

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS QUÍMICO BIOLÓGICAS

**Relación Estructura-Propiedad de Envases de Poliestireno Sometidos
a Irradiación Gamma e Intemperismo Natural o Artificial**



TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el Título de

QUÍMICO BIÓLOGO CLÍNICO

Presenta:

Luis Ángel Val Félix

Hermosillo, Sonora.

Agosto de 2018

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**

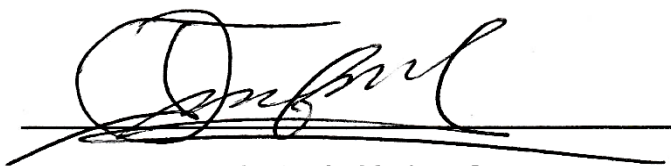


Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

VOTOS APROBATORIOS

Los miembros del jurado calificador del examen profesional de Luis Ángel Val Félix hemos revisado detenidamente su trabajo escrito titulado "Relación estructura-propiedad de envases de poliestireno sometidos a irradiación gamma e intemperismo natural o artificial", y encontramos que cumple con los requisitos para la presentación de su examen profesional. Por tal motivo recomendamos se acepte dicho trabajo como requisito parcial para obtención de título de Químico Biólogo Clínico.

Atentamente:



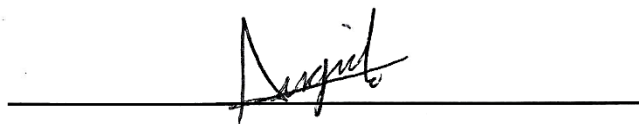
Dr. Tomás Jesús Madera Santana

Presidente



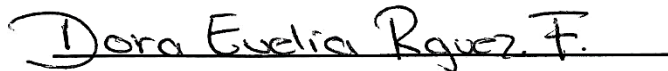
Dr. Fernando Rocha Alonzo

Secretario



Dra. Rocío Sugich Miranda

Vocal



Dra. Dora Evelia Rodríguez Félix

Suplente

AGRADECIMIENTOS

Mi más profundo y sincero agradecimiento a la Universidad de Sonora y a todos los maestros que fueron parte de mi formación académica, en especial, a la M.C. María Rosa Estela Lerma Maldonado, por su gran apoyo y ayuda durante mi carrera.

También quiero agradecer a los miembros del comité por sus comentarios y observaciones en este trabajo.

Al Dr. Tomás Jesús Madera Santana, por todo su apoyo y conocimientos que me ha compartido, como también, su importante guía durante este trabajo.

A la Red Temática de Intemperismo de Materiales Plásticos (REDINMAPLAS) del CONACyT, por el apoyo otorgado para realizar una estancia de investigación en el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA).

Al Laboratorio Nacional de Nanobiomateriales (LANNBIO) del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN Unidad Mérida, por las facilidades brindadas en la caracterización de los materiales de este estudio.

Este trabajo es producto del proyecto: “Estudio comparativo y modelación de las propiedades fisicoquímicas en películas poliméricas sometidas a intemperismo natural y artificial”, el cual contó con el apoyo de REDINMAPLAS del CONACyT.

DEDICATORIA

Dedico esta Tesis a toda mi familia, por ser el pilar más importante. En especial, a mi madre por su cariño, paciencia y su apoyo incondicional. A mi padre, por siempre apoyarme a pesar de la distancia. Gracias por creer en mí.

CONTENIDO

	Página
VOTOS APROBATORIOS.....	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
DEDICATORIA.....	4
CONTENIDO.....	5
LISTA DE TABLAS.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
RESUMEN.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
ANTECEDENTES.....	15
Polímeros.....	15
Polímeros Sintéticos.....	15
Clasificación de Polímeros Sintéticos.....	16
Poliestireno.....	17
Tipos de Poliestireno.....	18
Síntesis.....	19
Aplicaciones.....	20
Irradiación Gamma.....	21
Degradación de Polímeros.....	22
Tipos de Degradación.....	23
Degradación del Poliestireno.....	24
Intemperismo Natural y Acelerado.....	28
OBJETIVOS.....	31
Objetivo General.....	31
Objetivos Particulares.....	31
MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
Materiales.....	32
Envases de Poliestireno.....	32
Métodos.....	32
Irradiación Gamma de las Películas.....	32
Intemperismo Natural.....	32
Intemperismo Artificial.....	32

Propiedades Mecánicas	33
Determinación de Color	33
Análisis Morfológico	34
Espectroscopia de Infrarrojo con Transformadas de Fourier con Reflexión Total Atenuada (ATR-FTIR).....	34
Análisis Termogravimétrico (TGA).....	34
Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).....	34
Análisis Estadístico.....	35
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
Exposición de Muestras a Intemperismo Natural y Condiciones Climáticas.....	36
Exposición de Muestras a Intemperismo Artificial y Condiciones de Exposición.....	39
Propiedades Mecánicas.....	40
Propiedades Ópticas.....	50
Análisis Morfológico.....	58
Análisis Termogravimétrico (TGA).....	61
Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).....	66
Espectroscopia de Infrarrojo con Transformadas de Fourier con Reflexión Total Atenuada (ATR-FTIR).....	68
Mecanismo de Degradación.....	72
CONCLUSIONES.....	77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
ANEXOS.....	90

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
1.	Valores de Tg de las muestras de PS irradiadas con 0 y 45 kGy, expuestas a 0, 110 y 190 días de intemperismo natural y en dos ciclos de calentamiento	67
2.	Valores de Tg de las muestras de PS irradiadas con 0 y 45 kGy, expuestas a 0, 300 y 500 horas de intemperismo artificial y en dos ciclos de calentamiento	67

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1.	Polimerización del etileno.....	15
2.	Estructura química del poliestireno.....	18
3.	Tipos de poliestireno.....	19
4.	Polimerización por radicales libres del poliestireno.....	20
5.	Formación del estado triplete en el poliestireno.....	25
6.	Disociación del enlace C_6H_5-C	26
7.	Formación de enlaces C-H y C-C.....	26
8.	Mecanismo general de fotodegradación del poliestireno.....	27
9.	Reacción de termodescomposición al azar del poliestireno.....	28
10.	Degradación térmica en presencia de oxígeno del poliestireno.....	28
11.	Muestras montadas sobre panel estacionario.....	36
12.	Irradiación de luz solar durante 190 días de exposición.....	38
13.	Humedad relativa en el ambiente durante 190 días de exposición.....	38
14.	Temperatura ambiente durante 190 días de exposición.....	39
15.	Cámara de intemperismo artificial acelerado.....	40
16.	Ciclo utilizando en la cámara de intemperismo acelerado QUV.....	40

17.	Esfuerzo máximo de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo natural.....	42
18.	Esfuerzo máximo de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo artificial.....	43
19.	Elongación a la ruptura de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo natural.....	46
20.	Elongación a la ruptura de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo artificial.....	46
21.	Módulo de elasticidad de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo natural.....	49
22.	Módulo de elasticidad de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo artificial.....	49
23.	Parámetro C^* de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo natural.....	52
24.	Parámetro C^* de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo artificial.....	52
25.	Parámetro h^o de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo natural.....	55
26.	Parámetro h^o de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo artificial.....	55
27.	Parámetro ΔE de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo natural.....	57

28.	Parámetro ΔE de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo artificial.....	57
29.	Imágenes de microscopio óptico digital de la superficie de muestras de PS expuestas a intemperismo natural a una magnificación de 35X.....	60
30.	Imágenes de microscopio óptico digital de la superficie de muestras de PS expuestas a intemperismo artificial a una magnificación de 35X.....	61
31.	Termograma (A) y derivada (B) del análisis termogravimétrico de muestras de PS irradiadas con 0 kGy y expuestas a intemperismo natural a diferentes días de exposición: 0, 110 y 190.....	63
32.	Termograma (A) y derivada (B) del análisis termogravimétrico de muestras de PS irradiadas con 45 kGy y expuestas a intemperismo natural a diferentes días de exposición: 0, 110 y 190.....	63
33.	Termograma (A) y derivada (B) del análisis termogravimétrico de muestras de PS irradiadas con 0 kGy y expuestas a intemperismo artificial a diferentes horas de exposición: 0, 300 y 500.....	65
34.	Termograma (A) y derivada (B) del análisis termogravimétrico de muestras de PS irradiadas con 45 kGy y expuestas a intemperismo artificial a diferentes horas de exposición: 0, 300 y 500.....	65
35.	Espectro de FTIR de muestra de PS irradiada con 0 kGy y expuesta a intemperismo natural. (A) (3600-2600 cm^{-1}) y (B) (1900-600 cm^{-1}), a diferentes tiempos de exposición: (a) 0, (b) 45, (c) 70, (d) 110, (e) 145 y (f) 190 días.....	69
36.	Espectro de FTIR de muestra de PS irradiada con 45 kGy y expuesta a intemperismo natural. (A) (3600-2600 cm^{-1}) y (B) (1900-600 cm^{-1}), a diferentes tiempos de exposición: (a) 0, (b) 45, (c) 70, (d) 110, (e) 145 y (f) 190 días.....	69

37. Espectro de FTIR de muestra de PS irradiada con 0 kGy y expuesta a intemperismo artificial. (A) (3600-2600 cm^{-1}) y (B) (1900-600 cm^{-1}), a diferentes tiempos de exposición: (a) 0, (b) 100, (c) 200, (d) 300, (e) 400 y (f) 500 horas..... 70
38. Espectro de FTIR de muestra de PS irradiada con 45 kGy y expuesta a intemperismo artificial. (A) (3600-2600 cm^{-1}) y (B) (1900-600 cm^{-1}), a diferentes tiempos de exposición: (a) 0, (b) 100, (c) 200, (d) 300, (e) 400 y (f) 500 horas..... 71
39. Esquema del mecanismo de fotodegradación para el PS sometido a la irradiación gamma..... 74

RESUMEN

Los plásticos son materiales utilizados en todo el mundo, por lo cual tienen una gran demanda en varias aplicaciones, como por ejemplo, en envases para alimentos. Uno de los materiales empleados para dichos envases es el poliestireno (PS), el cual es uno de los plásticos más utilizados, gracias a sus propiedades fisicoquímicas y su uso seguro. El alimento dentro del envase de PS sufre un proceso conocido como irradiación alimentaria, en donde se busca la inocuidad del alimento. El método más efectivo y utilizado es la irradiación gamma. La irradiación gamma además de influir en el alimento, lo hace también en el envase de PS. Una vez que termina la vida útil del envase, este será desechado al ambiente y estará expuesto a la intemperie, sufriendo un proceso de fotodegradación. En el presente trabajo se estudiaron los efectos del intemperismo natural y artificial (fotodegradación) en envases de PS con diferentes dosis de irradiación gamma, con la finalidad de conocer y monitorear los cambios que se presentan en este material al estar expuestos a ambos tipos de intemperismo durante un periodo de tiempo. Estos cambios se analizaron utilizando varias técnicas analíticas como son: ensayo de propiedades mecánicas, análisis de color y superficie, espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier, análisis termogravimétrico y calorimetría diferencial de barrido. Al estar expuestos los materiales, presentan disminución de algunas propiedades mecánicas y el aumento en otras. Además, cambios en el color, propiedades térmicas y estructurales. A pesar de la estabilidad del PS a la irradiación gamma, presenta un efecto combinado con la luz UV, aumentando el módulo de elasticidad. Debido a este efecto combinado, el PS recupera su estructura inicial, lo que podría prolongar el proceso de degradación en la intemperie.

INTRODUCCIÓN

Los plásticos debido a su versatilidad se convierten en elementos importantes para proporcionar una mejor calidad de vida. Los plásticos son materiales basados en polímeros sintéticos, que son utilizados en la industria automotriz, envases, electrónica, pinturas, etc.; están entre los materiales más comúnmente utilizados en el mundo. La producción anual de materiales plásticos ha crecido exponencialmente en las últimas décadas. Aproximadamente 322 millones de toneladas fueron producidas en 2015 (Plastics Europe, 2016). Los materiales plásticos tienen beneficios sustanciales en términos de su bajo peso, durabilidad y un menor costo con respecto a muchos otros tipos de materiales (Andrady y col., 2009; Thompson y col., 2009).

Dada la variedad de los plásticos, estos pueden utilizarse en varios tipos de envases para alimentos, que van desde los envases flexibles hasta los rígidos. El material plástico que se emplea como envase de un alimento debe cumplir con las funciones establecidas en la Comisión del Codex Alimentarius (Robertson, 2006). Entre estos materiales se encuentra el PS.

El PS es un plástico versátil que se utiliza para fabricar una amplia variedad de productos de consumo. Es un polímero amorfo y tiene particulares propiedades como son alta transparencia, incoloro, duro, pero quebradizo con baja resistencia al impacto. El PS se ha utilizado durante más de 30 años como material para el envasado de alimentos, y su uso seguro está plenamente respaldado mediante estudios (ILSI, 2002).

Por otra parte, la irradiación alimentaria es una tecnología eficaz para reducir las pérdidas postcosecha y garantizar la calidad higiénica de los alimentos. Los alimentos se encuentran envasados durante el proceso de irradiación, en una gran diversidad de configuraciones de envasado, tales como, películas, bandejas, recipientes (clamshells), entre otros. Se sabe que la irradiación gamma es el método más efectivo y utilizado como técnica de esterilización, debido a su alto poder de penetración (George y col., 2007).

Por otro lado, los materiales plásticos son capaces de experimentar la degradación, la cual se define como el proceso que induce cambios en las propiedades del polímero (deterioro de la funcionalidad) debido a reacciones químicas, físicas o biológicas (Shah y col., 2008). Las rutas de degradación se atribuyen principalmente a la formación de radicales macromoleculares,

debido a la acción de alguna fuerza motriz externa (temperatura, esfuerzo mecánico, radiaciones, etc.), y a las reacciones posteriores de tales radicales con las macromoléculas de polímero y oxígeno (La Mantia y col., 2017). La degradación de los materiales poliméricos da como resultado la escisión de enlaces y posteriores transformaciones químicas (Shah y col., 2008).

La degradación de los plásticos puede ocurrir bajo condiciones de intemperismo natural o artificial acelerado, la cual es considerada por muchos como una ciencia que estudia la exposición de materiales poliméricos a un entorno natural o a una cámara de intemperismo de algún tipo. (Kockott y col., 1989; Hamid y col., 1995; Jacques y col., 2000). La degradación de los materiales poliméricos a través del intemperismo natural o artificial, es un tema que alude a un modelo que permite conocer la durabilidad.

El intemperismo natural significa que las muestras están sujetas a condiciones naturales o del medio ambiente, es decir, luz solar directa, temperatura ambiente exterior y humedad. Por otra parte, se aplica el intemperismo artificial acelerado para realizar pruebas de durabilidad en un lapso de tiempo más corto que en las pruebas de intemperismo naturales, en condiciones de laboratorio y a través de la exposición de muestras a luz ultravioleta artificial, calor y agua (Baukh y col., 2013). De acuerdo con Jacques y col. (2000), el intemperismo está transitando de métodos de exposición de baja tecnología hacia un complejo laberinto de modelos matemáticos, monitoreo ambiental y mecanismos de fotodegradación. Esta ciencia está permitiendo mayor exactitud de los modelos de predicción de desempeño de los materiales expuestos a diferentes condiciones ambientales.

ANTECEDENTES

Polímeros

Un polímero es una macromolécula formada por la unión repetitiva de unidades pequeñas denominadas unidades monoméricas o monómeros mediante enlaces covalentes, formando largas y flexibles cadenas cuyos átomos en la cadena principal son normalmente carbono (C), oxígeno (O), nitrógeno (N) o azufre (S), combinados en una configuración única para cada polímero (Carragher, 2003; Giles, 2005). Los polímeros, que abarcan materiales tan diversos como los plásticos, el caucho y los adhesivos, presentan pesos moleculares que van desde 10,000 hasta más de 1,000,000 g/mol.

Polímeros Sintéticos

Los polímeros sintéticos se preparan típicamente por polimerización de monómeros derivados de petróleo o de gas natural (Thompson y col., 2009). La transformación monómero/polímero se lleva a cabo mediante las reacciones de polimerización. Se muestra como ejemplo de transformación monómero/polímero, la polimerización del etileno en la Figura 1. Los polímeros se utilizan en un sin número de aplicaciones, incluyendo aparatos domésticos, recubrimientos, pinturas, adhesivos, llantas, espumas y empaques (Askeland, 1998).

