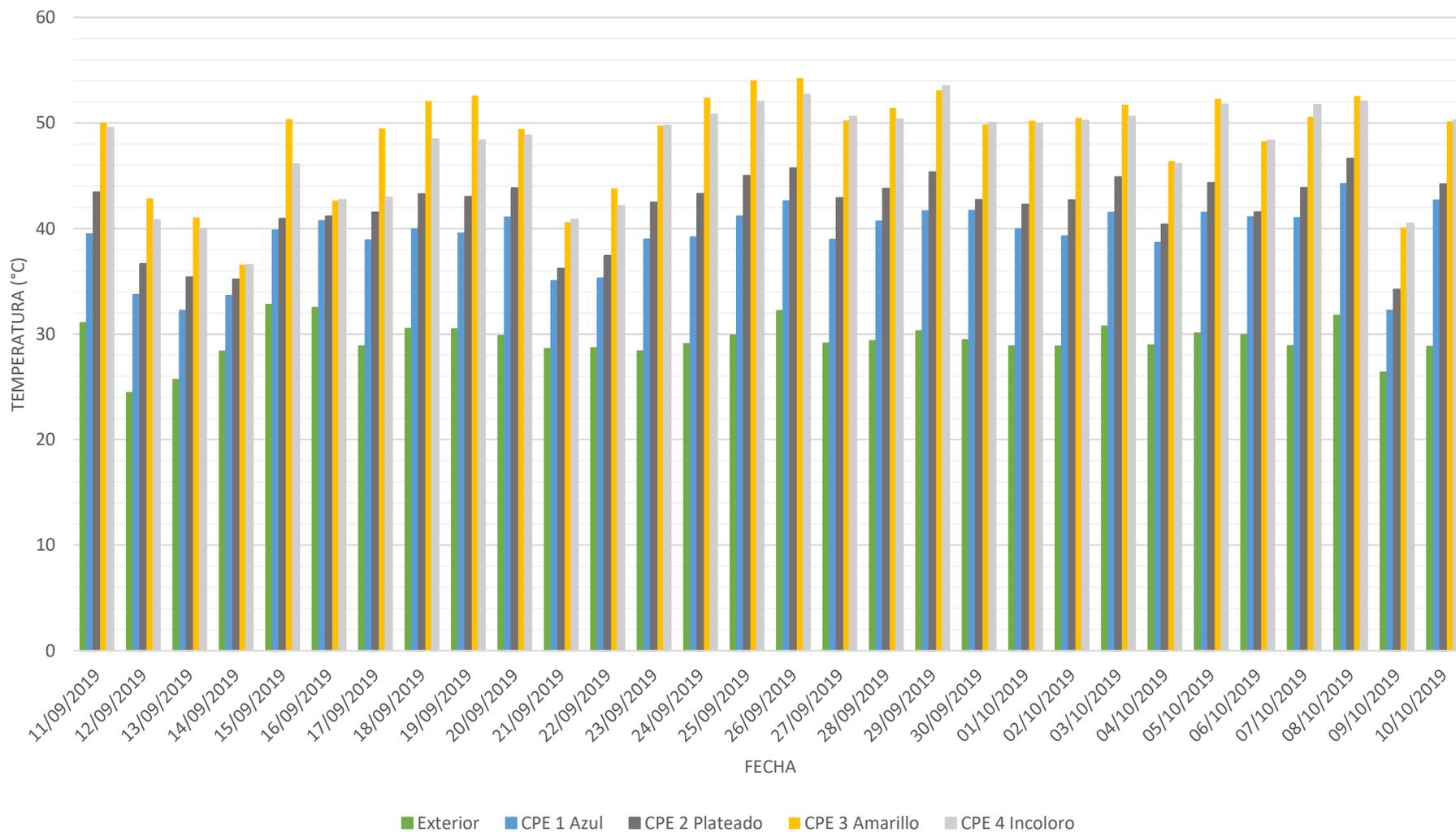
Gráfica 84. Temperatura (°C) media diaria registrada en el interior de cada invernadero y en el exterior

Caracterización y evaluación de cubiertas plásticas experimentales de invernadero.



