

NATURAL AGING PROCESS OF A FILM USED AS COVER MATERIAL FOR GREENHOUSES

Garzón Garzón, Eduardo ¹; Pérez-Villarejo, Luis ²; Martínez-Martínez, Sergio ³;
Sánchez-Soto, Pedro José ⁴

¹ Universidad de Almería, ² Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales, Escuela Politécnica Superior de Linares, Universidad de Jaén, c/ Alfonso X el Sabio 28, 23700-Linares, Jaén, España, ³ INSTITUTO DE INNOVACIÓN, CIENCIA

In the present communication it is presented a procedure to determine the aging of a (plastic) film used as cover material for greenhouses. For this purpose, both the PAR (Photosynthesis Active Radiation) and the global radiations were followed continuously, inside and outside, the greenhouse during three periods. Besides this, samples have been considered for different structural positions and the traction strengths have been determined by testing the sampled materials. Variance analysis method and test of minimum significance differences have been applied to these results.

The present study allows conclude that the film shows a considerable increase of the absorbed radiation at the second year of use. Taking into account that this radiation is the active for the photosynthesis process, it is deduced that the useful life of this film is two years. It is also observed a spatial variability very accused between the position of the tested sample and the traction strength and elongation at the fluency point. These tests have been useful to develop a model based on the squared minimum method to adjust the data considering both kind of radiations (PAR and global).

Keywords: aging; film; traction; radiometry; model

PROCESO DE ENVEJECIMIENTO NATURAL DE UNA PELÍCULA UTILIZABLE COMO MATERIAL DE CUBIERTA DE INVERNADEROS

Se presenta un procedimiento para la determinación del envejecimiento de una película utilizable como material de cubierta de invernaderos. Para ello se llevó a cabo un seguimiento continuo de la radiación PAR (radiación activa para la fotosíntesis) y de la radiación global, tanto en el interior del invernadero como en el exterior, durante tres campañas. Además se han tomado muestras procedentes de diferentes posiciones de la estructura y se han aplicado análisis de la varianza y un test de mínimas diferencias significativas a los resultados de resistencia a tracción.

El estudio realizado permite concluir que la película experimenta un aumento considerable de la radiación absorbida en el segundo año de uso. Dado que esta radiación es la fotosintéticamente activa, se deduce una vida útil de la lámina de dos años. Además se observa una variabilidad espacial muy acentuada entre la posición de la muestra y la resistencia a tracción y elongación en el punto de fluencia.

Los ensayos han sido de utilidad para desarrollar un procedimiento de modelización basado en el método de mínimos cuadrados para ajuste de los datos obtenidos, tanto de la radiación PAR como de la global.

Palabras clave: envejecimiento; película; lámina; tracción; radiometría; modelo

1. Introducción

De las partes que integran al invernadero, la cubierta es esencial, ya que permite crear un microclima en el interior y, por ende, los resultados obtenidos en los cultivos dependerán de ella, existiendo diferentes tipos de cubiertas. Sobre este punto Tidjani (2000) afirma que de ellas actualmente tiene más uso el polietileno de baja densidad. Estos polímeros se han usado de manera muy amplia como materiales de cubierta, ya que poseen varias características que los hacen adecuados para este fin. Entre las más importantes están la buena transmisión de luz al ser transparente, buena resistencia mecánica además de ser flexible y tener un bajo coste Dilara y Briassoulis (2000). Pero el problema que presenta este material es su corta vida útil, debido principalmente a que el polímero se encuentra expuesto a factores ambientales que degradan de manera progresiva sus propiedades mecánicas, ópticas y térmicas Abdelkader et al. (2015). Por tal motivo, se realiza actualmente una constante investigación en las cubiertas, con el fin de hacer un uso más eficiente de la película y lograr una vida útil más larga. Principalmente se han desarrollado metodologías para estudiar su comportamiento mecánico y de los factores de degradación a los que está sujeto Briassoulis et al., (2015) y Dilara y Briassoulis (2000).

Las características mecánicas de los polímeros dependen tanto de los factores intrínsecos (tipo de materia prima), como de las condiciones de su transformación en lámina Dilara y Briassoulis (1998). En este sentido, las propiedades más relevantes son: la resistencia a la tracción, al rasgado y al impacto (Marco, 2001). La resistencia a tracción valora la capacidad del plástico para soportar esfuerzos de tracción; es importante durante el montaje del mismo en el invernadero y para resistir fuertes vientos. La resistencia al rasgado es importante para evitar desgarros por corte accidentales y, por último, la resistencia al impacto es relevante para resistir el granizo y el viento (Pacini, 2001) y Hassini et al. (2002).