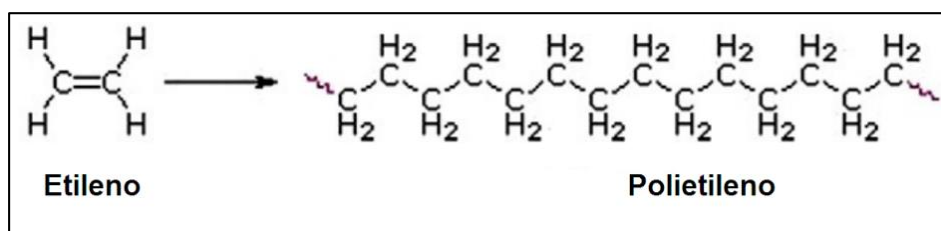


Figura 1. Polimerización del etileno (Speight, 2011).

Han adquirido un papel vital como materiales en aplicaciones modernas en casi todos los sectores de la industria manufacturera, incluyendo aeroespacial, automotriz, infraestructura, productos de consumo, entre otras (Zhang y col., 2017).

Los polímeros sintéticos convencionales poseen buenas propiedades mecánicas, estabilidad térmica, no se degradan fácilmente debido a su alto peso molecular y su carácter hidrofóbico (Iovino y col., 2007; Dumitriu, 2013). Muchos artículos que se hicieron previamente a partir de materiales naturales tales como: madera, algodón, lana, hierro, aluminio y vidrio; están siendo reemplazados o parcialmente sustituidos por polímeros sintéticos (Matar, 2001).

En el siglo anterior y lo transcurrido en el presente, los avances sorprendentes en la ciencia de los materiales y las tecnologías hicieron que nuestra vida cotidiana cada vez más cómoda y segura (Rizzarelli, 2014). La diversidad de los polímeros sintéticos y la versatilidad de sus propiedades, facilitan la producción de una amplia gama de productos plástico que traen los avances tecnológicos, el ahorro de energía y muchos otros beneficios sociales (Andrady y col., 2009).

Clasificación de Polímeros Sintéticos

Los polímeros sintéticos se pueden clasificar en polímeros de adición o condensación de acuerdo con el tipo de reacción. Una segunda clasificación depende del tipo de monómero y de la unión presente en la unidad repetitiva en poliolefinas, poliésteres, poliamidas, etc. Otras clasificaciones dependen de la técnica de polimerización (masa, emulsión, suspensión, etc.) o en el uso final del polímero (Matar, 2001). Sin embargo, el método más utilizado para describir a los polímeros sintéticos es en función de su comportamiento mecánico y térmico, por lo que se han establecido los términos: termoplástico, termoestable y elastómero (Askeland, 1998).

- **Termoplásticos:** son materiales que están compuestos por largas cadenas producidas por la unión de monómeros, y se comportan típicamente de una manera plástica y dúctil. Al aplicar temperaturas altas, estos polímeros se ablandan y presentan una consistencia viscosa. Los termoplásticos incluyen polietilén tereftalato (PET), polietileno de baja densidad (LDPE), cloruro de polivinilo (PVC), polietileno de alta densidad (HDPE), PS, entre otros. Las aplicaciones típicas incluyen contenedores de comida, envases, aislantes, juguetes, electrónica, entre otras.
- **Termoestables:** están compuestos por largas cadenas de moléculas con fuerte enlaces entrecruzados con las cadenas del polímero para formar estructuras de redes tridimensionales. Estos polímeros generalmente son más resistentes, aunque más frágiles que los termoplásticos.

Los polímeros termoestables no tienen una temperatura de fusión y son difíciles de reprocesarlos una vez ocurrida la formación de enlaces cruzados. Los plásticos termoestables incluyen resinas epóxicas, melamina, resinas fenólicas, poliuretano, entre otros. Los termoestables son ampliamente utilizados en productos electrónicos y automotrices (Askeland, 1998; UNEP, 2009).

- Elastómeros: presentan una estructura intermedia, en la cual se muestra una ligera formación de enlaces entrecruzados en sus cadenas. Los elastómeros pueden deformarse elásticamente sin cambiar su forma de manera permanente. Los elastómeros pueden ser polímeros termoplásticos o termoestables, dependiendo de su química y del mecanismo de procesamiento. Los elastómeros incluyen poliuretanos, neopreno, polibutadieno, goma natural, entre otros. Los elastómeros son ampliamente utilizados en el sector textil y automotriz (Askeland, 1998; Giles, 2005).

Poliestireno

El PS es un polímero sintético y termoplástico producido a partir del estireno mediante polimerización por radicales libres, polimerización iónica o polimerización de coordinación (Mishra, 1998). La estructura química del PS presenta una larga cadena hidrocarbonada con un grupo fenilo unido cada dos átomos de carbono, como se muestra en la Figura 2. En su forma sin procesar, el PS es quebradizo y generalmente transparente. Puede ser extruido solamente el PS (monoextruido) o extruido con otros plásticos (coextruido), moldeado por inyección o espumado para producir una amplia gama de productos (Marsh y col., 2007; UNEP, 2009). El PS se presenta en dos formas principales: PS cristalino o de uso general (GPPS), debido su semejanza al cristal utilizado en ventanas, copas, botellas, etc., y PS de alto impacto (HIPS), que es opaco debido a la adición de partículas de caucho. El GPPS cristalino tiene excelentes características de flujo y transparencia, mientras que HIPS tiene excelentes propiedades físicas con fácil procesamiento y mayor resistencia al fundirse (Giles, 2005). El PS es uno de los materiales más importantes de la industria del plástico moderno. Se ha utilizado en todo el mundo, debido a su bajo costo y sus excelentes propiedades físicas como baja densidad, transparencia, no es higroscópico, punto de fusión bajo y adaptabilidad a la esterilización por radiación (Giles, 2005; Marsh y col., 2007; Rabie y col., 2008; Sastri, 2013).

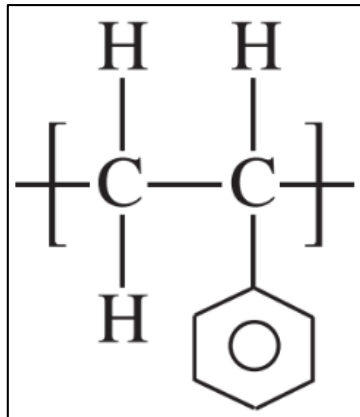


Figura 2. Estructura química del PS (Carraher, 2003).

Tipos de Poliestireno

Por su estructura química, el PS puede clasificarse en tres tipos (Cheremisinoff, 1989; Yousif y col., 2013).

- Isotáctico: contiene todos los grupos fenilo a un mismo lado de la cadena. Es un material altamente cristalino con un punto de fusión de 240 °C.
- Atáctico: los grupos fenilo se distribuyen aleatoriamente en la cadena. Es un polímero vítreo con un punto de reblandecimiento de 80 °C y completamente amorfo. Es el tipo de PS mayormente utilizado en diferentes aplicaciones.
- Sindiotáctico: contiene grupos fenilo en lados alternados de la cadena, es altamente cristalino y tiene la tendencia a cristalizar muy rápidamente, lo que le da las propiedades favorables de alta temperatura de fusión y resistencia química (Saitoh y col., 2003; Gupper y col., 2005).

En la Figura 3 se muestra la representación estructural de los tres tipos de PS.

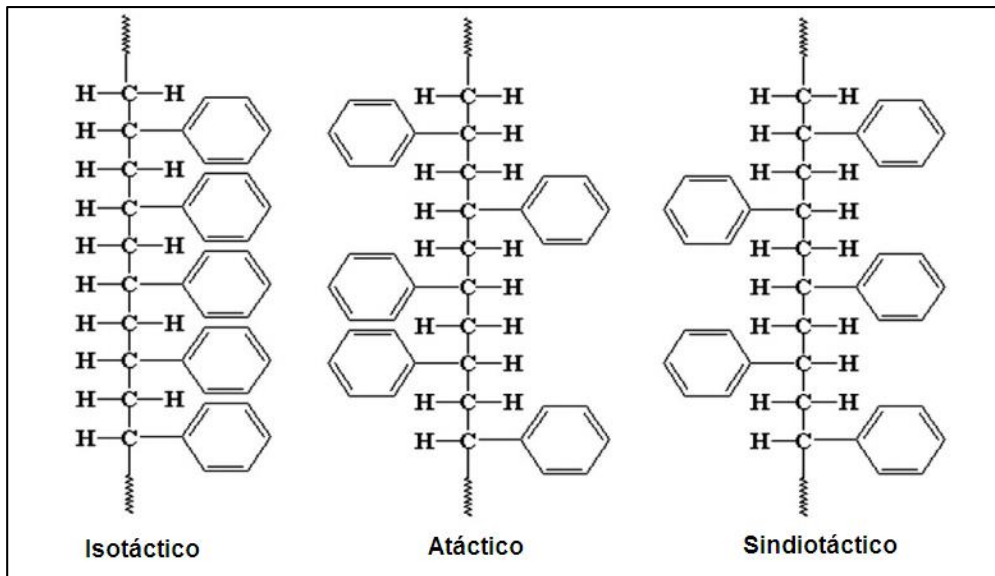


Figura 3. Tipos de PS (Yousif y col., 2013).

Síntesis

El PS se fabrica fácilmente mediante la polimerización por radicales libres de estireno, como se muestra en la Figura 4. La polimerización por radicales libres se inicia principalmente mediante radicales derivados de la descomposición homolítica de un compuesto de bajo peso molecular adecuado, denominado iniciador. El estireno con o sin diluyentes se mezcla con un iniciador, como el peróxido de dibenzoilo, y se calienta a una temperatura de 120 °C. Los radicales se transfieren de las moléculas iniciadoras a las unidades monoméricas presentes. La siguiente etapa de polimerización es la propagación de la cadena, donde se añaden hasta miles de moléculas de monómero a la cadena. Un nuevo centro activo se forma al final de la cadena después de cada adición. Por último, la terminación de la polimerización se produce generalmente a través de reacciones bimoleculares entre dos radicales poliméricos a temperaturas de hasta 160 °C. Existen dos modos de terminación: combinación y desproporción. En el primero, dos radicales poliméricos se combinan para formar una sola molécula. En el segundo, se transfiere un átomo de hidrógeno de un radical polímero a otro para formar dos moléculas de polímero, una de las cuales tiene un doble enlace terminal. El estireno y el diluyente que no han reaccionado se desprende por medio de vacío, dejando en el interior del reactor el PS de alto peso molecular (Wünsch, 2000; Sastri, 2013).

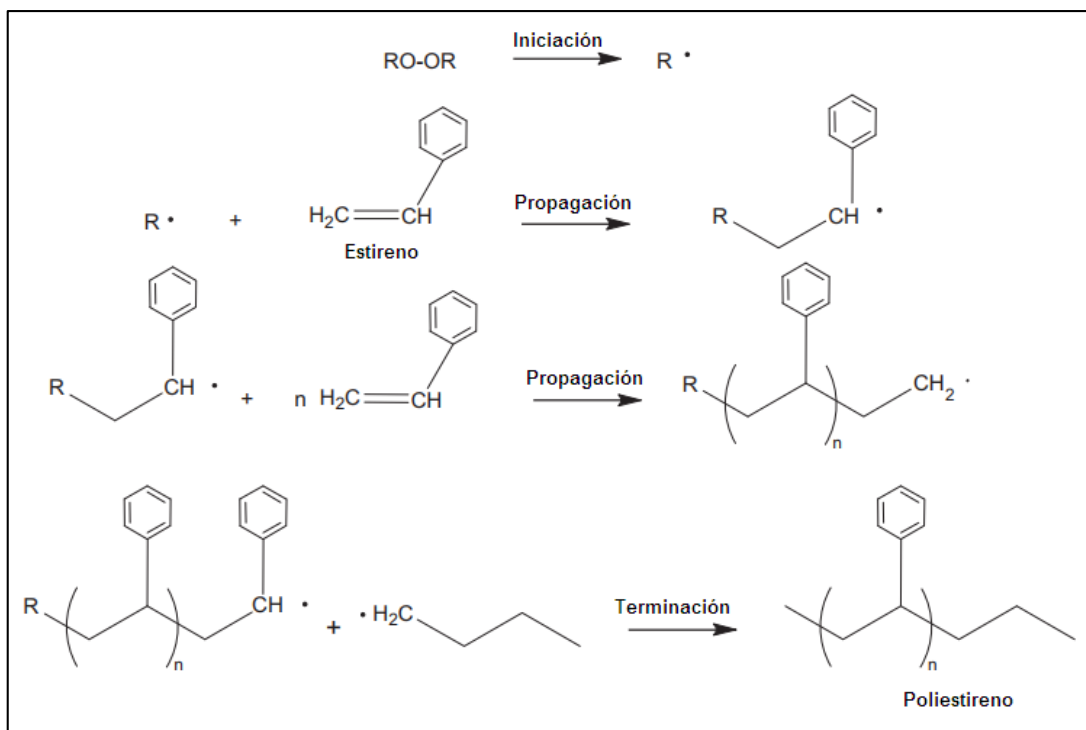


Figura 4. Mecanismo de polimerización por radicales libres del PS (Sastri, 2013).

Aplicaciones

El PS es uno de los polímeros más utilizados debido a su fácil disponibilidad, precio accesible, inercia química y capacidad para ser funcionalizado fácilmente (Kaboudin y col., 2017). El PS tiene una amplia variedad de aplicaciones que van desde el embalaje, artículos manufacturados, construcción, aplicaciones médicas, artesanías, entre otros (Marsh y col., 2007). El uso más importante del PS es el envasado (Matar, 2001). Las formas comunes y más ampliamente utilizadas del PS en la industria son: poliestireno de uso o propósito general (GPPS), poliestireno expandido o espumado (EPS), poliestireno de alto impacto (HIPS) y poliestireno sindiotáctico (SPS) (Chaukura y col., 2016).

El GPPS es del tipo atáctico y posee buenas propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas (Srivastava y col., 2011). Sus aplicaciones son en botellas, juguetes, electrónica, embalaje, recipientes para alimentos, vasos desechables, accesorios de iluminación, partes de refrigeradores, contenedor de cosméticos, entre otras (Meenakshi y col., 2002; UNEP, 2009). El GPPS también se utiliza en aplicaciones médicas que incluyen utensilios de laboratorio, tales

como: placas Petri, bandejas y celdas de cultivo de tejidos, entre otras (Sastri, 2013).

El EPS es un material opaco, rígido y ligero con propiedades de protección contra impactos y aislamiento térmico. Las aplicaciones típicas incluyen envases protectores, tales como recipientes, cubiertos plásticos desechables, tazas, platos, botellas y bandejas para alimentos (Marsh y col., 2007). Los contenedores de EPS son ampliamente utilizados en el servicio y embalaje de alimentos. Los productos electrónicos se envasan en cajas junto con material de soporte de EPS que aísla y protege contra daños durante el transporte (Park y col., 2003).

El HIPS es un polímero opaco, no transparente, flexible, de bajo costo y fácil de procesar. Mediante la adición de polibutadieno al PS, se mejora su resistencia al impacto, presentando excelentes propiedades mecánicas y aislantes. El HIPS tiene un uso extensivo en muchas aplicaciones diversas, tales como embalaje, juguetes, botellas, electrodomésticos, aparatos electrónicos y componentes industriales ligeros (Brennan y col., 2002; Santana y col., 2003). Es utilizado en dispositivos médicos en productos termoformados, tales como bandejas para catéter, bandejas para bomba cardiaca y bandejas epidurales (Sastri, 2013).

El SPS presenta una alta resistencia al calor, alta tasa de cristalización, excelente resistencia química contra ácidos, bases, aceites, agua y vapor, buenas propiedades eléctricas (como materiales aislantes), baja absorción de humedad, entre otras propiedades. Sus principales aplicaciones son en la industria automotriz como parte de centros de distribución de energía, sistemas de refrigeración e iluminación, en la electrónica (como en conectores, enchufes, etc.) y un amplio uso en electrodomésticos (Schellenberg y col., 2006).

Irradiación gamma

Los rayos gamma son una forma de radiación electromagnética con energía extremadamente elevada. La radiación de rayos gamma tiene longitud de onda mucho más corta que la luz visible, por lo que los fotones de rayo gamma tienen más energía que los fotones de luz. El proceso de radiación gamma se define como la exposición de un producto a la radiación ionizante de una manera controlada. Esta exposición controlada garantiza que la dosis específica de radiación se entrega al producto. En su empleo como medio para esterilización de alimentos, envases u otros productos; la dosis específica es la que reducirá la carga biológica al nivel deseado, mientras que al mismo tiempo minimizará el efecto sobre el producto (Reid, 1995).