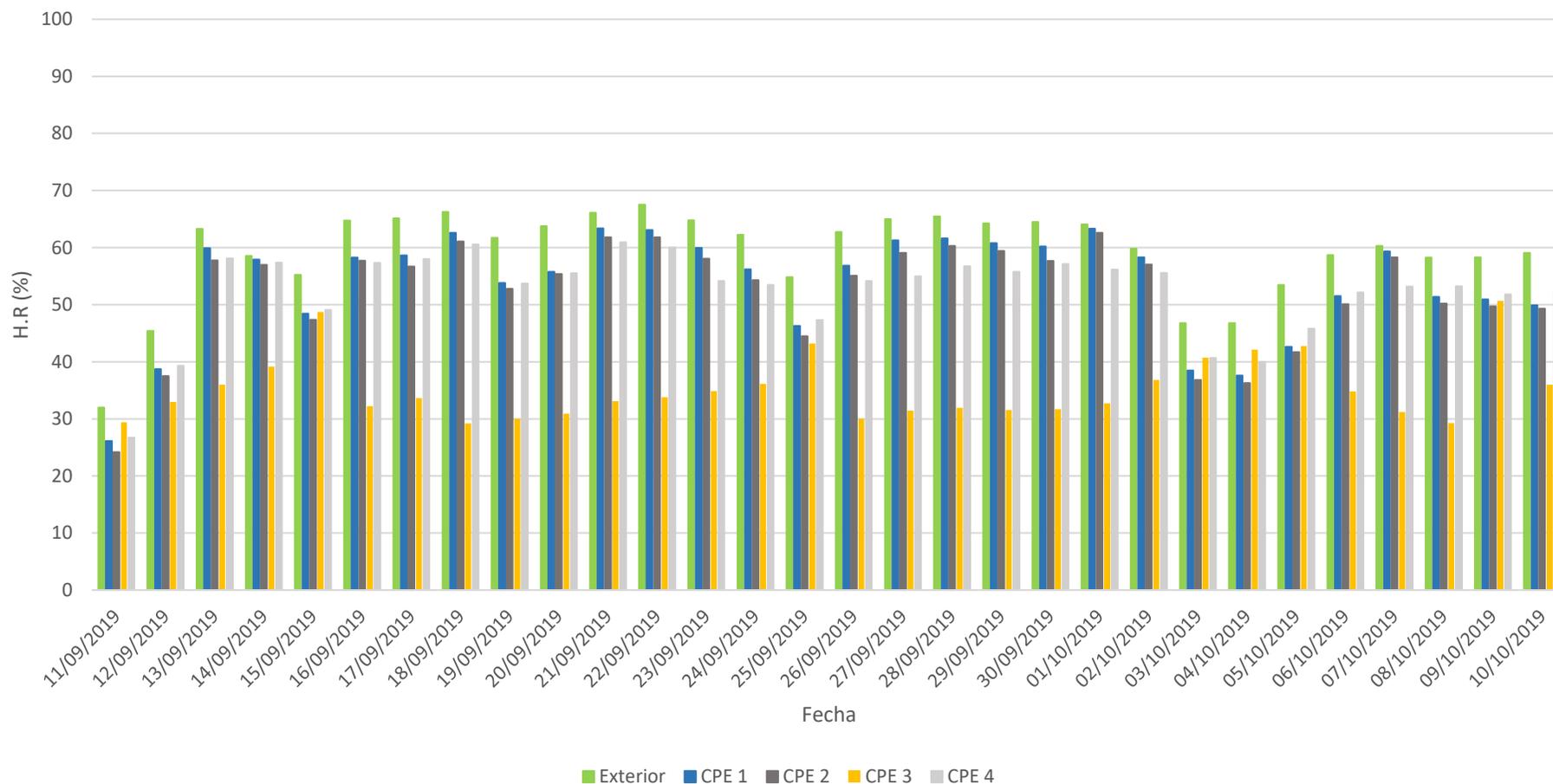
Gráfica 85. Temperatura (°C) mínima diaria registrada en el interior de cada invernadero y en el exterior.