Se entiende por duración de un polímero agrícola el tiempo de vida útil durante el que conserva, al menos, el 50% de sus propiedades mecánicas iniciales Díaz et al. (2001). Como se ha mencionado anteriormente, la exposición de los materiales de cubierta al medio ambiente hacen que se degraden sus propiedades de forma acelerada. Muchos estudios se han centrado en la degradación de películas de LDPE (Rabek, 1995) y Amin, Hamid y Khan (1995). Se ha encontrado que el clima de la región, el diseño del invernadero, el microclima interior, el uso de agroquímicos y la contaminación ambiental de la zona pueden afectar severamente la vida útil del material. La combinación de varios de estos parámetros puede dar lugar a un aumento de las tasas de degradación. La luz del sol es el factor principal en el envejecimiento de las cubiertas plásticas de invernaderos. Un gran número de aditivos están disponibles actualmente y cuando se añaden en una concentración baja a los polímeros, los hacen más estables a la exposición al calor y radiaciones UV. Los antioxidantes, protegen la película de los efectos nocivos de la radiación UV y del calor por largos periodos (Tidjani, 2000).

Los métodos estándares establecidos a nivel nacional o internacional para la medida de las propiedades mecánicas tienen la intención de evaluar y conocer el comportamiento mecánico de los materiales durante largos y cortos periodos de tiempo. Para este fin han sido establecidas pruebas cortas de menos de un cuarto de hora y pruebas largas. De acuerdo con Briassoulis et al. (2015), los ensayos de periodo corto son importantes para el control de la calidad, para asegurar unas propiedades constantes en la producción de materiales y para permitir la comparación entre materiales, siempre que los juegos de datos usados para la comparación sean determinados con el mismo procedimiento. Los ensayos de periodo largo tienen la intención de una rápida identificación de las propiedades de resistencia de materiales. Con respecto a las propiedades mecánicas de los materiales de cubierta de invernaderos, la primera prioridad se encuentra en los métodos de ensayo de

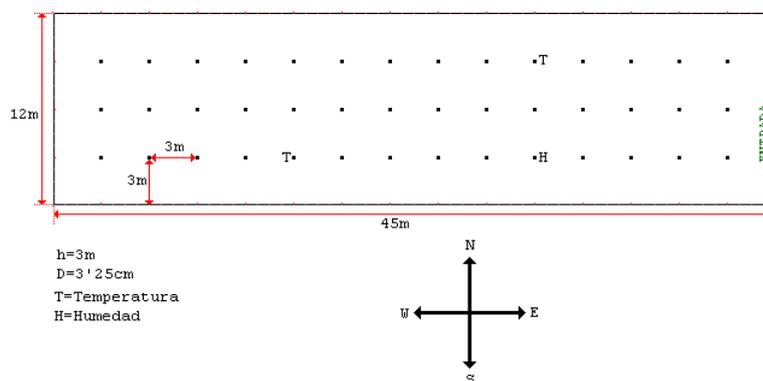
periodo corto, los cuales pueden ser usados para obtener un cuadro global y comparativo del comportamiento mecánico de los diversos materiales disponibles para cubiertas de invernadero de uso hoy en día. Se pueden incluir pruebas de periodo largo para estos materiales como son: resistencia al impacto (granizo), durabilidad y envejecimiento..

El material de cubierta perfecto, además de tener buenas propiedades aislantes, debería de permitir el 100% de la transmisibilidad en el rango PAR Papadakis et al. (2000), lo que es inalcanzable. Las características de transmisibilidad a radiación PAR varían según el tipo de radiación, directa o difusa. Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se considera necesario tanto evaluar la transmisividad de los materiales plásticos a lo largo del tiempo como ver el ajuste a un modelo matemático de la transmisión de la radiación solar en función de dicho parámetro. Además de estudiar cómo varían las propiedades mecánicas en función de la posición en la estructura del invernadero.

2. Material y métodos

El ensayo se realizó en un invernadero de cubierta plana de tres metros de altura, situado en el término municipal de Almería, con orientación de su eje longitudinal Este-Oeste y con soportes interiores y laterales de acero galvanizado de 3,25 cm de diámetro, con 3 m de separación entre sí. Las dimensiones de la nave, tal y como se muestra en la figura 1, son de 45 m de largo por 12 m de ancho. Se colocó una cubierta de polietileno obtenida por extrusión, de color blanco y de 880 galgas de espesor. Para simular la degradación del plástico en condiciones de campo se han aplicado tratamientos con sustancias químicas (empleadas como pesticidas), como permitrina y metansodio, cada 15 días.

Figura 1: Esquema de la instalación y distribución de los sensores



En el interior del invernadero se colocaron dos sensores de temperatura y uno de humedad distribuidos de forma simétrica, tal y como se muestra en la figura 1. Existe una estación meteorológica exterior con sensores de radiación PAR y global a diferentes alturas, de las que hemos tomado las medidas obtenidas para dos metros, que tiene aproximadamente la altura de los sensores en el interior del invernadero. Igualmente, en el interior y debajo de cada plástico se ha colocado un sensor de radiación PAR y un piranómetro para medir la radiación global. Los sensores se colocaron en la banda sur del invernadero debido a que recibe mayor radiación directa. Todos los datos de los sensores son conducidos hasta una unidad central de recogida y proceso de datos donde se van almacenando en ordenador. Este está dotado de una tarjeta de adquisición de datos, que toma una medida cada diez segundos, teniendo una capacidad para almacenar datos durante diez días. Estos datos se recogen periódicamente y se filtran con un programa.