Por otro lado, los efectos de la radiación de alta energía ionizante sobre un material polimérico pueden resultar en una mejora de algunas propiedades físicas y un deterioro en otras. Con frecuencia disminuye la resistencia máxima y/o elongación a la ruptura, mientras que el módulo elástico puede aumentar. Dos importantes efectos moleculares de la radiación sobre los polímeros son: la escisión de la cadena y la reticulación; por lo que el peso molecular y las propiedades físicas pueden ser alterados significativamente por una dosis de radiación relativamente pequeña (Bowmer y col., 1979).

Algunos autores señalan que el PS es estable a la radiación gamma debido a su alto contenido aromático, ya que las nubes de electrones son capaces de absorber la radiación eliminando la generación de radicales libres reactivos. Sin embargo, la aplicación de la irradiación gamma en PS utilizado como material de envase para alimentos, aunado a la exposición de intemperismo natural y artificial, no ha sido reportada. Por lo que no se tiene información sobre el proceso de degradación del PS bajo estas circunstancias.

Degradación de Polímeros

La degradación del polímero es un cambio en la estructura química y/o física de la cadena polimérica, provocando la disminución de sus propiedades como el esfuerzo máximo, el color, la forma, el peso molecular, entre otras; bajo la influencia de uno o más factores ambientales, tales como calor, luz, productos químicos o cualquier otra fuerza aplicada (Speight, 2011). La degradación del polímero se produce cuando los enlaces C-C u otros enlaces, sufren una ruptura a lo largo de la cadena polimérica. La degradación del polímero da lugar a cadenas más cortas que a su vez conduce a una disminución en el peso molecular. Esto se puede producir por escisión aleatoria o específica de cadena. La susceptibilidad de un polímero a la degradación depende de su estructura química, destacando la existencia de determinados grupos químicos que pueden estar presentes en la cadena principal o bien en las ramificaciones, según se trate de un polímero de estructura lineal o ramificada (Giles, 2005; San Andrés y col., 2010; Speight, 2011). Existen otros factores de orden estructural, tales como su conformación espacial y su temperatura de transición vítrea, que son responsables de que la propia matriz polimérica favorezca la estabilidad del material o, por el contrario, propicie su alteración (McNeill, 1992). Por otro lado, la degradación de los polímeros generalmente comienza en la superficie externa y penetra gradualmente al material (Blaga, 1980). El proceso de degradación en los materiales poliméricos representa el fracaso en su funcionamiento (Speight, 2011). Por lo tanto, el compor-

tamiento de degradación de los polímeros juega un papel crucial en la elección de los materiales para muchas aplicaciones.

Tipos de Degradación de Polímeros

Los tipos de degradación de polímeros son muy similares ya que todos ellos implican reacciones químicas que dan lugar a la escisión de los enlaces. Las vías de degradación de polímeros deben atribuirse esencialmente a la formación de radicales macromoleculares, debido a la acción de alguna fuerza motriz externa como el calor, luz, radiación ionizante, acción mecánica, o por hongos, bacterias, levaduras, algas y sus enzimas, y a las reacciones posteriores de dichos radicales con las macromoléculas poliméricas y oxígeno. Las especies oxigenadas inestables formadas, evolucionan hacia la formación de macromoléculas estables con grupos oxigenados y dan lugar a un cambio dramático de la estructura molecular (Yousif y col., 2013; La Mantia y col., 2017). Los diferentes tipos de degradación de polímeros pueden ser indeseables, tales como cambios durante el uso, o deseables como en biodegradación (Speight, 2011). Los tipos de degradación de polímeros se presentan a continuación:

- Oxidación: el oxígeno en combinación con diferentes agentes puede provocar cambios químicos en la estructura del material.
- Hidrólisis: se produce al contacto del material con un medio acuoso.
- Degradación Térmica: las reacciones de termodescomposición o degradación térmica se refiere al caso en que el polímero, a temperaturas elevadas, comienza a sufrir cambios químicos sin la participación simultánea de otro compuesto. Se puede producir en ausencia de oxígeno (pirólisis) o en presencia de éste (termooxidación). La tendencia de los polímeros a experimentar reacciones de tipo pirolítico tiene relación con las energías de enlace asociadas a su composición química (Guaita y col., 1985; McNeill, 1992).
- Biodegradación: está fuertemente relacionada con la degradación química en lo que se refiere al ataque microbiano. Los microorganismos producen una variedad de enzimas que son capaces de reaccionar con los polímeros naturales y sintéticos (Dindar y col., 2001).
- Degradación radiolítica: cuando los materiales poliméricos se someten a radiación de alta energía (por ejemplo, radiación gamma) se observan cambios en su estructura molecular, principalmente escisión en cadena, lo que conduce a una

reducción en la masa molar (Vinhas y col., 2003).

- Degradación mecánica: se refiere a efectos macroscópicos producidos bajo la influencia de fuerzas de cizallamiento. Estas fuerzas producen la formación de macro radicales (Potts, 1981).
- Fotodegradación: es la degradación de una molécula fotodegradable causada por la absorción de fotones, particularmente las longitudes de onda que se encuentran en la luz solar, como la radiación infrarroja, la luz visible y la luz ultravioleta (Yousif y col., 2013).

Degradación del Poliestireno

Los polímeros son degradados debido a factores ambientales. Las condiciones de uso juegan un papel clave en la degradación de los plásticos (Yousif y col, 2013). De acuerdo con la literatura, no se ha encontrado evidencia de biodegradación de PS con ensayos de enterramiento a largo plazo en el suelo por 32 años (Otake y col., 1995). Se sabe que el PS es uno de los polímeros más estables a la radiación, gracias a los anillos aromáticos en la estructura que proporcionan una acción protectora hacia efectos de degradación radiolítica. Por otro lado, el efecto de la luz UV y el calor causan una pérdida en las propiedades mecánicas y de tensión del PS (Plester, 1973; Kiatkamjornwong y col., 1999). Por ello, la fotodegradación y termodescomposición del PS son los tipos de degradación principalmente estudiados. Es bien sabido que los polímeros orgánicos comerciales pueden degradarse cuando se exponen a luz UV en presencia de aire, causando la descomposición de los enlaces poliméricos C-C como consecuencia de la degradación. El PS, como diferentes materiales poliméricos expuestos a la luz solar, sufre una degradación que acorta su vida útil, principalmente por una secuencia de fotooxidación. La fotodegradación del PS en el aire provoca decoloración (amarillamiento), reticulación y escisión de la cadena, debido a la oxidación (Rabie y col., 2013; Yousif y col., 2013). Por otro lado, la espectroscopia de absorción infrarroja (IR) se usa para detectar la formación o desaparición de grupos funcionales, es decir, cambios químicos del polímero. Dado que el PS tiene generalmente una reactividad relativamente baja a la radiación fototransparente, el análisis espectroscópico FTIR sirve como una herramienta potente para la detección de cambios químicos muy pequeños en el polímero (Rabie y col., 2013). La irradiación con luz UV a $\lambda > 300$ nm de películas de PS conduce a cambios en los espectros IR en las regiones carbonilo e hidroxilo (Leroux y col., 2005). La irradiación de PS por UV y luz visible con longitud de onda $\lambda < 400$ nm conduce a la formación de radicales cuya naturaleza depende de la composición espectral de la luz y la condición de irradiación (Kuzina y col., 1993).

Las principales reacciones observadas en la fotodegradación del PS son escisión de enlace, reticulación de cadenas y degradación oxidativa. A pesar de las investigaciones realizadas, el mecanismo de fotodegradación del PS sigue siendo muy controvertido. Un número de impurezas e irregularidades en PS, tales como hidroperóxidos, grupos carbonilo aromáticos, enlaces de olefinas y enlaces de peróxido de cadena, pueden ser responsables de la fotoiniciación de la oxidación radical del PS (Rabek, 1987). El mecanismo de la fotodegradación del PS en películas sólidas depende de la movilidad de los radicales libres en la matriz polimérica, y de su recombinación bimolecular. Los radicales libres de hidrógeno se difunden muy fácilmente a través de la matriz polimérica y se combinan en pares o átomos de hidrógeno abstractos de cromóforos poliméricos. El radical fenilo tiene una movilidad limitada, aunque puede extraer hidrógeno del entorno cercano, combinarse con un radical polimérico o bien con radicales de hidrógeno (Ranby y col., 1974).

La absorción de los cuantos de luz por los anillos de benceno es el primer paso que produce la excitación de los anillos en los estados de singlete excitados que son transformados por cruce entre sistemas (ISC), al estado de triplete como se muestra en la Figura 5.

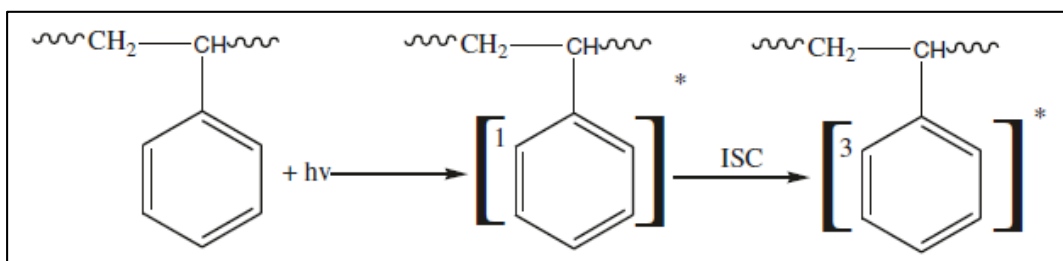


Figura 5. Formación del estado triplete después de la absorción de luz por el anillo aromático en el PS (Yousif y col., 2013).

El paso secundario en la reacción del estado triplete del benceno, se produce por uno de los dos modos siguientes: El primero, la energía triplete del benceno excitado puede dar lugar a la disociación del enlace $\text{C}_6\text{H}_5\text{-C}$, como se muestra en la Figura 6.

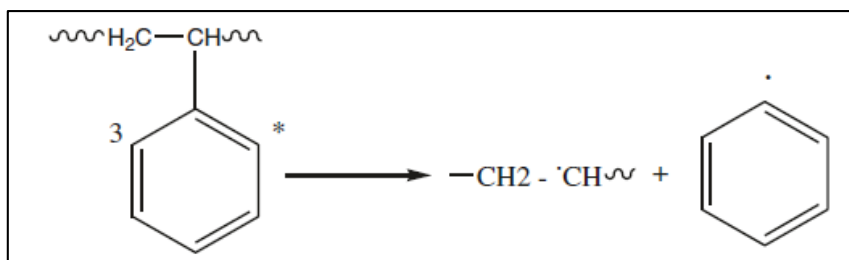


Figura 6. Disociación del enlace C₆H₅-C (Yousif y col., 2013).

En el segundo, la excitación de energía triplete puede transferirse mediante procesos de transferencia de energía intramolecular a los enlaces C-H o C-C (Figura 7).

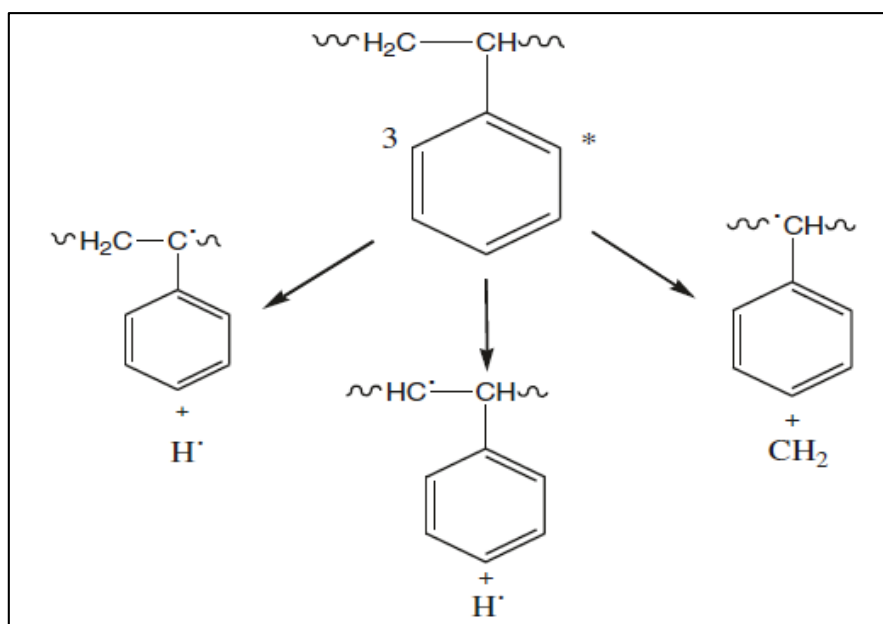


Figura 7. Formación de enlaces C-H y C-C (Yousif y col., 2013).

Con base en la espectroscopia de IR, se propuso un proceso de fotodegradación de las películas fotoirradiadas de PS, que indicaba la formación de radicales peróxido e intermedios de hidroperóxido. Las reacciones fotoquímicas causan la disociación de un radical PS creando un estado excitado electroquímico. El radical PS se convierte en radical peróxido por reacción con oxígeno. El radical peróxido sufre escisión de cadena y formación de compuestos de carbonilo, como se muestra en la Figura 8.

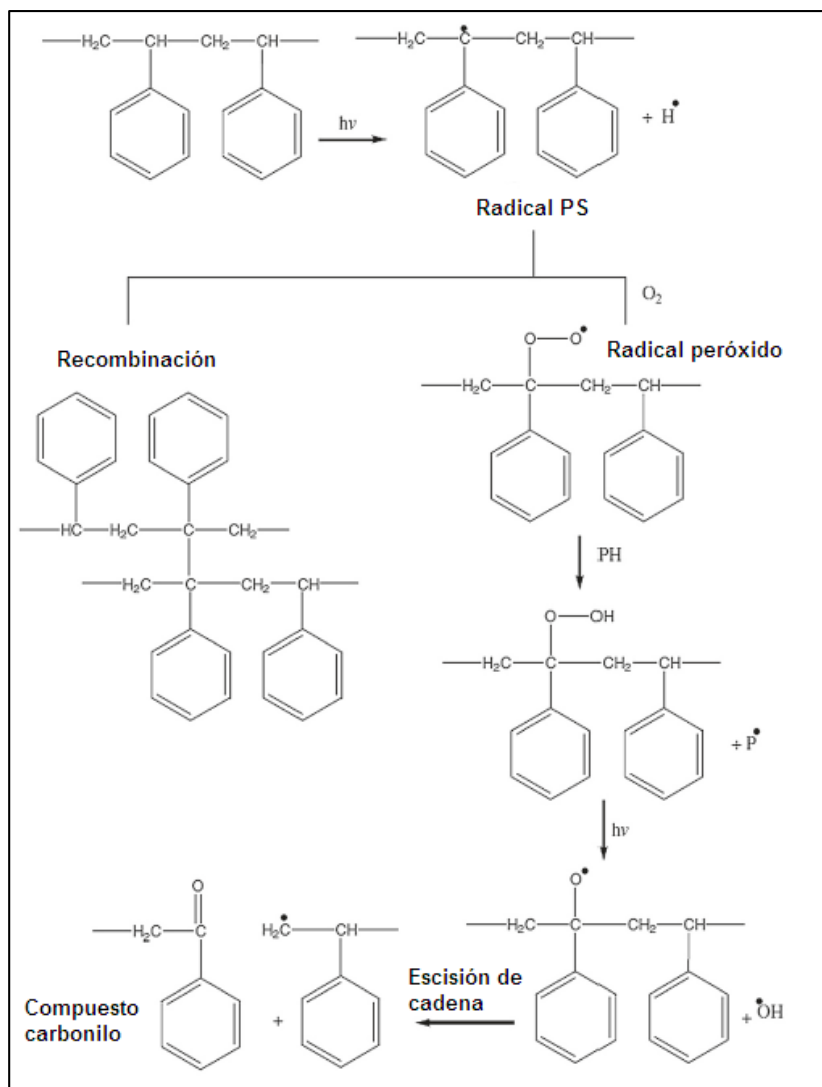


Figura 8. Mecanismo general de fotodegradación del PS (Yousif y col., 2011).