Caracterización y evaluación de cubiertas plásticas experimentales de invernadero.



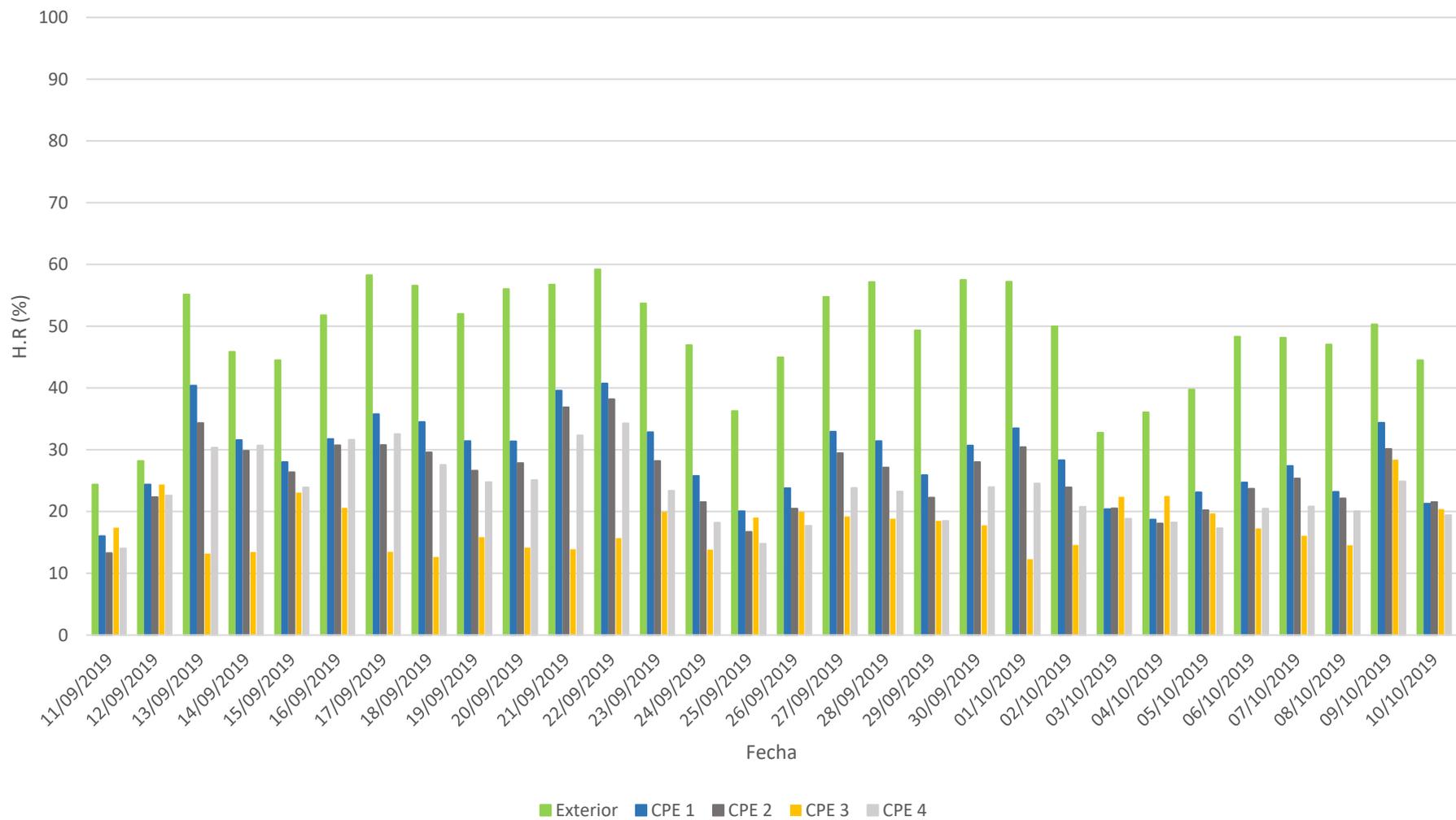
Gráfica 86. Temperatura (°C) máxima diaria registrada en el interior de cada invernadero y en el exterior.