Para analizar la pérdida de transmisividad del plástico comparamos los datos de la estación meteorológica exterior con los datos obtenidos en el interior del invernadero, obteniéndose así curvas que reflejan en tanto por ciento la pérdida de transmisividad. El análisis estadístico de este parámetro se hizo a través de un análisis de la varianza y las medias se compararon con el test de mínimas diferencias significativas (MDS).

2.1 Ajuste de la radiación PAR y Global absorbida a un modelo matemático. Modelo basado en el método de aproximación por mínimos cuadrados

Para el cálculo de este modelo partimos de dos hipótesis fundamentales. La primera es que la absorción de cualquier polímero aumenta con el tiempo como resultado de su envejecimiento, y la segunda, que esta absorción depende de la época del año en la que nos encontremos, dado que la radiación está íntimamente ligada con la posición del sol y el ángulo de incidencia de los rayos solares, tal y como se muestra en la figura 2. En la estación de verano los días son más largos y el sol está muy elevado; sin embargo, en invierno, como la duración del día es más corta, las radiaciones llegan más inclinadas a la superficie terrestre. De estas dos hipótesis de trabajo, y de entre la gran multitud de combinaciones posibles, se busca una función que sea combinación de una función de tipo lineal y otra de tipo sinusoidal. La parte lineal representa el aumento de la absorción del polímero con el tiempo; la parte sinusoidal representa la dependencia de la absorción respecto al ángulo de incidencia de los rayos solares, de modo que la absorción máxima se tendría en el solsticio de verano, y la mínima en el solsticio de invierno. Así, la función buscada debe ser de la siguiente forma:

$$f(t) = a \cdot t + b + c \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi t}{365}\right) \quad (1)$$
$$t \in [0,730]$$

Dónde t es el tiempo expresado en días, que varía entre $t=1$ y $t=730$ (el primer día en que se tomaron datos, en concreto en este caso es el 21 de marzo).

Figura 2: Esquema de la variación en la radiación absorbida por una película a lo largo del tiempo



Para el cálculo tomamos el periodo de dos años exactamente, con el fin de simplificar la función sinusoidal y tomar una de periodo de 365 días, por lo que se comienza el 21 de marzo y se acaba el mismo día (dos años más tarde). Como empezamos en el equinocio de primavera esto implica unas condiciones tales que para el tiempo $t=1$ el seno del ángulo se anula en ese punto, y para $t=365$ se anula de nuevo. Lo mismo ocurre para el 21 de septiembre $t=186$. Sin embargo, en el solsticio de verano y de invierno estos valores son máximos para el seno.

Si $h(t)$ es la función que nos da los datos de la radiación absorbida en el día t , para cierto tipo de cubierta de invernadero, el método de los mínimos cuadrados, nos conduce al siguiente sistema (PAR o Global):

$$\begin{aligned} \langle h(t) - f(t)/1 \rangle &= 0 \\ \langle h(t) - f(t)/t \rangle &= 0 \\ \left\langle h(t) - f(t) / \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi t}{365}\right) \right\rangle &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Donde \langle , \rangle representa el producto escalar discreto de las funciones definidas en los puntos $t=1,2,\dots,730$. Si realizamos los productos escalares de la ecuación 2 se llega al siguiente producto:

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^{731} \left[h(t) - a \cdot t - b - c \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi t}{365}\right) \right] \cdot 1 &= 0 \\ \sum_{t=1}^{731} \left[h(t) - a \cdot t - b - c \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi t}{365}\right) \right] \cdot t &= 0 \\ \sum_{t=1}^{731} \left[h(t) - a \cdot t - b - c \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi t}{365}\right) \right] \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi t}{365}\right) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Este sistema lineal tiene una única solución (a, b, c) que nos proporciona la función f(t) que mejor se ajusta por mínimos cuadrados a los valores de la radiación absorbida de cada día. La f(t) podremos utilizarla para predecir el valor de la radiación según el material de cubierta del invernadero. Para medir la bondad del ajuste se utiliza el coeficiente de determinación R^2 .

2.2 Ensayos mecánicos

Para la determinación de las propiedades en tracción de los plásticos experimentales, se han extraído diferentes muestras del polímero 40 meses después de la instalación del mismo. Las muestras se han tomado en cuatro áreas de la cubierta: NO, NE, SO y SE. De un ancho de banda de dos metros, se han recortado muestras de 40x40 cm.