Por otra parte, el tratamiento térmico de los polímeros puede afectar a los enlaces de la cadena principal, a menudo enlaces C-C o a los átomos sustituyentes y cadenas laterales. La escisión de la cadena principal a menudo da radicales libres y puede ocurrir ya sea al azar en la cadena, como se muestra en la Figura 9, o en enlaces débiles que resultan de estructuras. También los extremos de cadena presentan a menudo estructuras lábiles adecuadas para el inicio de la degradación térmica (Compton, 1975). La vía de degradación térmica del PS implica la escisión de la cadena seguida de despolimerización (Mittal, 2011). La degradación térmica del PS se produce en presencia de oxígeno a través del mecanismo de cadena de radicales libres. Esto conduce a formar oligómero o monómero. Se ha reportado en la literatura, la recuperación

de 58% en peso de estireno de la degradación térmica de PS a 350 °C, después de un tiempo de 60 minutos (Pielichowski, 2005). En este proceso el PS sufre desintegración más que degradación, como se muestra en la Figura 10.

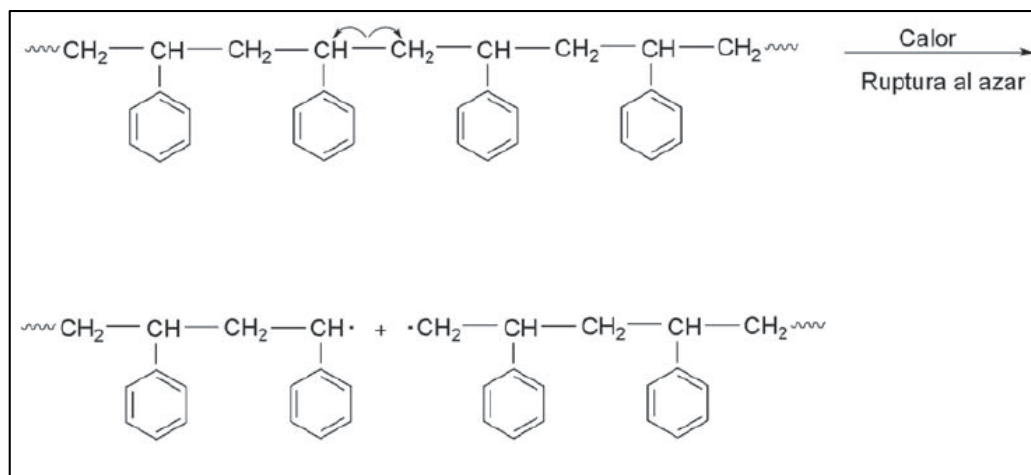


Figura 9. Reacción de termodescomposición al azar del PS (San Andrés y col., 2010).

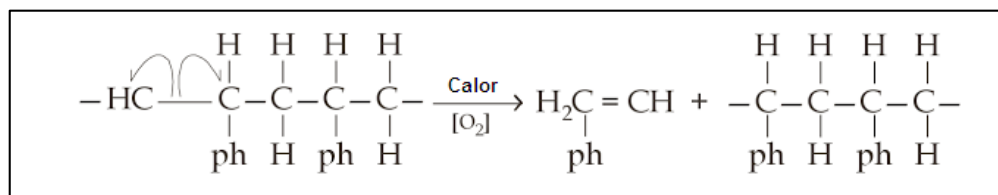


Figura 10. Degradación térmica en presencia de oxígeno del PS (Pani, 2007).

Intemperismo Natural y Acelerado

Una de las desventajas del uso de polímeros es que se degradan cuando se utilizan en condiciones de alta temperatura o en aplicaciones al aire libre. Cuando los polímeros se usan en aplicaciones al aire libre, el ambiente influye negativamente en la vida útil. Este proceso se llama intemperismo (Zweifel, 1998; Wypych, 2008). Los efectos perjudiciales de la intemperie sobre los polímeros generalmente se han atribuido a un complejo conjunto de procesos en los que la acción combinada de luz UV y oxígeno predominan (Yousif y col., 2013). El término envejecimiento de los polímeros se asocia usualmente a cambios a largo plazo de las propiedades del polímero bajo

las condiciones de la intemperie (Strlic y col., 2005). La exposición al entorno exterior no sólo afecta al propio material polimérico, sino que también actúa sobre otros componentes dentro de la matriz, tales como colorantes, pigmentos, aditivos de procesamiento, absorbentes y estabilizadores. Cada uno de estos componentes reacciona al medio ambiente individualmente o en combinación con otros componentes (Hamid, 1992; Bonten, 2001). El efecto del intemperismo en los polímeros se produce como resultado de una compleja interacción entre la exposición a los rayos UV, la temperatura y la humedad. El agua, que puede estar presente en forma de vapor de agua o líquido, puede promover el deterioro de los recubrimientos, tanto como un solo factor y en combinación con luz UV y calor (Baukh y col., 2013). La degradación de los plásticos se puede presentar en condiciones de intemperismo natural y acelerado. Las exposiciones al intemperismo natural y acelerado son puntos de referencia estándar de durabilidad para materiales poliméricos (Kockott, 1989; Hamid, 1995; Jacques, 2000).

El intemperismo natural se refiere a la exposición de los polímeros a condiciones naturales al aire libre donde la luz directa, indirecta, el calor, el oxígeno, la humedad y otros factores contribuyen a la degradación de las propiedades de los materiales (Şahin y col., 2007). Los microorganismos, el ozono, los contaminantes químicos transportados por el aire como los óxidos de azufre y de nitrógeno, y la sal; son algunos de los factores que son importantes (Hamid, 1992). El intemperismo natural incluye una amplia gama de escalas de tiempo. Por ejemplo: los ciclos de lluvia y día/noche introducen escalas de tiempo típicas en el orden de las horas y los días, mientras que las variaciones de humedad debido al cambio estacional tienen escalas de tiempo en el orden de meses (Baukh y col., 2013). Está bien establecido que la fotodegradación rápida de los materiales poliméricos es posible cuando están expuestos a la intemperie natural (Guillet, 1985, Bottino y col., 2003). El intemperismo natural proporciona los datos más prácticos y fieles sobre la variación del rendimiento de los productos en uso (Bedia y col., 2003). El intemperismo acelerado o artificial, se aplica para realizar pruebas de durabilidad en un lapso de tiempo más corto que en el intemperismo natural. En el intemperismo artificial, se reducen significativamente las escalas típicas de tiempo, las cuales son del orden de las horas y donde los ciclos de luz, calor, humedad y condensación son periódicos (Mathieu ,1996; Jacques, 2000; Baukh y col., 2013). El intemperismo acelerado se puede realizar a través de dos rutas. La primera se realiza al aire libre, al igual que las pruebas naturales de intemperismo, con la única diferencia es que el tiempo de exposición se acelera mediante la concentración de la luz solar natural y mediante la aplicación de calefacción y refrigeración, humectación y secado de las muestras. La segunda vía es el intemperismo acelerado en condiciones de laboratorio, que se realiza a través de la exposi-

ción de muestras a luz UV artificial, calor y agua. Los ensayos acelerados pueden diferir del intemperismo natural, si los ciclos húmedos/secos se convierten en períodos más cortos de absorción o secado. En tal caso, la exposición al agua en la prueba acelerada no imitará la erosión natural (Shi y col., 2010).

OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar el efecto de la irradiación gamma y del intemperismo natural o artificial en envases de PS sobre sus propiedades fisicoquímicas.

Objetivos Particulares

1. Irradiar los envases de PS con un irradiador gamma autónomo de investigación a diferentes dosis.
2. Exponer los envases de PS irradiados a intemperismo natural por diferentes periodos de tiempo, monitoreando las variables ambientales (temperatura, humedad e irradiación solar) en un panel de uso expofeso.
3. Exponer los envases irradiados a intemperismo artificial en una cámara de intemperismo acelerado por diferentes periodos de tiempo.
4. Determinar de forma periódica las propiedades mecánicas, térmicas, ópticas, estructurales y morfológicas de los envases de PS, sometidos tanto a intemperismo natural como artificial.
5. Proponer un mecanismo de fotodegradación del PS irradiado y sometido a intemperismo natural y artificial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Envases de Poliestireno

Las muestras fueron obtenidas a partir de envases rígidos comerciales de GPPS de tipo clamshell. Las partes lisas del envase se recortaron en rectángulos de 7.5 x 10.5 cm, para la cámara de intemperismo artificial, y 7 x 1 cm para la exposición al intemperismo natural. Las películas fueron almacenadas en bolsas de plástico hasta su exposición a la irradiación gamma. Posteriormente, un grupo de muestras se colocaron en el panel de exposición a intemperismo natural y otro grupo en la cámara de intemperismo artificial.

Métodos

Irradiación Gamma de las Películas

Se utilizó un irradiador gamma autónomo de investigación Gammacell 220 Excel (GC-220E) de MDS Nordion (4,9 kCi). Las dosis utilizadas para la irradiación de las películas de PS fueron las siguientes: 0, 10, 30 y 45 kGy, a una velocidad de 3.86 kGy/h mediante una fuente de ^{60}Co - γ , en condiciones ambientales (25°C).

Intemperismo Natural

Las muestras fueron colocadas en un panel de uso expofeso para el experimento, siendo expuestas a la intemperie. El panel se colocó en el techo del edificio de la Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Animal (CTAOA) del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD). Las películas se expusieron por un periodo de 190 días. Durante el tiempo de exposición se monitorearon las variables ambientales (temperatura, humedad e irradiación solar) por medio de la estación meteorológica situada en la Institución.

Intemperismo Artificial

Para la exposición de las muestras se utilizó un equipo de envejecimiento acelerado QUV del

Departamento de Polímeros y Materiales de la UNISON. Se siguió la norma dispuesta por la American Society for Testing and Material (ASTM) G154-12a. Las muestras de PS se colocaron sobre bastidores de aluminio, y experimentaron ciclos de exposición a irradiación ultravioleta a 340 nm y de humedad saturada. Estos ciclos consistieron en ciclos de 8 h de radiación UV a 70° C y 4 h de condensación de vapor de agua a 50°C. Las muestras expuestas fueron retiradas cada 100 h de exposición (0, 100, 200, 300, 400 y 500 h).

Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas de las películas, tanto sin exposición como las expuestas al intemperismo natural o acelerado, se ensayaron a tensión utilizando una máquina universal de pruebas mecánicas United SSTM-5kN del Departamento de Polímeros y Materiales de la UNISON. Los ensayos se realizaron según la norma ASTM D882 con una velocidad de 1 mm/min. Se utilizaron probetas rectangulares de 7 x 1 cm. Para el cálculo del esfuerzo de las muestras durante el ensayo a tensión, la fuerza aplicada se dividió entre el área de la sección transversal de la muestra. El área de la película se calculó multiplicando el ancho y el espesor de las muestras. El espesor de cada película se midió utilizando un micrómetro Digital Mituyo MDC-1 SB. Se calcularon tres parámetros mecánicos: esfuerzo máximo, elongación a la ruptura y módulo de elasticidad. El programa que se utilizó para la recolección de los datos fue Datum 4.0, y para su interpretación Excel 2016.

Determinación de Color

Se determinó el color con un colorímetro Konica-Minolta modelo CR300, calibrado con un mosaico estándar (Y=92.4, X=0.3162, y= 0.3324). La escala utilizada fue la CIE-Lab y se midió en cinco puntos diferentes cada muestra. Las coordenadas de medición fueron luminosidad (L^*), los parámetros de color a^* (rojo a verde) y b^* (amarillo a azul). Estos parámetros sirvieron para el cálculo de croma (C^*), ángulo hue (h°) y la diferencia de color (ΔE), con las siguientes ecuaciones:

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$
$$h^\circ = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$
$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Donde $\Delta L^* = L^* - L_0^*$, $\Delta a^* = a^* - a_0^*$ y $\Delta b^* = b^* - b_0^*$, L_0^* , a_0^* y b_0^* , representan los valores del parámetro del color de la muestra control y L^* , a^* y b^* , representan los parámetros del color de la muestras expuestas.

Análisis Morfológico

Se utilizó un microscopio digital modelo USB500X para la observación de las películas. Se colocaron las muestras en una superficie blanca como contraste. La observación se realizó a la magnificación de 35X en la superficie de las muestras.

Espectroscopia de Infrarrojo con Transformadas de Fourier con Reflexión Total Atenuada (ATR-FTIR)

Para el análisis estructural se utilizó un espectrofotómetro de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) modelo Nicolet iS50 con ATR modelo iS50 con cristal de Germanio marca Thermo Scientific del Laboratorio de Biopolímeros del CIAD. Los espectros se registraron en el intervalo de 4000 a 400 cm^{-1} con una resolución menor a 0.09 cm^{-1} sobre 32 escaneos. Los espectros se registraron en modo de absorbancia.

Análisis Termogravimétrico (TGA)

Se utilizó una termobalanza modelo Q500 Discovery de la marca TA Instruments del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA). Se determinó la temperatura de descomposición de la muestra control y las expuestas. Con una muestra de 10 mg, se realizaron corridas de 25-600°C, a una velocidad de calentamiento de 10°C/min, bajo atmósfera de nitrógeno.

Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

Se utilizó un calorímetro diferencial de barrido modelo Discovery de la marca de TA Instruments del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), para la determinación de las transiciones de primer y segundo orden. Se prepararon cápsulas de aluminio con 10 mg de muestra. El intervalo de calentamiento fue de 25-200°C con una velocidad de calentamiento de 10°C/min, bajo atmósfera de nitrógeno. Se llevó a cabo un enfriamiento a 50°C/min, con un posterior calentamiento al mismo intervalo inicial.

Análisis Estadístico

Se utilizó la prueba de Tukey-Kramer para comparación múltiple de las medias de las muestras de PS sometidas a irradiación gamma y a los diferentes tipos de intemperismo. El análisis de datos se llevó a cabo mediante un análisis de ANOVA ($P < 0.05$) para establecer si existe diferencias significativas. Los experimentos se realizaron mediante un diseño unifactorial completamente al azar, evaluando el periodo de exposición vs dosis de irradiación y, por otro lado, la dosis de irradiación vs tiempo de exposición. El análisis estadístico de este trabajo fue realizado por separado en ambos tipos de intemperismo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Exposición de muestras a intemperismo natural y condiciones climáticas

Con la finalidad de conocer el efecto del intemperismo natural, se montaron un total de 144 muestras rectangulares 7 x 1 cm (36 muestras para cada una de las dosis de irradiación [0, 10, 30 y 45 kGy]). Las cuales fueron colocadas en un panel estacionario ubicado sobre el techo de la Coordinación de Alimentos de Origen Animal (CTAOA) en el CIAD, durante un período de 190 días. La recolección de 6 muestras a cada dosis de irradiación fue realizada a 0, 45, 70, 110, 145 y 190 días de exposición. En la Figura 11 se muestra una fotografía del panel estacionario con las muestras montadas para su exposición a intemperismo natural.



Figura 11. Muestras montadas sobre panel estacionario.

Debido a las influencias oceánicas y atmosféricas, la región del noroeste de México se distingue por tener un clima particularmente semiárido, de manera que estas condiciones climáticas influyeron durante el desarrollo del ensayo. En el Noroeste de México se presenta un incremento máximo en la temperatura ambiental en julio-agosto, apareciendo lluvias en septiembre para después manifestar una disminución progresiva en octubre, alcanzando temperaturas mínimas en diciembre-enero.

Los datos de irradiación de luz solar, así como humedad relativa y temperatura, fueron monitoreados en intervalos de 15 min, por medio de la estación meteorológica Vantage Pro2™ de la marca Davis Inc. instalada en el CIAD.

En la Figura 12 se muestran los valores de irradiación de luz solar. Se observa un descenso gradual a partir del día 0 hasta el final de la exposición. Se registró un valor máximo al día 25, pero en los últimos 20 días de exposición, se aprecia una disminución de la irradiación más acentuada. Este comportamiento se debe al cambio de estaciones entre el final del verano, otoño y parte del invierno. En esta última estación, la cobertura nubosa es más densa y por ello disminuyen los valores en los últimos días de exposición. Así mismo, la temporada de lluvias influye en la disminución de la irradiación solar, debido a que se presentan días nublados. Asociado a la época de lluvias, en la Figura 13 se puede apreciar la variación en los valores de humedad relativa, desde el día 0 hasta el final de la exposición, alcanzando un valor máximo al día 30, presentando una fluctuación del 20-90% de humedad durante el periodo de exposición. Estos valores no mostraron una tendencia a disminuir, ya que durante todo el periodo monitoreado se tuvieron precipitaciones pluviales de forma errática. Por otro lado, en la Figura 14 se observa un descenso gradual en la temperatura a partir del día 0 hasta el final de la exposición, con un valor máximo al día 20, pero en los últimos 60 días de exposición, se observa una disminución más acentuada con una fluctuación en los valores. A partir del día 156 hasta el día 190, se observa una variación acentuada de la temperatura. Esto se debe a la llegada del mes de octubre, noviembre y diciembre, los cuales presentan una disminución significativa de la temperatura, además de las precipitaciones pluviales erráticas.