Anexo 10. Humedad relativa (%) media, mínima y máxima registrada cada día en el interior de los invernaderos y en el exterior desde día 11 de septiembre del 2019 al día 10 de octubre del 2019.



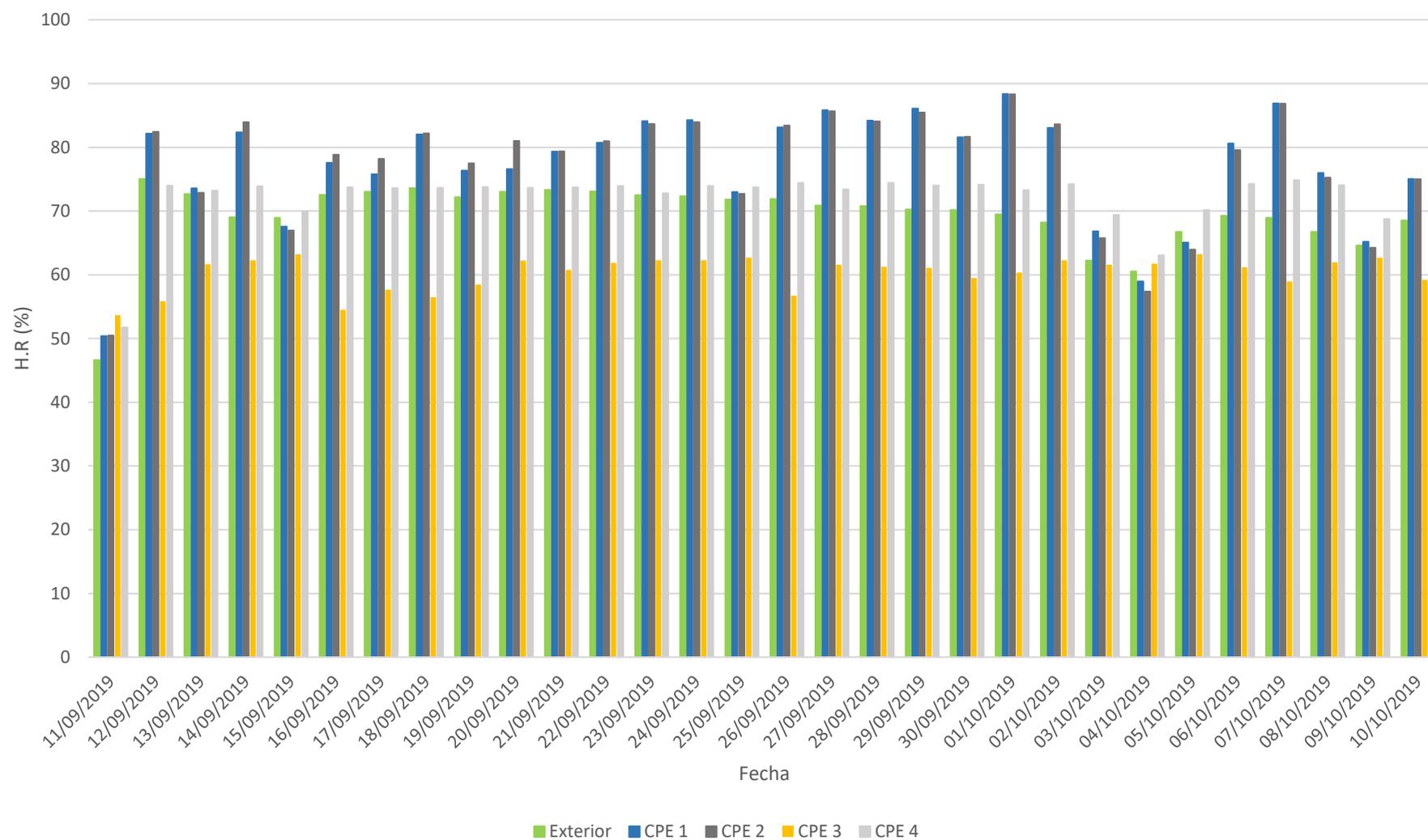
Gráfica 87. Humedad relativa (%) media diaria registrada en el interior de cada invernadero y en el exterior.