La estructura interna del polietileno varía en función de la orientación de las cadenas de etileno que lo componen, y al estar fabricado mediante el procedimiento de extrusión Papaseit, Badiola y Armengol (1997), posee diferentes propiedades mecánicas en su eje transversal y longitudinal. Por ello se procederá a un análisis individual de cada muestra mediante un análisis estadístico de la varianza y un test de mínimas diferencias significativas (MDS).

Para el estudio de la resistencia a tracción, tal y como se indica en UNE-EN ISO 527-1:1996, se deben elaborar 5 probetas para cada muestra de plástico en cada una de las direcciones significativas de la misma. Por ello, en cada una de las muestras se han tomado 5 muestras en la dirección del eje de ordenadas y 5 probetas en la dirección del eje de abscisas. A partir de ahora, para nombrar las muestras del ensayo se denominarán con la siguiente nomenclatura: (nº de polímero: 1)-(posición relativa de la muestra en el invernadero: NW, NE, SW ó SE)-(dirección de corte de la probeta en cada muestra: x ó y). La preparación de las probetas se realizó según UNE-EN ISO 527-3:1996.

Con el fin de obtener un mayor número de datos se han sometido a las muestras a dos ensayos diferentes: en el primer ensayo a tracción se han calculado el esfuerzo máximo a tracción, el esfuerzo en el punto de fluencia, le elongación en el punto de fluencia y las curvas de esfuerzo deformación de cada una de ellas. Este se realizó con una probeta de tipo 2 tal y como indica UNE-EN ISO 527-3:1996. La máquina utilizada para el ensayo es

una HOUNSFIELD SERIE S, modelo H5KS-S. La velocidad de ensayo se ha ajustado a 500 mm/min.

En el segundo ensayo se ha obtenido la elongación máxima en el punto de rotura. Se ha utilizado una probeta en forma de altera dado que la elasticidad del material sobrepasa la capacidad de estiramiento de la máquina, la probeta utilizada según UNE-EN ISO 527-3:1996 es la tipo 5. Se ha utilizado una máquina electromecánica de 100 KN, marca IBERTEST, modelo ELIB-100/S. La velocidad utilizada para el ensayo es de 200 mm/min.

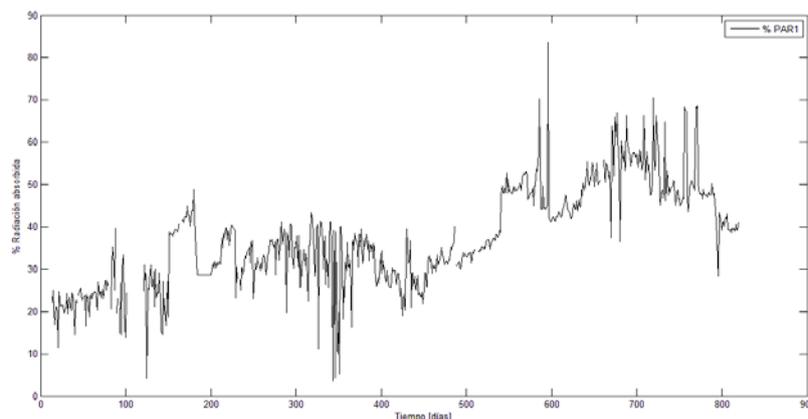
Para determinar la variabilidad espacial de las propiedades mecánicas de los plásticos, los resultados obtenidos por ambos ensayos han sido sometidos a un análisis estadístico de la varianza y un test de mínimas diferencias significativas (MDS), considerando dos posibles factores que producen esta variabilidad en las propiedades mecánicas: el primero de ellos es la posición de la muestra dentro de invernadero (NW, NE, SW, SE), y el segundo factor, reseñado ya con anterioridad, es la orientación de las cadenas de etileno.

3. Resultados y discusión

3.1 Radiación PAR y Global

En la figura 3 se presenta la radiación PAR absorbida (mediante pérdida por reflexión y absorción) para el plástico 1 a lo largo del tiempo. La figura 4 muestra el ajuste mediante una aproximación por el método de los mínimos cuadrados de los datos del porcentaje en tanto por ciento de radiación PAR absorbida por el polímero 1. Mientras en la figura 5 se representa la radiación global absorbida, expresada como porcentaje de la radiación global que incide a lo largo del tiempo. La figura 6 muestra una aproximación por el método de mínimos cuadrados a los datos de absorción de radiación GLOBAL del plástico 1.

Figura 3: Porcentaje de radiación PAR absorbida en función del tiempo



Del resultado de la radiación PAR, y de la radiación GLOBAL, se deduce que la vida útil del plástico 1 es de dos años Lozano y González (1999). A esta conclusión se llega después de observar que la radiación PAR absorbida después del segundo año de uso es del 37,92% para el polímero 1. Igualmente, se comprueba que la radiación GLOBAL absorbida es de 36,71. Si comparamos estos datos con los aportados por Papaseit, Badiola y Armengol (1997), en el que la transmisión de radiación GLOBAL para un polímero es del 90%, entonces se deduce que cuando un plástico absorbe el 45% de la radiación GLOBAL, esto es, ha perdido el 50% de sus valores iniciales y pierde entonces su utilidad como cubierta de invernadero para su uso en agricultura. Los datos de la vida útil coinciden, en gran medida

con los del Polietileno (PE) estudiado por otros autores Papaseit, Badiola y Armengol (1997) y Matallana y Montero (2001), con un espesor que oscilaría entre las 180-200 μm (720-800 galgas).