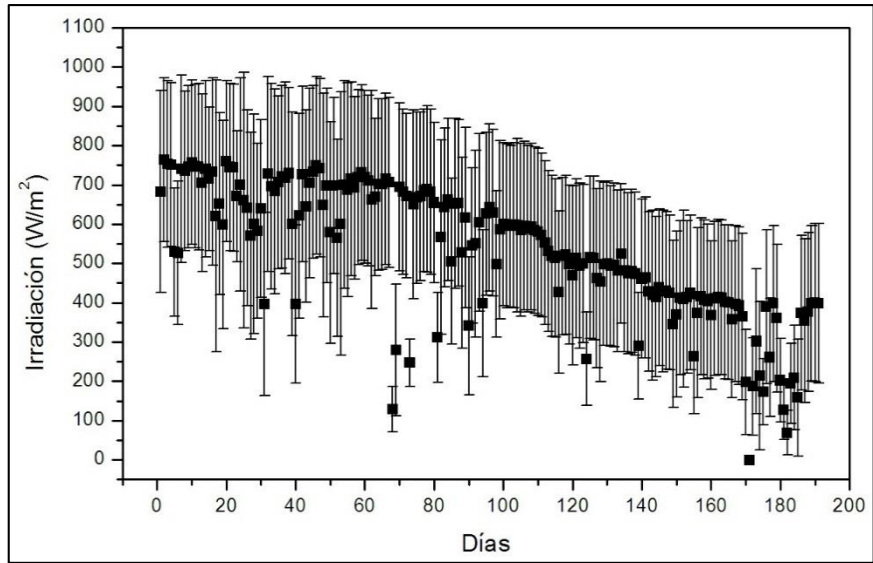


Figura 12. Irradiación de luz solar durante 190 días de exposición.

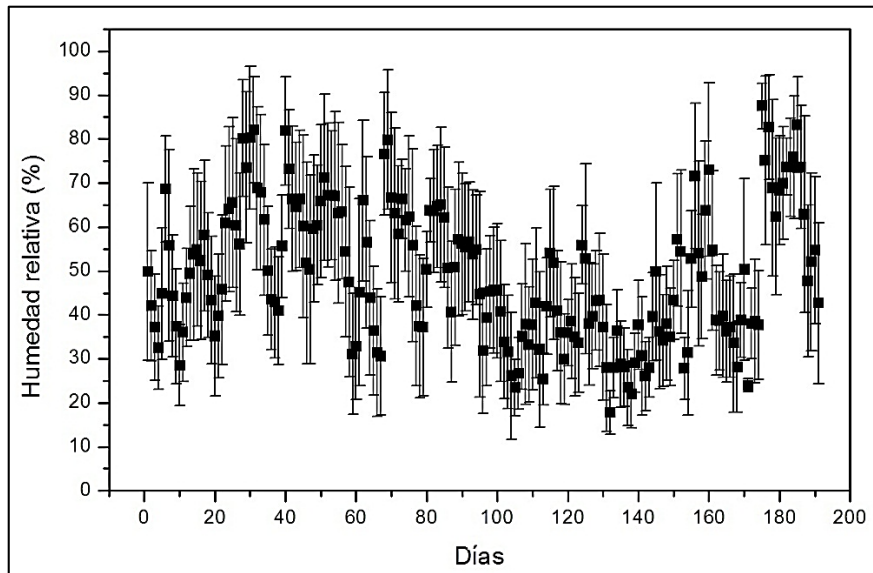


Figura 13. Humedad relativa en el ambiente durante 190 días de exposición.

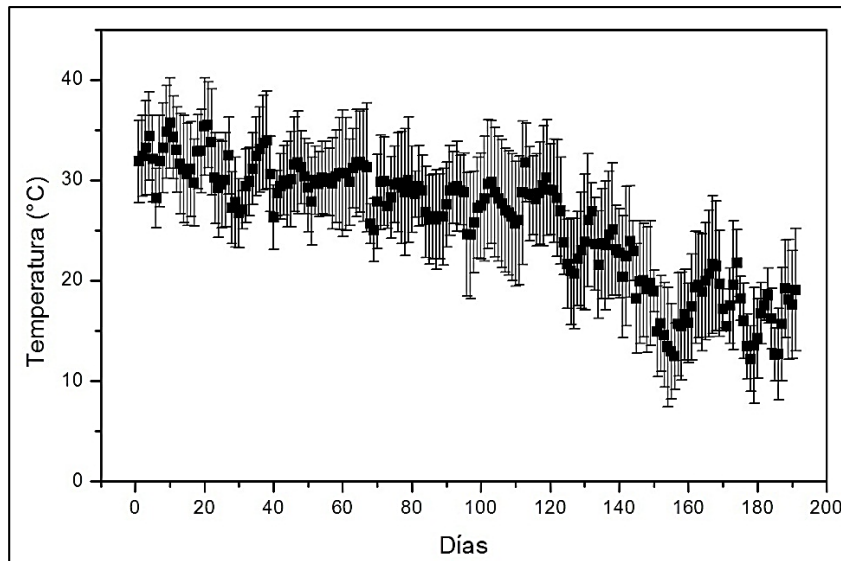


Figura 14. Temperatura ambiente durante 190 días de exposición.

Exposición de muestras a intemperismo artificial y condiciones de exposición

Durante el proceso por intemperismo artificial, se montaron un total de 48 muestras rectangulares de 10.5 x 7.5 cm, las cuales correspondieron a 12 muestras por cada dosis de irradiación (0, 10, 30 y 45 kGy). Estas fueron colocadas en una cámara de envejecimiento acelerado QUV del Departamento de Polímeros y Materiales de la UNISON, durante 500 h de exposición. La recolección de 2 muestras por cada dosis de irradiación fue realizada a 0, 100, 200, 300, 400 y 500 h. En la Figura 15 se muestra una fotografía de la cámara de intemperismo artificial acelerado.

Las condiciones de exposición artificial se representan en la Figura 16, en esta se indica el ciclo de envejecimiento utilizado en la cámara QUV, el cual es de acuerdo con la norma ASTM G154.



Figura 15. Cámara de intemperismo artificial acelerado.

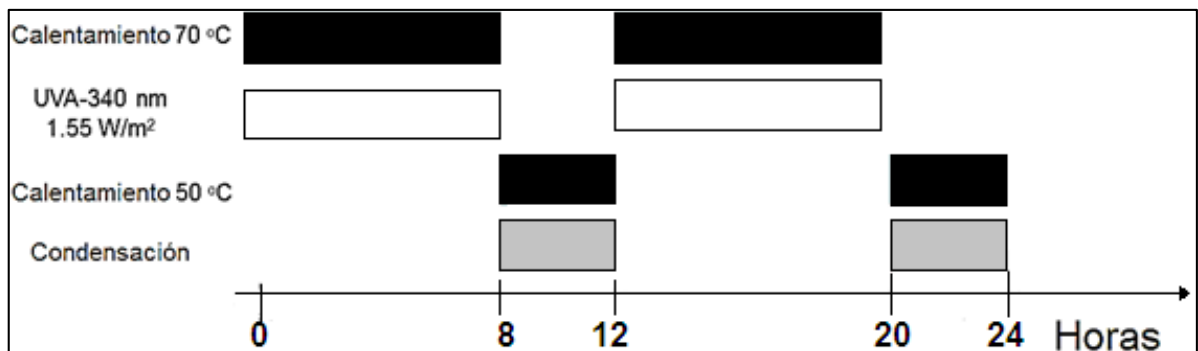


Figura 16. Ciclo utilizado en la cámara de intemperismo acelerado QUV.

Propiedades Mecánicas

Las muestras expuestas en ambos tipos de intemperismo, se sometieron a pruebas de tensión para la determinación del esfuerzo máximo, la elongación a la ruptura y el módulo de elasticidad.

Los resultados del esfuerzo máximo de las muestras sometidas a intemperismo natural e intemperismo artificial se presentan en las Figuras 17 y 18, respectivamente. Se observa que el PS sin exposición a ambos tipos de intemperismo (Día/Hora 0) y a las dosis de irradiación gamma de 0, 10, 30 y 45 kGy, presentan un esfuerzo máximo promedio de 58.7, 61.7, 58.9 y 59.8 MPa, respectivamente. El análisis estadístico realizado a las muestras anteriores no presentó diferencia

significativa ($P > 0.05$) entre las muestras control (0 kGy) y las expuestas a diferentes dosis de irradiación gamma. Lo anterior, corrobora de que el PS es un material que resulta ser estable a este tipo de irradiación. Estos resultados coinciden con lo reportado por Sastri (2013), quien atribuye la estabilidad del PS al alto contenido aromático, donde las nubes de electrones son capaces de absorber la radiación gamma, evitando la generación de radicales libres reactivos de la macromolécula.

Por otra parte, en la Figura 17 se presentan los valores obtenidos por intemperismo natural, donde se observa una disminución del esfuerzo máximo de aproximadamente 50% al día 45. Tsurue y col., (1981) reportan que el PS muestra una retención del esfuerzo máximo del 45%, después de 3 años de exposición al intemperismo natural. En cambio, en este estudio encontramos una disminución similar del esfuerzo máximo al reportado por Tsurue y col. (1981), pero a 45 días de exposición. Posteriormente, se presenta un nuevo descenso en los valores hasta el día 110, en donde se observa un aumento significativo en el esfuerzo máximo ($P < 0.05$) en las muestras con la dosis de 30 kGy, y a los días 70 y 110 de exposición. Bowmer y col. (1979) han reportado que la radiación gamma sobre un material polimérico puede causar un fenómeno de reticulación de cadenas, lo cual resulta en un aumento del esfuerzo máximo. Por último, se muestra un aumento del esfuerzo máximo en algunas muestras (con 0 y 10 kGy) del día 110 al 145, mientras que las muestras con 30 y 45 kGy, tienden a disminuir. El aumento de los valores se puede atribuir a la reticulación de cadenas causado por la luz UV. Un descenso en los valores se puede atribuir a procesos de escisión de cadenas (White y col., 2007; Wypych, 2008).

En la Figura 18 se presentan los valores obtenidos por intemperismo artificial, donde se observa una disminución lineal del esfuerzo máximo hasta las 300 h de exposición. Posteriormente, se muestra atenuación prácticamente asintótica de los valores a las 400 y 500 h de exposición. Al igual que los resultados en el intemperismo natural, las dosis de irradiación gamma actúan aumentando o disminuyendo el esfuerzo máximo, cuando el PS es sometido a intemperismo acelerado en una cámara QUV.

De acuerdo con O'Donnell y col. (1994), el PS expuesto a intemperismo natural o artificial experimenta cambios químicos que eventualmente resultan en una disminución en sus propiedades mecánicas. O'Donnell y col. (1994) reportaron una disminución casi lineal del esfuerzo máximo ($R = 0.985$) por la exposición a tres años la intemperie en Jeddah, Arabia Saudita; cuyo clima es similar al Noroeste de Sonora. Sin embargo, en esta investigación se ob-

tuvo un resultado similar, pero fue a través de la cámara de intemperismo artificial QUV. Donde las muestras expuestas a 0, 100, 200 y 300 h de exposición, presentaron una disminución lineal del esfuerzo ($R = 0.9531$). Esto puede atribuir a las condiciones controladas y constantes dentro de la cámara QUV. En cambio, en el intemperismo natural se presenta una disminución menos lineal ($R = 0.6799$). Esto puede deberse a la variabilidad de las condiciones climáticas (irradiación solar, temperatura y humedad) del sitio de exposición, así como a las precipitaciones erráticas en la región y el corto tiempo de exposición, comparado con el estudio de O'Donnell y col. (1994).

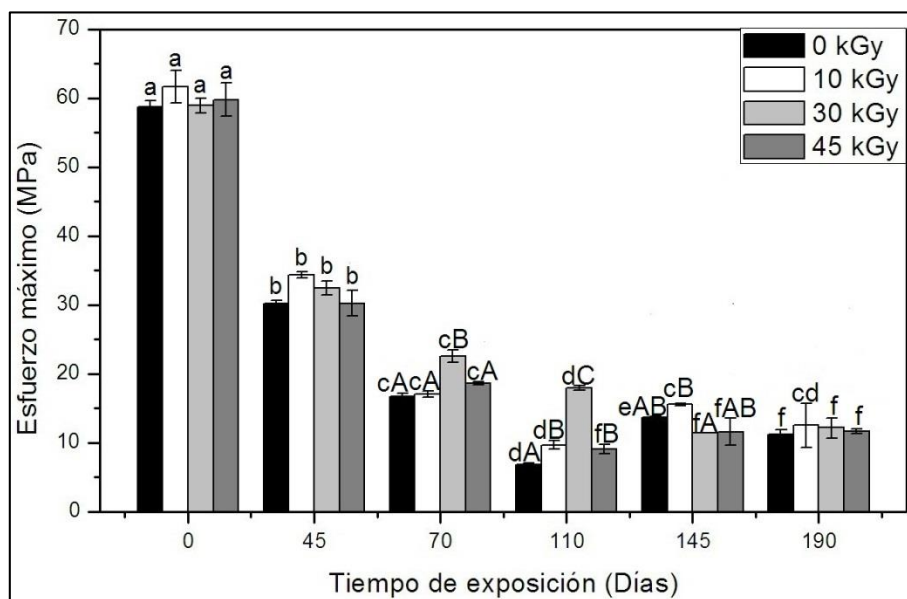


Figura 17. Esfuerzo máximo de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo natural. Columna con letra minúscula diferente indica diferencia significativa entre las dosis de irradiación y el tiempo de exposición ($P < 0.05$). Columna con letra mayúscula diferente indica diferencia significativa entre dosis de irradiación al mismo tiempo de exposición ($P < 0.05$).

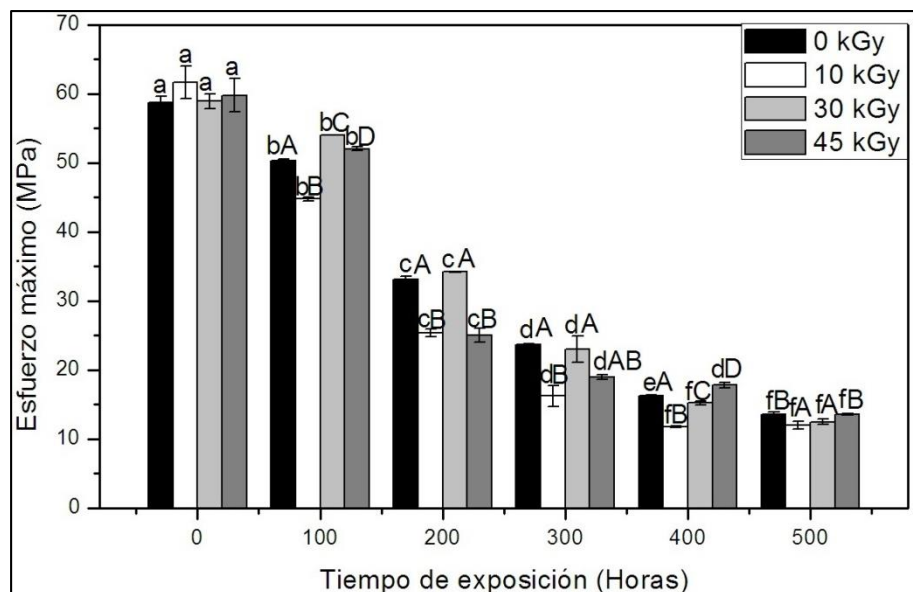


Figura 18. Esfuerzo máximo de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo artificial. Columna con letra minúscula diferente indica diferencia significativa entre las dosis de irradiación y el tiempo de exposición ($P < 0.05$). Columna con letra mayúscula diferente indica diferencia significativa entre dosis de irradiación al mismo tiempo de exposición ($P < 0.05$).

Kiatkamjornwong y col. (1999), han reportado que los cambios en las propiedades mecánicas del PS son debido solamente al efecto de la luz UV y el calor. La exposición a estos agentes tiene como resultado la ruptura de los enlaces en la cadena principal del PS (escisión de cadena) y la disminución del peso molecular promedio. Estos factores se asocian directamente con la disminución de las propiedades mecánicas. Se ha reportado en la literatura, que los polímeros que han experimentado un bajo grado de ruptura en sus cadenas tienen una mayor probabilidad de volver a presentar este fenómeno; y es suficiente para causar pérdidas severas en las propiedades físicas del material (Feldman, 2002).