Caracterización y evaluación de cubiertas plásticas experimentales de invernadero.



Gráfica 88. Humedad relativa (%) mínima diaria registrada en el interior de cada invernadero y en el exterior.

Caracterización y evaluación de cubiertas plásticas experimentales de invernadero.



Gráfica 89. Humedad relativa (%) máxima diaria registrada en el interior de cada invernadero y en el exterior.



RESUMEN

Gran parte de la producción hortofrutícola y ornamental en Almería, así como en otras regiones de España y del mundo, se desarrolla dentro de modelos agrícolas intensivos tanto convencionales como ecológicos, que a su vez se desenvuelven bajo la denominada “agricultura bajo plástico”. Este tipo de agricultura tiene como protagonista principal a la cubierta plástica que, al ser instalada en un invernadero, modifica los parámetros ambientales: radiación solar, temperatura, humedad, viento etc. Con las cubiertas se consiguen mejorar los rendimientos de los cultivos tanto en el aspecto cuantitativo como cualitativo. No obstante, existen ocasiones en las que estas por sí solas no consiguen los efectos positivos esperados, pudiendo llegar a ser contraproducentes como ocurre, por ejemplo, en zonas cálidas donde las épocas del año con altos niveles de irradiancia provocan temperaturas excesivas en el interior de los invernaderos. Por otro lado, las cubiertas deben ser resistentes a la par que flexibles para así poder evitar roturas en el momento de su instalación y resistir a lo largo del tiempo los esfuerzos que sobre ellas actúan y que merman su vida útil y prestaciones.

Por ello es de especial interés estudiar y conocer el comportamiento de las cubiertas plásticas existentes en el mercado, así como nuevos modelos experimentales que ayuden a seguir mejorando sus propiedades, y que repercutan en beneficios para los cultivos, así como para el agricultor y la industria de este sector.

En este proyecto donde han intervenido tanto la Universidad de Almería como la empresa fabricante de plásticos PLASTIMER-MACRESUR S.L. se analizaron desde el punto de vista óptico y mecánico cuatro cubiertas plásticas experimentales (CPEs) con diferentes composiciones y espesores, determinando algunas de sus propiedades ópticas como son: transmitancia, reflectancia, absorbancia y difusión de luz en la región espectral comprendida entre los 350nm y los 1.100nm; así como mecánicas: resistencia a rotura por impacto y deformación ante esfuerzos axiales. Posteriormente se realizó una evaluación de estas cubiertas en el exterior viendo su efecto sobre distintos factores climáticos, tales como la temperatura, humedad y radiación fotosintéticamente activa (PAR).

Como conclusión, en este trabajo se pone de manifiesto cómo pequeñas variaciones en la composición de cada una de las CPEs afectan a sus propiedades ópticas en las distintas regiones espectrales y como éstas a su vez influyen de manera directa en los factores climáticos. Además, queda reflejado cómo mecánicamente todas las CPEs muestran un comportamiento blando y tenaz y, a su vez, responden a las exigencias de los materiales dúctiles con punto de fluencia.