Figura 4: Ajuste del % de radiación PAR absorbida por el plástico 1 mediante el método de aproximación por mínimos cuadrados

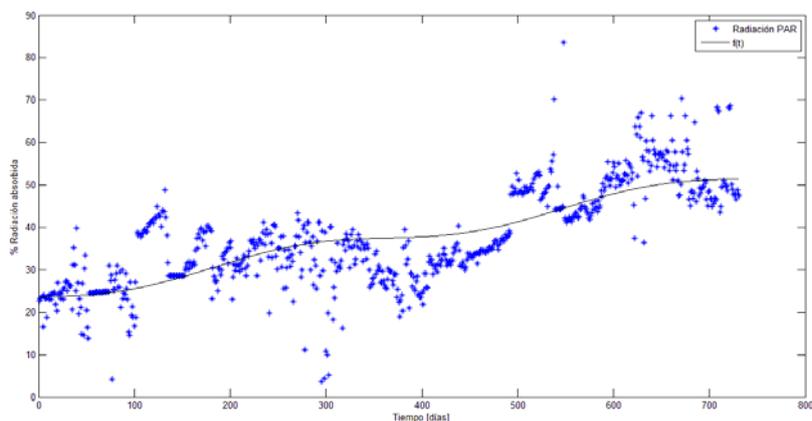
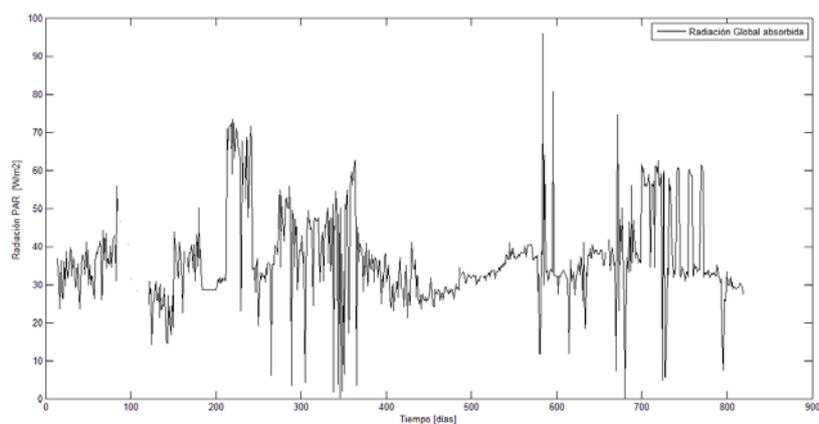


Tabla 1. Resultado 1

Ecuación	R ²
$f(t) = 0,03818 \cdot t + 23,5531 - 1,863217 \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi t}{365}\right)$	0,5636

Figura 5: Porcentaje de radiación GLOBAL absorbida en función del tiempo



En el modelo matemático desarrollado mediante la aproximación por mínimos cuadrados, el valor del coeficiente de determinación es muy pequeño para la radiación PAR y Global. Mientras que en el caso de la radiación PAR la curva que se obtiene es muy plana, para la radiación Global sigue de forma clara la trayectoria de los datos empíricos.

Figura 6: Ajuste del % de radiación GLOBAL absorbida por el plástico 1 mediante el método de aproximación por mínimos cuadrados

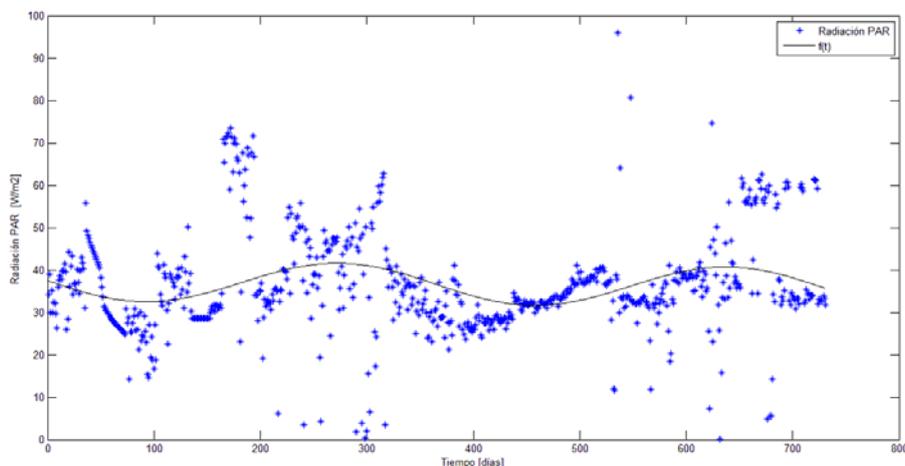


Tabla 2. Resultado 2

Ecuación	R ²
$f(t) = -0,00239 \cdot t + 37,4857 - 4,722129 \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi t}{365}\right)$	0,7005