En las Figuras 19 y 20, se presentan los valores de la elongación a la ruptura de las muestras de PS sometidas a intemperismo natural y artificial, respectivamente. Se observa que el PS sin exposición a ambos tipos de intemperismo (Día/Hora 0) y a las dosis de irradiación gamma de 0, 10, 30 y 45 kGy, presentan un porcentaje promedio de elongación a la ruptura de 2.2, 2.3, 2.2 y 2.1%, respectivamente. El análisis estadístico realizado a las muestras anteriores no presentó diferencia significativa ($P > 0.05$) entre las muestras control (0 kGy) y las expuestas a

diferentes dosis de irradiación gamma. Este comportamiento coincide con el mostrado en el esfuerzo máximo.

Por otro lado, en la Figura 19 se presentan los valores de elongación obtenidos por intemperismo natural. Se observa una disminución de la elongación a la ruptura de aproximadamente 45% al día 45, sin exposición a la irradiación gamma (0 kGy). En cambio, se observa una disminución mayor de aproximadamente 65%, con exposición a la irradiación gamma (10, 30 y 45 kGy), al mismo día. Posteriormente, se observa una disminución de esta propiedad en las muestras hasta el día 110, en donde al día 70 y 110, las muestra con dosis de 30 kGy presentan valores superiores de elongación a la ruptura, comparado con las muestras con diferentes dosis de irradiación gamma. Por último, no se observa una diferencia significativa ($P > 0.05$) de los valores de esta propiedad entre los días 145 y 190 de exposición.

En la Figura 20 se presentan los valores de la elongación obtenidos por intemperismo artificial. Se observa una disminución de aproximadamente 35% en la elongación a la ruptura de las muestras con las dosis de irradiación de 0, 30 y 45 kGy, a 100 h de exposición. En contraste, se observa una disminución menor de aproximadamente 16% en esta propiedad para las muestras irradiadas con la dosis de 10 kGy, al mismo tiempo de exposición. Posteriormente, se observa una disminución de la propiedad a 200 h de exposición, en donde a dosis de 10 y 45 kGy, los valores de elongación a la ruptura son significativamente menores ($P < 0.05$) que las muestras irradiadas con dosis de 0 y 30 kGy. Estos valores se mantienen hasta las 300 h de exposición. Por último, existe una tenue disminución a las 400 h de exposición y sin efecto significativo de la dosis de irradiación gamma. Los valores de esta propiedad se mantuvieron sin diferencia significativa ($P > 0.05$) a las 500 h de exposición.

Wypych (2008) ha reportado que la formación de grietas en los materiales polímeros, actúan como muescas que reducen la elongación a la ruptura y el esfuerzo máximo. Asimismo, la elongación a la ruptura depende más de los cambios que ocurren en la fase amorfa. En cambio, el esfuerzo máximo depende más de lo que sucede en las regiones cristalinas. Además, los procesos de reticulación aumentan el esfuerzo máximo y reducen la elongación a la ruptura. Por otro lado, La Mantia (1996) y Yashchuk y col. (2012), coinciden en que la elongación a la ruptura es la propiedad mecánica más sensible a la fotodegradación de los polímeros debido a que existe una correlación con los cambios químicos del material.

En el caso del intemperismo natural, observamos que las dosis de irradiación gamma de 10, 30 y 45 kGy (al día 45), tienen un efecto reductor de la elongación a la ruptura combinado con la exposición a la intemperie. Sastri (2013) ha reportado que la irradiación gamma puede causar en los polímeros escisión de cadenas, que conduce a la degradación y reduce la elongación a la ruptura, entre otras propiedades mecánicas. La radiación gamma forma radicales a lo largo de la cadena del polímero. Estos radicales causan la degradación del polímero, obteniendo cadenas de menor peso molecular, lo que conduce a propiedades físicas reducidas. Por lo tanto, la irradiación gamma puede estar causando escisión de cadenas en las regiones amorfas del PS. Tsurue y col. (1981) reportan que el PS muestra una retención de la elongación a la ruptura del 50%, después de 3 años de exposición. En cambio, en este estudio encontramos una disminución similar de la elongación a la ruptura al reportado por Tsurue y col. (1981), pero al día 45. Por otro lado, en el día 110 se observa que a dosis de 0 kGy y 10 kGy, existe una reducción significativa en la elongación a la ruptura. Esto puede deberse a que existe un menor grado de escisión de cadenas a dosis bajas de 0 kGy y 10 kGy, por lo cual es más probable que ocurra este fenómeno, causando una reducción en esta propiedad.

En el caso del intemperismo artificial, a dosis de 10 kGy se presenta un aumento en la elongación a la ruptura comparado con las dosis de 0, 30 y 45 kGy, a las 100 h de exposición. Vesely y col. (1969) han reportado que la elongación a la ruptura disminuye durante la exposición, aunque inicialmente, hay un aumento en el alargamiento explicado por una disminución del peso molecular que ocasiona que el material elástico se deteriore rápidamente con una exposición más prolongada. Por otro lado, existe una disminución más acentuada de los valores a las 200 h de exposición a las dosis de 10 y 30 kGy. Esto puede atribuirse a escisiones de cadenas causadas por la irradiación gamma específicamente a estas dosis.

En el intemperismo natural y artificial, en los días 145 a 190, y en las horas 400 a 500, respectivamente, se observa que no existen cambios producidos por la irradiación gamma o la exposición al intemperismo. Esto se puede atribuir al alto grado de degradación del PS, provocando una disminución del peso molecular promedio, lo cual se traduce en una reducción del número de unidades monoméricas en las cadenas. Horikx (1956) reportó que la probabilidad que exista escisiones de cadena en los polímeros será proporcional al número total de unidades monoméricas, aunque el autor no establece ecuaciones para este cálculo.

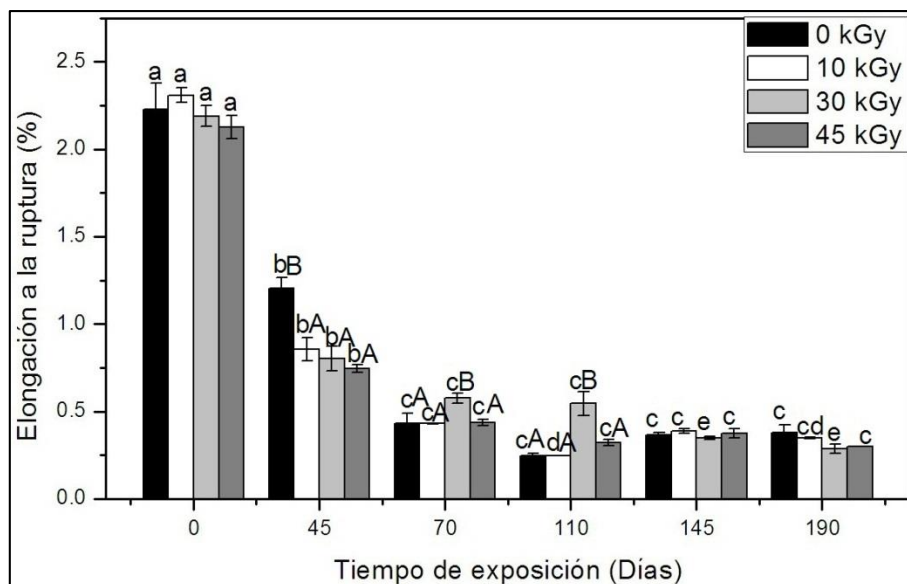


Figura 19. Elongación a la ruptura de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo natural. Columna con letra minúscula diferente indica diferencia significativa entre las dosis de irradiación y el tiempo de exposición ($P < 0.05$). Columna con letra mayúscula diferente indica diferencia significativa entre dosis de irradiación al mismo tiempo de exposición ($P < 0.05$).

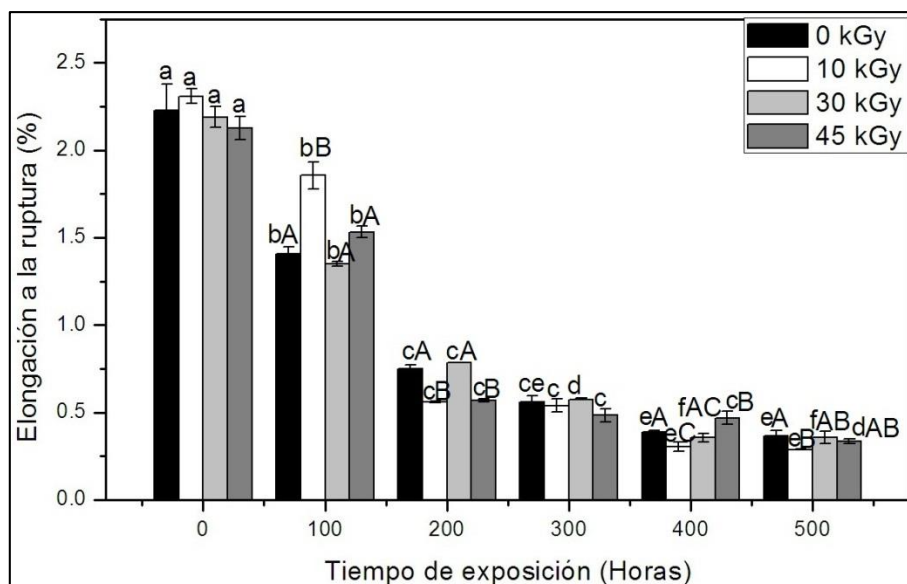


Figura 20. Elongación a la ruptura de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo artificial. Columna con letra minúscula diferente indica diferencia significativa entre las dosis de irradiación y el tiempo de ex-

posición ($P < 0.05$). Columna con letra mayúscula diferente indica diferencia significativa entre dosis de irradiación al mismo tiempo de exposición ($P < 0.05$).

En las Figuras 21 y 22, se presentan los cambios en el módulo de elasticidad de las muestras de PS sometidas a intemperismo natural y artificial, respectivamente. Se observa que el PS sin exposición a ambos tipos de intemperismos (Día/Hora 0) y a las dosis de irradiación gamma de 0, 10, 30 y 45 kGy, presentan valores promedio de módulo de elasticidad de 3791.8, 3831.8, 3767.7 y 3827.2 MPa, respectivamente. El análisis estadístico realizado a las muestras anteriores no presentó diferencia significativa entre las muestras control (0 kGy) y las expuestas a diferentes dosis de irradiación gamma. Este comportamiento es similar al de propiedades mecánicas anteriormente presentadas.

Por otro lado, en la Figura 21 se presentan los valores del módulo de elasticidad de las muestras expuestas a intemperismo natural. Se observa una disminución de aproximadamente 15% al día 45 en las muestras sin exposición a la irradiación gamma (0 kGy). En contraste, se observa un aumento en los valores de aproximadamente 18% en las muestras expuestas a las dosis de irradiación gamma de 10, 30 y 45 kGy, al mismo tiempo de exposición. Posteriormente, este aumento en el módulo de elasticidad solo se mantiene a dosis de 10 kGy hasta el final de la exposición. Al día 110 y a las dosis de 0, 30 y 45 kGy, las muestras presentan una disminución en los valores del módulo de elasticidad, en donde a la dosis de 45 kGy se observó una disminución más acentuada en el módulo. En contraste, después de 145 días de exposición las muestras con dosis de 0, 30 y 45 kGy, presentaron un incremento en los valores del módulo con respecto al periodo anterior (110 días). Por último, después de 190 días de exposición las muestras no presentaron diferencia significativa. En la Figura 22 se presentan los valores del módulo de elasticidad de las muestras expuestas a intemperismo artificial. Se observa un aumento en los valores del módulo de aproximadamente 18% en las muestras con dosis de 0, 10 y 30 kGy, a 100 h de exposición. Conforme transcurre el tiempo de exposición, se puede observar que este aumento fluctúa hasta las 500 h de exposición, siendo más evidente a 300 y 500 h. Sin embargo, las muestras durante todo el proceso de exposición no presentaron diferencias significativas debido a la dosis de irradiación gamma. Al comparar los valores del módulo de elasticidad de las muestras de las Figuras 21 y 22, se puede observar que las muestras expuestas en ambos tipos de intemperismo poseen un valor promedio similar de 4039.07 ± 520.49 y 4266.40 ± 391.21 MPa para intemperismo natural y artificial, respectivamente. No obstante, la variación

de los resultados es mayor en las muestras expuestas a intemperismo natural. Esto puede ser explicado en relación a la variación de las condiciones ambientales en las cuales se encuentran expuestas estas muestras, como ya se ha mencionado anteriormente en este trabajo.

El módulo de elasticidad es una medida de la rigidez de los materiales poliméricos y depende de varios factores. Nicholson y col. (2000) han reportado que existe una disminución del módulo de elasticidad a medida que aumenta la temperatura. De acuerdo con Roberts y col. (1991), el módulo de elasticidad está directamente relacionado con la dependencia de la energía de interacción entre las moléculas y su distancia de separación. Además, se sabe que el grosor de las películas de PS expuesto a la luz ultravioleta y al ozono es independiente del módulo de elasticidad, de acuerdo con Torres y col. (2010). Esto se debe a la formación de reticulación de cadenas en las zonas cercanas a la superficie de las películas. En este trabajo, el espesor de las muestras sometidas en ambos tipos de intemperismo ha sido constante debido a que se utilizó un envase comercial proveniente un mismo lote de producción, lo cual disminuyó el efecto de este factor.

Por otro lado, realizando un resumen de los parámetros mecánicos que en este trabajo se han reportado, nuestros resultados coinciden con lo señalado por Bowmer y col. (1979), donde los efectos de la radiación de alta energía ionizante (irradiación gamma) pueden resultar en una mejora de algunas propiedades físicas y un deterioro en otra. En este trabajo, los resultados presentaron una disminución del esfuerzo máximo y de la elongación a la ruptura, mientras que el módulo de elasticidad aumentó. Se puede atribuir el aumento del módulo de elasticidad del PS, cuando este es expuesto a ambos tipos de intemperismos, a un efecto combinado entre la irradiación gamma y la luz UV, provocando que el aumento permanezca prácticamente constante. Por otra parte, la disminución del módulo de elasticidad en algunos casos durante la exposición en ambos intemperismos, se puede atribuir al debilitamiento del material debido a la formación y crecimiento continuo de grietas y porosidad. Aunque los valores en ambos intemperismos son similares, al parecer existen algunos mecanismos que se presentan al azar, llevando consigo la disminución del módulo de elasticidad.

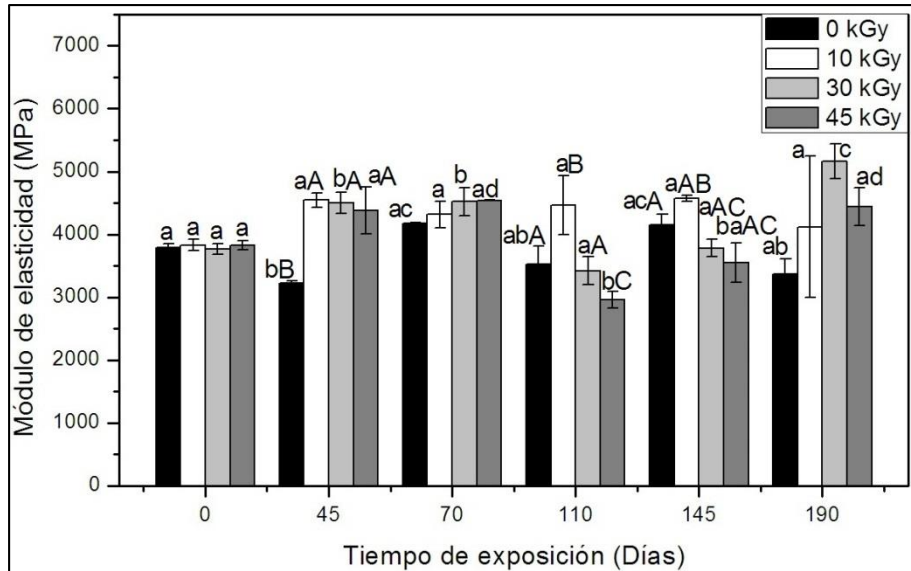


Figura 21. Módulo de elasticidad de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo natural. Columna con letra minúscula diferente indica diferencia significativa entre las dosis de irradiación y el tiempo de exposición ($P < 0.05$). Columna con letra mayúscula diferente indica diferencia significativa entre dosis de irradiación al mismo tiempo de exposición ($P < 0.05$).