3.2 Resultados del ensayo a tracción

3.2.1 Variabilidad espacial en función de la posición de la muestra

La resistencia a tracción media del plástico 1 ha sido la siguiente: para la zona de muestreo NW 16,1 MPa, para la zona NE 17,1 MPa, 15,6 MPa para la zona SE y 13,7 MPa para la zona SW, según se muestra en la tabla 3. Según un análisis de la varianza existe un efecto significativo entre la resistencia a tracción del polímero 1 y la posición de la muestra ($P < 0,05$), y según un test de mínimas diferencias significativas (MDS), podemos agrupar a los plásticos en dos categorías, la a compuesta por las zonas NW, NE y SE, y la zona b compuesta por las zonas SE y SW. El resultado para la resistencia a tracción es que ambas cumplen con una distribución normal según los test de Kurtosis y de asimetría.

El esfuerzo en el punto de fluencia para el plástico 1 es de: 10,6 MPa para la zona de muestreo NW, para la zona NE 10,5 MPa, 9,5 MPa para la zona SW y 10,0 MPa para la zona SE, según se muestra en la tabla 3. La distribución de ambas indica que es normal para el test de asimetría, según se muestra en la tabla 4.

De forma análoga, el resultado de la elongación en el punto de fluencia media para el polímero 1 ha sido la siguiente: 274,7% para la zona NW, 313,1% para la zona NE, 313,6% para la zona SE y 243,1% para la zona SW, según se muestra en la tabla 3. El análisis de la varianza para la elongación en el punto de fluencia del plástico 1 indica que existe un efecto significativo entre dicha elongación y la posición de la muestra ($P < 0,05$). Se pueden agrupar los resultados según un test de mínimas diferencias significativas en dos categorías, la a formada por la zona NW, NE y SE, y la b formada por las zonas SW y NW. Los datos se ajustan a una distribución normal según el test de asimetría, como se muestra en la tabla 4.

Tabla 3. Resistencia a tracción (MPa), esfuerzo en el punto de fluencia (MPa), elongación en el punto de fluencia y elongación en el punto de rotura de las diferentes muestras

Resistencia a tracción (MPa)			
Muestra	Media	Desviación	Intervalo de confianza
1-NE-Y	15,7	0,0763	15,6<m<15,8
1-NE-X	18,5	0,0962	18,3<m<18,6
1-NW-Y	18,0	0,6668	17,2<m<18,9
1-NW-X	14,2	3,4255	10,0<m<18,5
1-SE-Y	16,8	0,6710	15,9<m<17,6
1-SE-X	14,4	0,2497	14,1<m<14,7
1-SW-Y	13,1	2,9943	9,4<m<16,7
1-SW-X	14,3	3,3584	10,2<m<18,5
Esfuerzo en el punto de fluencia (MPa)			
1-NE-Y	9,21	0,0890	9,10<m<9,32
1-NE-X	11,9	0,1792	11,6<m<12,1
1-NW-Y	11,8	0,2667	11,5<m<12,2
1-NW-X	9,18	0,4904	8,57<m<9,79
1-SE-Y	11,1	0,3415	10,6<m<11,5
1-SE-X	8,79	0,1276	8,64<m<8,95
1-SW-Y	8,78	0,3296	8,38<m<9,19
1-SW-X	10,2	1,2284	8,69<m<11,7
Elongación en el punto de fluencia (%)			
1-NE-Y	320	0,15220	323<m<323
1-NE-X	300	2,81500	300<m<307
1-NW-Y	290	9,05600	277<m<299
1-NW-X	260	111,3639	123<m<400
1-SE-Y	310	11,3372	291<m<319
1-SE-X	320	0,36510	322<m<323
1-SW-Y	220	150,2827	35<m<408
1-SW-X	270	48,7613	204<m<325
Elongación en el punto de rotura (%)			
1-NE-Y	1000	190,96	776<m<1250

1-NE-X	730	146,06	553<m<956
1-NW-Y	430	136,77	265<m<605
1-NW-X	920	199,61	673<m<1169
1-SE-Y	790	143,02	610<m<966
1-SE-X	970	154,39	777<m<1160
1-SW-Y	900	162,59	693<m<1096
1-SW-X	650	74,96	558<m<744

Los datos de la elongación a la rotura obtenidos sobrepasan el valor del 500% dado por Matallana y Montero (2001). El alto valor obtenido de los mismos, se debe a que este polímero está muy degradado, ya que se encuentra en su cuarto año de vida, según se muestra en la tabla 3.