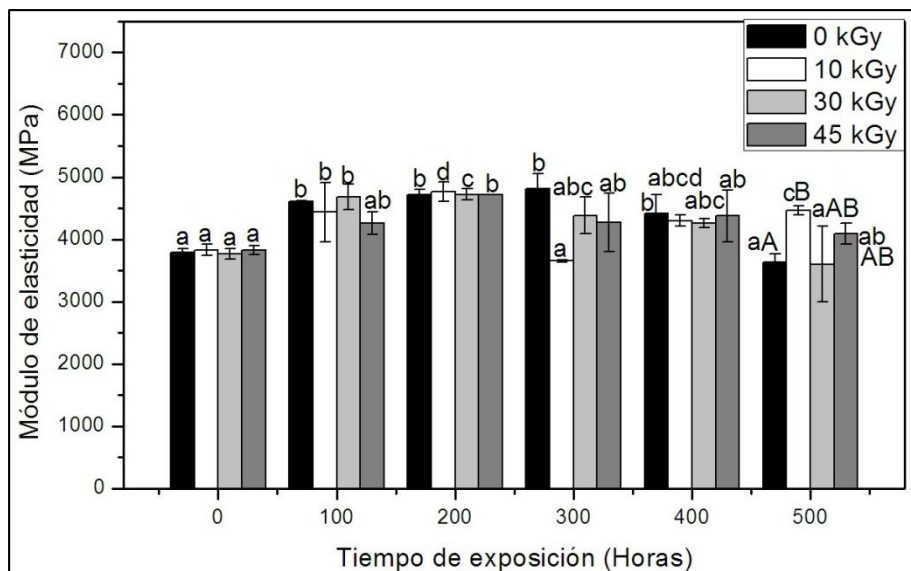


Figura 22. Módulo de elasticidad de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo artificial. Columna con letra minúscula diferente indica diferencia significativa entre las dosis de irradiación y el tiempo de exposición ($P < 0.05$). Columna con letra mayúscula diferente indica diferencia significativa entre

dosis de irradiación al mismo tiempo de exposición ($P < 0.05$).

En los Anexos 1 al 6 se presentan las tablas con los resultados del Análisis de Varianza (ANOVA) que fueron realizados a partir de los datos experimentales de los diferentes parámetros mecánicos presentados en esta sección.

Propiedades Ópticas

Las alteraciones en las propiedades visuales, como el cambio de color, es de interés principal por diferentes razones. En primer lugar, los cambios en la apariencia pueden afectar el valor estético de los objetos y, en segundo lugar, a menudo preceden a los cambios en la estabilidad mecánica (Pastorelli y col., 2014). Asimismo, una de las técnicas utilizadas para seguir el proceso de degradación en los polímeros es el cambio de color. El análisis del cambio de color en las superficies de las muestras de PS, durante la fotodegradación se llevó a cabo midiendo los parámetros CIELAB (L^* , a^* y b^*). Estos parámetros se utilizaron para calcular croma (C^*), ángulo hue (h°) y la diferencia de color (ΔE). De acuerdo con Francis (1980) y Mcguire (1992), estos cálculos son más apropiados para conocer el color de materiales de forma cuantitativa. Por lo anterior, los parámetros a^* y b^* son simplemente coordenadas en la esfera del color, en la cual se reflejan indirectamente h° y C^* , pero que son difíciles de interpretar por separado. Además, no son variables independientes. Los resultados de C^* en intemperismo natural y artificial, se presentan en las Figuras 23 y 24, respectivamente. Se observa que el PS sin exposición a ambos tipos de intemperismo (Día/Hora 0) y a las dosis de irradiación gamma de 10, 30 y 45 kGy, presentan valores superiores significativamente ($P < 0.05$), en comparación con las muestras sin irradiación gamma (0 kGy). En la Figura 23 se observa un aumento en los valores del C^* al día 45, existiendo diferencia significativa ($P < 0.05$) entre las diferentes dosis de irradiación gamma, en donde las muestras con dosis de 10 kGy, presentan valores ligeramente superiores comparado con las otras dosis de irradiación gamma. Al día 70 existe de nuevo un aumento en los valores, pero si mostrar diferencias significativas con la dosis de irradiación gamma. Finalmente, del día 110 al 190, se presenta un aumento gradual prácticamente asintótico de los valores. En la Figura 24 se presenta el comportamiento del C^* de las muestras sometidas a intemperismo artificial. Se puede observar un aumento gradual en los valores hasta las 500 h de exposición, existiendo diferencias significativas entre las diferentes dosis de irradiación gamma. La exposición a la irradiación gamma aumentó los valores de C^* hasta las 100 h de exposición.

A partir de las 200 h hasta el final de la exposición, los valores de C^* fluctúan con la dosis de irradiación gamma. De los resultados de este trabajo se observó lo siguiente: las muestras expuestas a 190 días a intemperismo natural e irradiadas con la dosis de 45 kGy, disminuyeron los valores de C^* , con respecto a las muestras sin irradiación gamma. En contraste, las muestras expuestas a intemperismo artificial a 500 h y con dosis de 45 kGy, aumentaron los valores de C^* .

Maskan (2001) reporta que el valor de croma (C^*) indica el grado de saturación y es proporcional a la intensidad del color. La saturación o C^* , corresponde a la pureza del color que determina el tono, es decir, cuán lejos o cerca está del blanco. Un valor elevado de C^* indica que vemos el color en toda su pureza, sin interferencias. Un valor bajo de C^* indica que el color tiene mezcla con otros colores con los que interfiere (Morales y col., 2013). C^* toma el valor 0 para estímulos acromáticos y normalmente no pasa de 150, y su color va desde los grises pálidos apagados a los más fuertes y vivos (Retting y col., 2014).

El cambio del color del material depende de los cambios en la composición química (Horsfall, 1982; Kovacs-Stahl, 1995). Achhammer y col. (1951) reportaron que el PS sufre coloración cuando se expone a la energía radiante ultravioleta en presencia de oxígeno causando su oxidación. Esto coincide con nuestros resultados. Un tiempo de exposición mayor a la radiación ultravioleta en ambos tipos de intemperismo, provocó un aumento lineal de C^* . De acuerdo Wypych (2008), en polímeros aromáticos, como es el PS, la formación de un doble enlace adicional conjugado con el anillo aromático es la causa del cambio de color. Por lo tanto, un aumento en la cantidad de insaturaciones genera un aumento en el color (amarillamiento). Por otra parte, a pesar de que se ha reportado la estabilidad del PS en presencia de la irradiación gamma, causa un aumento en los valores de C^* , aunque mucho menor en comparación con el aumento causado por la luz UV.

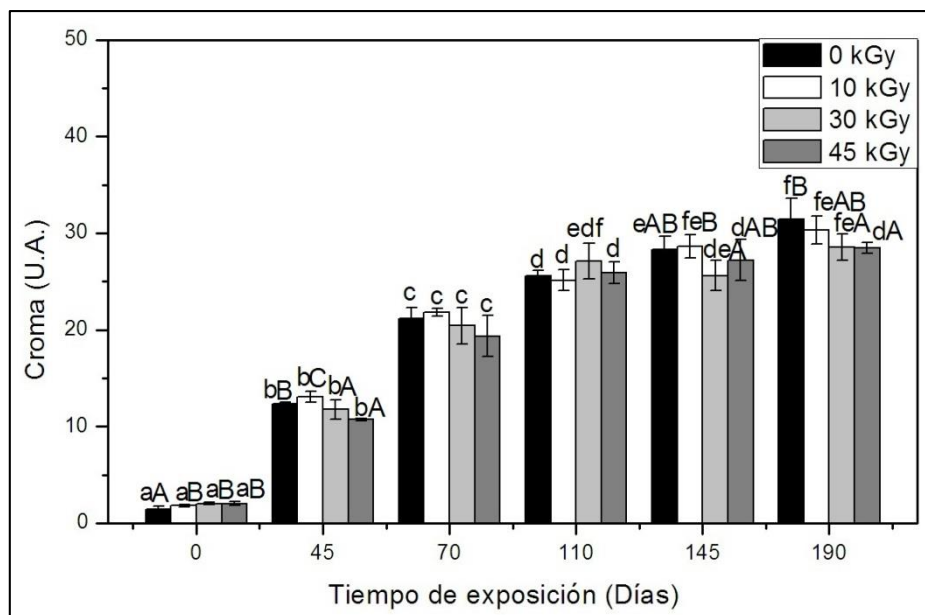


Figura 23. Parámetro C^* de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo natural. Columna con letra minúscula diferente indica diferencia significativa entre las dosis de irradiación y el tiempo de exposición ($P < 0.05$). Columna con letra mayúscula diferente indica diferencia significativa entre dosis de irradiación al mismo tiempo de exposición ($P < 0.05$).

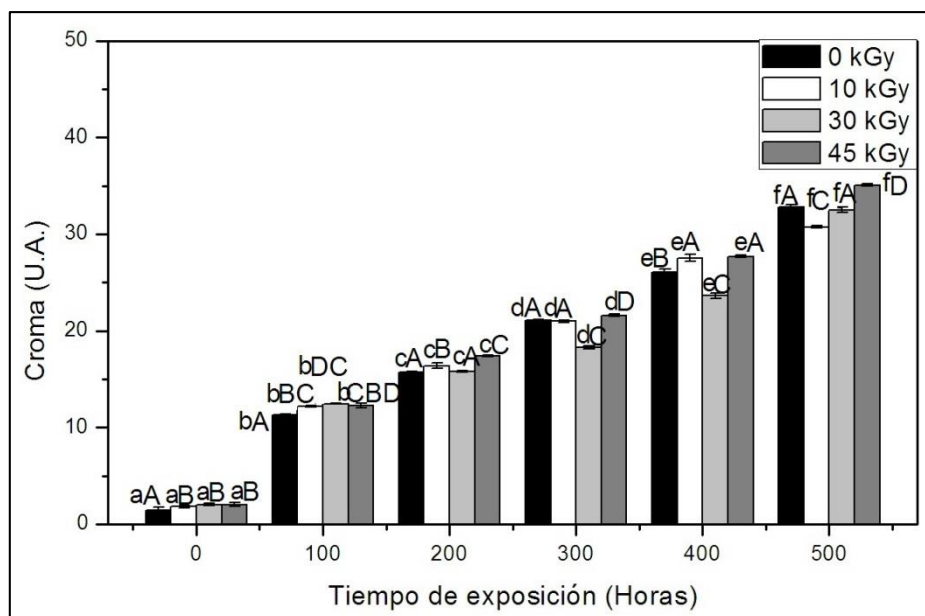


Figura 24. Parámetro C^* de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo artificial. Columna con letra minúscula dife-

rente indica diferencia significativa entre las dosis de irradiación y el tiempo de exposición ($P < 0.05$). Columna con letra mayúscula diferente indica diferencia significativa entre dosis de irradiación al mismo tiempo de exposición ($P < 0.05$).

En la Figura 25 y 26, se presentan los cambios en h° de las muestras de PS sometidas a intemperismo natural y artificial, respectivamente. Se observa que el PS sin exposición a ambos intemperismos (Día/Hora 0) y a las dosis de irradiación gamma de 10 kGy, 30 kGy y 45 kGy, presentan valores promedio superiores en comparación a las muestras sin irradiación gamma (0 kGy). En la Figura 25, al día 45 de exposición, se presenta un cambio abrupto en los valores de h° en todas las muestras, cambiando a sentido negativo. Este cambio permanece hasta el final de la exposición, mostrando una misma similitud en los valores a las dosis de 0 y 30 kGy, conforme transcurre el tiempo de exposición, pero presentando al día 190 los valores superiores de h° . Los valores de las muestras con dosis de 10 kGy permanecen constantes hasta el día 110, para después presentar un aumento al día 190 de exposición, mientras que las muestras con dosis de 45 kGy, presentan variabilidad hasta el final de la exposición. Con respecto al efecto de la irradiación gamma, esta provocó la conservación o la disminución del h° de las muestras con el tiempo de exposición, excepto al día 110, donde no hubo diferencia significativa entre las muestras. En la Figura 26 se presentan los valores de h° , sometidos a intemperismo artificial. Las muestras a 100 h de exposición presentan el mismo cambio al sentido negativo de los valores con una ligera tendencia al incremento del h° con el paso del tiempo de exposición en todas las muestras. Además, se observó una diferencia significativa entre las diferentes dosis de irradiación gamma en todos los periodos de exposición. Solamente a las 0 y 100 h de exposición, se presentó un aumento en los valores, debido a la exposición de la irradiación gamma en las muestras (10, 30 y 45 kGy). Posteriormente, a partir de la hora 200 hasta el final de la exposición, se presenta una fluctuación en los valores entre las diferentes dosis de irradiación gamma, pero mostrando una tendencia hacia valores más negativos de h° .

El h° es un parámetro importante del análisis de color que indica la posición del color de la muestra en la esfera de color. Un ángulo de 0° o 360° representa el tono rojo, mientras que los ángulos de 90° , 180° y 270° , representan el tono amarillo, verde y azul, respectivamente (Maskan, 2001). En los resultados de este estudio, se observa que el PS sin exposición a ambos tipos de intemperismo (Día/Hora 0) presenta un ángulo promedio de 66° para las muestras sin exposición

a la irradiación gamma (0 kGy). Por otra parte, las muestras expuestas a la irradiación gamma (10, 30 y 45 kGy) presentan un ángulo promedio de 80° . Este aumento en el h° indica la tendencia del tono amarillo a hacia el verde. Sin embargo, esto no puede ser apreciado a simple vista, ya que existen valores pequeños de croma al Día/Hora 0 de exposición. El cambio a valores negativos de h° , que sufren las muestras cuando son expuestas a ambos tipos de intemperismo, se debe a que las coordenadas del parámetro a^* sufren un cambio de valores positivos (a^{*+}) a valores negativos (a^{*-}), indicando una tendencia asentuada hacia el color verde. De acuerdo con Geuskens y col. (1978), Weir (1978) y Lucki y col. (1979), cuando el PS es sometido a la irradiación UV en presencia de aire, sufre un amarillamiento rápido y una fragilidad gradual. Además, industrialmente, la decoloración amarilla es un efecto adverso importante del envejecimiento del PS, como sucede durante la exposición al intemperismo natural. Wypych (2008) ha reportado que la mayoría de los cambios ópticos se deben a la formación de sustancias coloridas a partir de radicales fotoiniciados. El amarillamiento del material depende de la longitud de onda de la radiación y de la composición química. Además, el mecanismo de decoloración siempre está relacionado con la formación de productos químicos que son capaces de absorber la luz azul. El amarillamiento de nuestras muestras de PS, en ambos tipos de intemperismo, coinciden con los autores antes mencionados, de acuerdo a los valores de h° y el aumento gradual de C^* . Comparando ambos tipos de intemperismo, una vez iniciado el proceso de exposición, se observan valores superiores de h° en las muestras expuestas a intemperismo natural. Esto se debe a una mayor cantidad de irradiación UV sobre las muestras de PS, de acuerdo con los datos de irradiación solar antes presentados (Ver Figura 12). Por otro lado, la irradiación gamma aumenta los valores del h° solamente en algunos casos específicos.

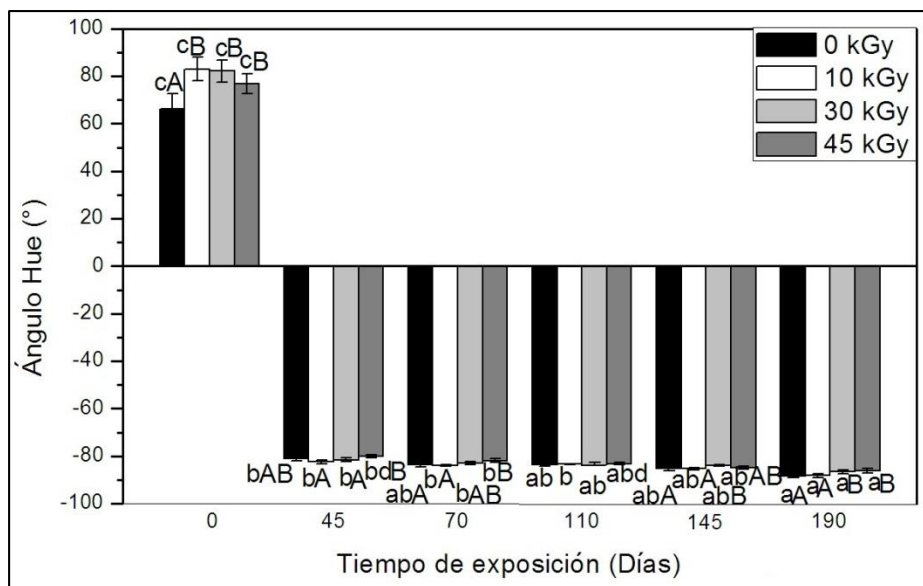


Figura 25. Parámetro h° de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo natural. Columna con letra minúscula diferente indica diferencia significativa entre las dosis de irradiación y el tiempo de exposición ($P < 0.05$). Columna con letra mayúscula diferente indica diferencia significativa entre dosis de irradiación al mismo tiempo de exposición ($P < 0.05$).