3.2.2 Variabilidad espacial en función de la orientación de la probeta en la muestra

La resistencia a tracción media de las diferentes zonas de muestreo para el plástico 1 viene reflejada en la tabla 4, en la que se indica el valor medio de la resistencia en función de la orientación (MPa), y si el análisis de la varianza revela que existe un efecto significativo entre la resistencia a tracción y la orientación ($P < 0,05$), y los test de normalidad que cumplen.

El esfuerzo en el punto de fluencia medio de las diferentes zonas de muestreo para el plástico 1 viene reflejada en la tabla 4, en la que se indica el valor medio en el punto de fluencia en función de la orientación (MPa). El análisis de la varianza revela que existe un efecto significativo entre la elongación en el punto de fluencia y la orientación ($P < 0,05$), y el test de normalidad que cumple.

Tabla 4. Variabilidad espacial de la resistencia a tracción, esfuerzo en el punto de fluencia (MPa) y elongación en el punto de fluencia (%) en función de la orientación de la probeta con respecto a la muestra

Muestra	Orientación	Resistencia a tracción (MPa)		
		Valor medio	Efecto	Test
1-NW	X	14,2		
	Y	18,0	SI	SHAPIRO ASIMETRIA
1-NE	X	18,4		
	Y	15,7	SI	SHAPIRO ASIMETRIA
1-SW	X	13,1		
	Y	14,3	NO	SHAPIRO ASIMETRIA
1-SE	X	14,4		
	Y	16,8	SI	SHAPIRO ASIMETRIA

	Y	16,1		
Esfuerzo en el punto de fluencia (MPa)				
	X	9,2		
1-NW	Y	11,8	SI	ASIMETRIA
	X	11,9		
1-NE	Y	9,2	SI	ASIMETRIA
	X	10,2		
1-SW	Y	8,8	SI	ASIMETRIA
	X	8,8		
	Y	11,1		
1-SE	Y	11,3	SI	ASIMETRIA
Elongación en el punto de fluencia (%)				
	X	261,7		
1-NW	Y	287,52	NO	ASIMETRIA
	X	303,4		
1-NE	Y	322,8	SI	ASIMETRIA
	X	204,6		
1-SW	Y	221,5	NO	ASIMETRIA
	X	304,6		
	Y	322,6		
1-SE	Y	269,0	SI	ASIMETRIA

La elongación en el punto de fluencia medio de las diferentes zonas de muestreo para el plástico 1 vienen reflejadas en la tabla 4, en la que se indica el valor medio de la elongación en el punto de fluencia en función de la orientación (%). El análisis de la varianza revela que existe un efecto significativo entre la elongación en el punto de fluencia y la orientación ($P < 0,05$), y el test de normalidad que cumple.

Los resultados de la resistencia a tracción obtenidos por los plásticos durante el ensayo realizado en la Universidad de Almería, según se puede observar en la tabla 3, están incluidos dentro de los valores dados por diversos autores: 11-20 MPa para el PELD Briassoulis et al. (2015), 15,7-19 MPa para PE-IR Briassoulis et al. (2015), 18 MPa para los polietilenos termoaislantes Robledo et al. (1988).

A partir de las curvas de esfuerzo-deformación Horta et al. (2000), se comprueba que los plásticos se corresponden con un material blando y tenaz, en el que se detecta un punto de fluencia con una posterior estabilización. Estas curvas también las clasifica la norma UNE-EN ISO 527-1 como curvas tipo b, que se corresponden con materiales dúctiles con punto de fluencia.

Los resultados obtenidos se ven influenciados por la posición de la muestra de polímero tomada para su análisis en cuanto a la relación de esta posición con la resistencia a la tracción y con la elongación en el punto de fluencia, según se puede observar en la tabla 4. Con respecto a la interacción existente entre la orientación de la probeta dentro de la muestra y las distintas propiedades, se observa que hay diferencias significativas en todas aquellas zonas en las que no existen por la interacción posición de la zona de muestra-propiedades. En cambio, en las zonas en las que sí existe esta interacción zona-propiedad (1-NW y 1-SW para la elongación en el punto de fluencia, y 1-SW para la resistencia a tracción), no existe interacción entre orientación-propiedad. Se deduce entonces que, en las zonas más castigadas, la orientación de las fibras no juega un papel importante en las características resistentes del material de cubierta, mientras que las diferencias entre las dos orientaciones están patentes en las zonas que no han sido tan deterioradas.

4. Conclusiones

Se ha observado que conforme pasa el tiempo aumenta la radiación PAR absorbida en el plástico. Sin embargo, esta tendencia no se ha manifestado claramente respecto a la radiación global. Se ha deducido que la radiación PAR y la Global absorbidas a lo largo del tiempo se pueden ajustar a un modelo matemático en relación al proceso de envejecimiento del polímero:

$$\text{PAR: } f(t) = 0,03818 \cdot t + 23,5531 - 1,863217 \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi t}{365}\right) \quad (4)$$

$$\text{GLOBAL: } f(t) = -0,00239 \cdot t + 37,4857 - 4,722129 \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi t}{365}\right) \quad (5)$$

Dicho modelo permite predecir la radiación absorbida (PAR o Global) en un instante de tiempo determinado y, en función de dicho parámetro, muestran su utilidad para estimar el grado de deterioro del material de cubierta y ayudar en la toma de decisiones necesarias sobre su renovación. La aplicación se considera de elevado potencial a la hora del diseño de cubiertas para invernaderos de uso en agricultura intensiva.

Se ha comprobado que la elongación a la rotura está por encima del 500% dada en la bibliografía. Este alto valor se debe a que el polímero está muy degradado, ya que se encuentra en el cuarto año de vida. También se ve que la zona dónde se ha tomado la muestra influye tanto en la resistencia a tracción como en la elongación en el punto de fluencia. Con respecto a la orientación de las fibras dentro de la muestra, se ha observado que, en las zonas más castigadas, la orientación de las fibras no juega un papel importante en las características resistentes del material, mientras las diferencias entre las dos orientaciones en las zonas menos deterioradas son bastante apreciables.

5. Referencias

Abdelkader, D., Abdel-Hamid, I., Khaled, D., & Hilal-Alnaqb, A. (2015). Degradation of thermomechanical performance and lifetime estimation of multilayer greenhouse polyethylene films under simulated climatic conditions. *Polymer Engineering And Science*, 55, 287-298.

- Amin, M. B., Hamid, H. S., & Khan, J. H. (1995). Photo-oxidative degradation of polyethylene greenhouse film in a harsh environment. *Journal of Polymer Engineering*, 14(4), 253-267.
- Briassoulis, D., Babou, E., Hiskakis, M., Kyrikou, I. (2015). Degradation in soil behavior of artificially aged polyethylene films with pro-oxidants. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(30), art n°. 42289.
- Díaz, T., Espi, E., Fonotecha, A., Jiménez, J. C., López, J., & Salmerón, A. (2001). *Los filmes plásticos en la producción agrícola*. Madrid, España: Reposol. Mundi-Prensa.
- Dilara, P. A., & Briassoulis, D. (1998). Standard testing methods for mechanical properties and degradation of low density polyethylene (LDPE) films used as greenhouse covering materials: a critical evaluation. *Polym. Test*, 17, 549-585.
- Dilara, P. A., & Briassoulis, D. (2000). Degradation and stabilisation of low density polyethylene (LDPE) films used as green-house covering materials. *Journal Of Agricultural Engineering Research*, 76, 309-321.
- Hassini, N., Guenachi, K., Hamou, A., Saiter, J. M., Marais, S., & Beucher, E. (2002). Polyethylene greenhouse cover aged under simulated sub-Saharan climatic conditions. *Polym. Degrad. Stab.*, 75, 247-254.
- Horta, A., Sánchez, C., Pérez, A., & Fernández, I. (2000). *Los plásticos más usados*. Madrid, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia (pp. 355).
- Lozano, M. J., & González, E. (1999). Degradation of polyethylene films for greenhouses: the effect of thermo- and photo-chromatic additives. *Plasticulture*, 117, 2-11.
- Marco, I. (2001). Los plásticos como cubiertas de invernaderos y túneles. *Plasticulture*, 119, 14-25.
- Matallana, A., & Montero, J. I. (2001). *Invernaderos. Diseño, construcción y ambientación*. Bilbao, España: Mundi-Prensa (pp. 209).
- Pacini, L. (2001). Certification of plastic materials applied in agriculture. *Informatore-Agrario*, 57 (34), 43-46.
- Papaseit, P., Badiola, J., & Armengol, E. (1997). *Los plásticos y la agricultura*. Madrid, España: Ediciones de Horticultura S.L. (pp. 204).
- Papadakis, G., Briassoulis, D., Mugnozsa, G., Vox, G., Feuilloley, P., & Stoffers, A. (2000). Radiometric and thermal properties of and testing methods for greenhouse covering materials. *Journal Agricultural Engineering Research*, 77 (1), 7-38.
- Rabek, F. J. (1995). *Polymer Photodegradation. Mechanisms and Experimental Methods*. London: Chapman & Hall.
- Robledo F., Martín L., 1988. *Aplicación de los plásticos en la agricultura*. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa (pp. 573).
- Tidjani, A. (2000). Comparison of formation of oxidation products during photo-oxidation of linear low density polyethylene under different natural and accelerated weathering conditions. *Polym. Degrad. Stab.*, 68, 465-9.
- UNE-EN ISO 527-1 (1996). Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales. Madrid, España: AENOR (pp. 17).
- UNE-EN ISO 527-3 (1996). Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 3: Condiciones de ensayo para películas y hojas. Madrid, España: AENOR (pp. 9).