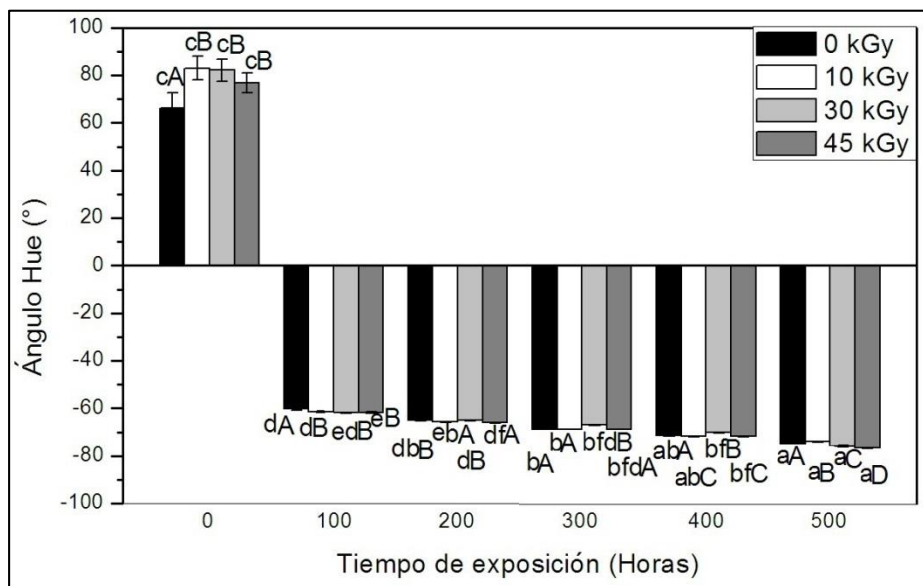


Figura 26. Parámetro h° de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo artificial. Columna con letra minúscula diferente indica diferencia significativa entre las dosis de irradiación y el tiempo de exposición

($P < 0.05$). Columna con letra mayúscula diferente indica diferencia significativa entre dosis de irradiación al mismo tiempo de exposición ($P < 0.05$).

Los resultados de ΔE de las muestras sometidas a intemperismo natural e intemperismo artificial se presentan en las Figuras 27 y 28, respectivamente. En estas figuras es posible observar que el PS sin exposición a ambos tipos de intemperismo (Día/Hora 0) y con 0 kGy, fue tomada como la muestra control para el cálculo de la diferencia de color (ΔE), por lo que este valor no es representado en ambas figuras. A las dosis de irradiación gamma de 10, 30 y 45 kGy, presentan un ligero incremento en los valores de ΔE con respecto a la muestra control. Sin embargo, no presentaron diferencia significativa ($P > 0.05$) entre las dosis de 10, 30 y 45 kGy. En la Figura 27 se observa un aumento en los valores de ΔE al día 45 de exposición, en donde existe diferencia significativa entre las diferentes dosis de irradiación gamma. Posteriormente, se observa un aumento gradual hasta el día 190, presentando solamente diferencia significativa entre las diferentes dosis de irradiación, al día 145 y 190 de exposición. Cabe señalar que al día 145, las muestras con dosis de 30 kGy presentan valores inferiores comparados con las muestras con dosis de 10 kGy. Al día 190 las muestras con dosis de 30 y 45 kGy, presentan valores inferiores en comparación con las muestras con dosis de 0 kGy. En la Figura 28 se observa que después de 100 h de exposición, los valores de ΔE aumentaron hasta el final de la exposición de forma más lineal, comparado con los valores obtenidos por intemperismo natural. En este mismo tiempo de exposición, se observa diferencia significativa ($P < 0.05$) entre las diferentes dosis de irradiación gamma, en donde las muestras con dosis de 10, 30 y 45 kGy, presentan valores superiores a las muestras con 0 kGy. A la hora 200 de exposición, las muestras con dosis de 10 y 45 kGy, presentan valores superiores en comparación con las muestras con dosis de 0 y 30 kGy. Posteriormente, a las horas 300 y 400 de exposición, las muestras con dosis de 30 kGy presentan valores inferiores en comparación con el resto de las muestras. Finalmente, a la hora 500 de exposición, las muestras con dosis de 10 y 45 kGy, presentaron una disminución y aumento en los valores de ΔE , respectivamente, al compararlas con las muestras sin exposición a la irradiación gamma.

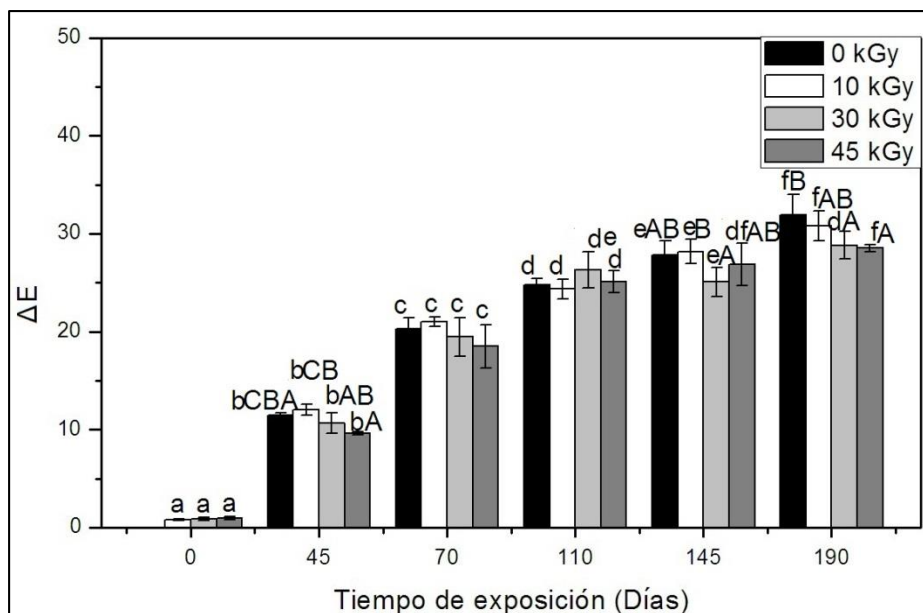


Figura 27. Parámetro ΔE de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo natural. Columna con letra minúscula diferente indica diferencia significativa entre las dosis de irradiación y el tiempo de exposición ($P < 0.05$). Columna con letra mayúscula diferente indica diferencia significativa entre dosis de irradiación al mismo tiempo de exposición ($P < 0.05$).

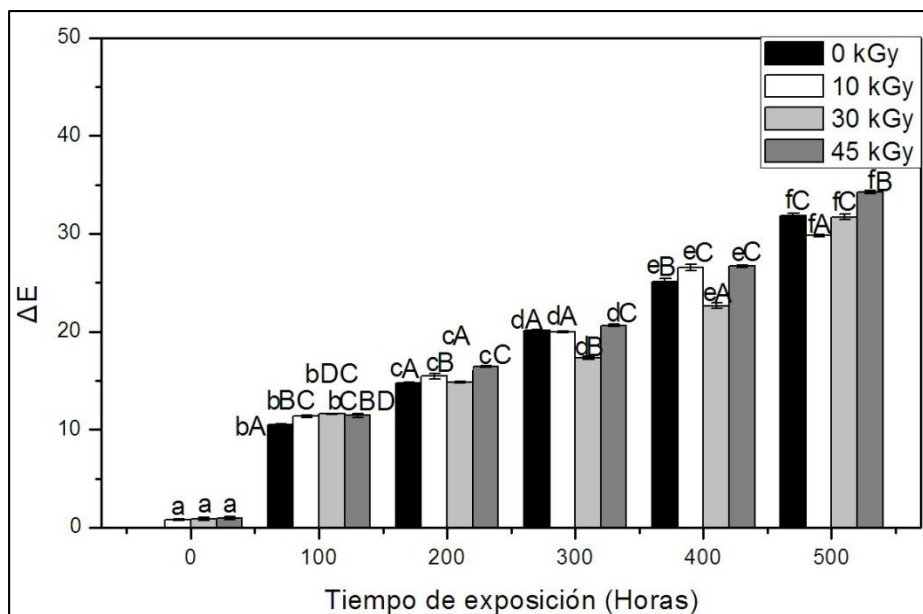


Figura 28. Parámetro ΔE de muestras de PS sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma, en función del tiempo de exposición a intemperismo artificial. Columna con letra minúscula dife-

rente indica diferencia significativa entre las dosis de irradiación y el tiempo de exposición ($P < 0.05$). Columna con letra mayúscula diferente indica diferencia significativa entre dosis de irradiación al mismo tiempo de exposición ($P < 0.05$).

En los Anexos 7 al 12 se presentan las tablas con los resultados del análisis de varianza (ANOVA) realizado a partir de los datos experimentales a los diferentes parámetros de color presentados en esta sección.

Con base en los resultados anteriores, se seleccionaron las muestras sometidas a intemperismo natural correspondientes a los tiempos de exposición 0, 110 y 190 días; para las muestras sometidas a intemperismo artificial a los tiempos de exposición de 0, 300 y 500 horas. En estos periodos de exposición de ambos tipos de intemperismos fueron seleccionados debido a que presentaron los valores superiores e inferiores en las propiedades mecánicas, de acuerdo al comportamiento en el esfuerzo máximo y la elongación a la ruptura. También, se consideró las dosis de irradiación gamma de 0 y 45 kGy, ya que se pretende observar un claro efecto de la irradiación sobre las películas de PS durante la exposición en ambos tipos de intemperismo. En virtud de lo anterior, se utilizarán estos periodos de exposición con dos diferentes dosis de irradiación gamma para los análisis que se describen a continuación.

Análisis Morfológico

En la Figura 29 se presenta las imágenes obtenidas a través de un microscopio óptico digital de la superficie de muestras de PS, sometidas a intemperismo natural: A) 0 kGy y B) 45 kGy, y a diferentes tiempos de exposición (0, 110 y 190 días). Sin la exposición al intemperismo natural (día 0), no se observan fracturas en la superficie de las muestras irradiadas con dosis de 45 kGy, así como en la muestra control (0 kGy). Además, no se observa un cambio aparente del color o de la textura en las muestras por el efecto de la irradiación gamma. Sin embargo, al día 110 de exposición, las muestras se tornan de un color amarillo-verdoso. Ya sea en las muestras irradiadas o sin irradiación gamma (0 kGy), y sin presentar diferencias entre ellas. Por último, al día 190 de exposición, se observa un cambio en el color en las muestras con y sin dosis de irradiación gamma, con una coloración más intensa y un tono hacia el verde. Cabe señalar que la muestra sin dosis de irradiación gamma presenta una coloración más intensa en comparación con la muestra con dosis de 45 kGy. Estas observaciones concuerdan con los valores obtenidos

en los parámetros de color descritos en la sección anterior.

Por otro lado, en la Figura 29 podemos observar que las muestras expuestas a intemperismo natural sufrieron desprendimiento de partículas, ya que el color de las muestras no es totalmente uniforme, por lo que existen zonas más claras que otras. De acuerdo con Blaga (1980), la degradación de los polímeros generalmente comienza en la superficie externa y penetra gradualmente al material. Por lo tanto, la superficie de las películas de PS está más expuesta a la luz ultravioleta, lo que genera un color más intenso que en la parte interna de la película. Posteriormente, debido a un proceso denominado erosión, en donde el viento del sitio de ensayo puede contener y/o transportar partículas de polvo o arena, las cuales son abrasivas a la superficie de las películas, causa un desprendimiento de partículas en la superficie de las muestras de PS.

En la Figura 30 se presentan las muestras sometidas a intemperismo artificial: A) 0 kGy y B) 45 kGy, y a diferentes tiempos de exposición (0, 300 y 500 h). Sin la exposición al intemperismo artificial (hora 0) se presentan los mismos resultados al igual que en el intemperismo natural. Después de 300 h de exposición, se observa una coloración amarilla-verdosa en las muestras con y sin irradiación gamma, sin presentar una diferencia visible en el color. Por último, a 500 h de exposición se observa un cambio en el color de las muestras, presentando una intensidad de color mayor en comparación con la de 300 h de exposición. Cabe señalar que las muestras con dosis de 45 kGy presentan una intensidad mayor comparado con las muestras sin irradiación (0 kGy), coincidiendo con los resultados de los parámetros C^* , h° y ΔE , descritos anteriormente. Comparando ambos tipos de intemperismo, se observa una mayor coloración amarillo-verdosa en las muestras sometidas a intemperismo natural, coincidiendo con los resultados del h° .

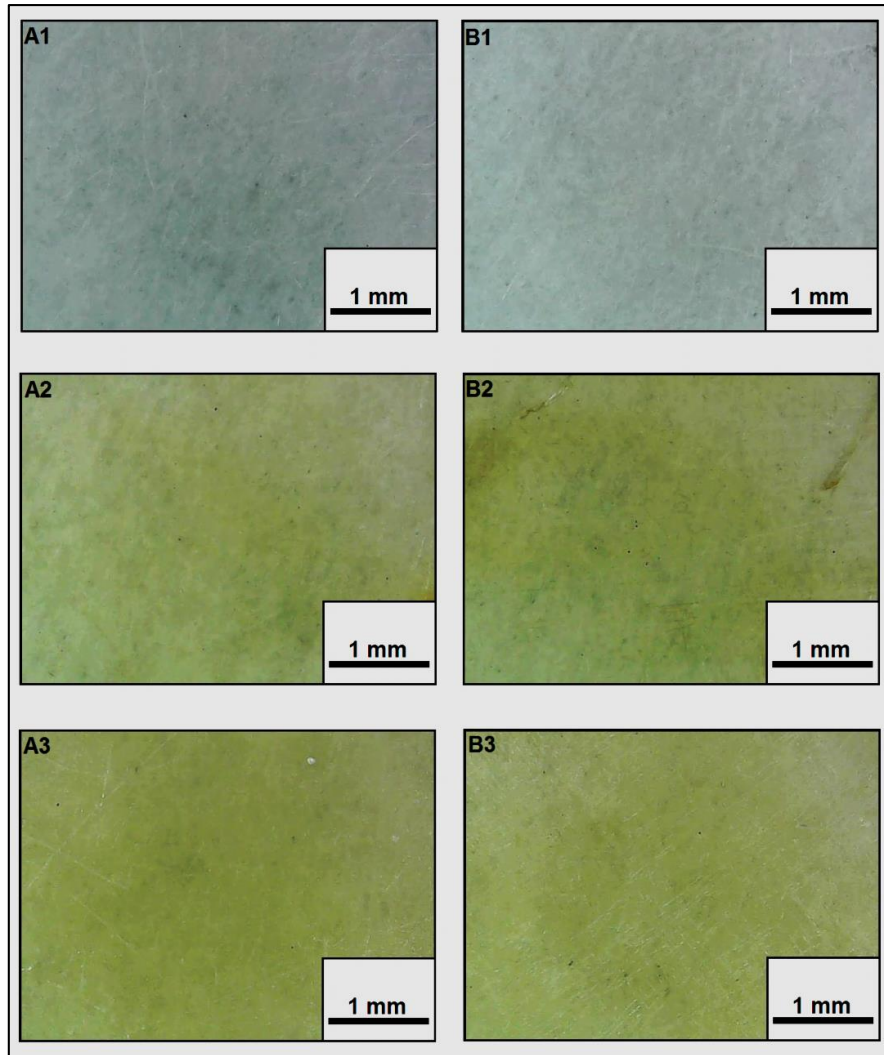


Figura 29. Imágenes de microscopio óptico digital de la superficie de muestras de PS expuestas a intemperismo natural a una magnificación de 35X: A) 0 kGy y B) 45 kGy a diferentes días de exposición: día 0 (1), día 110 (2) y día 190 (3).

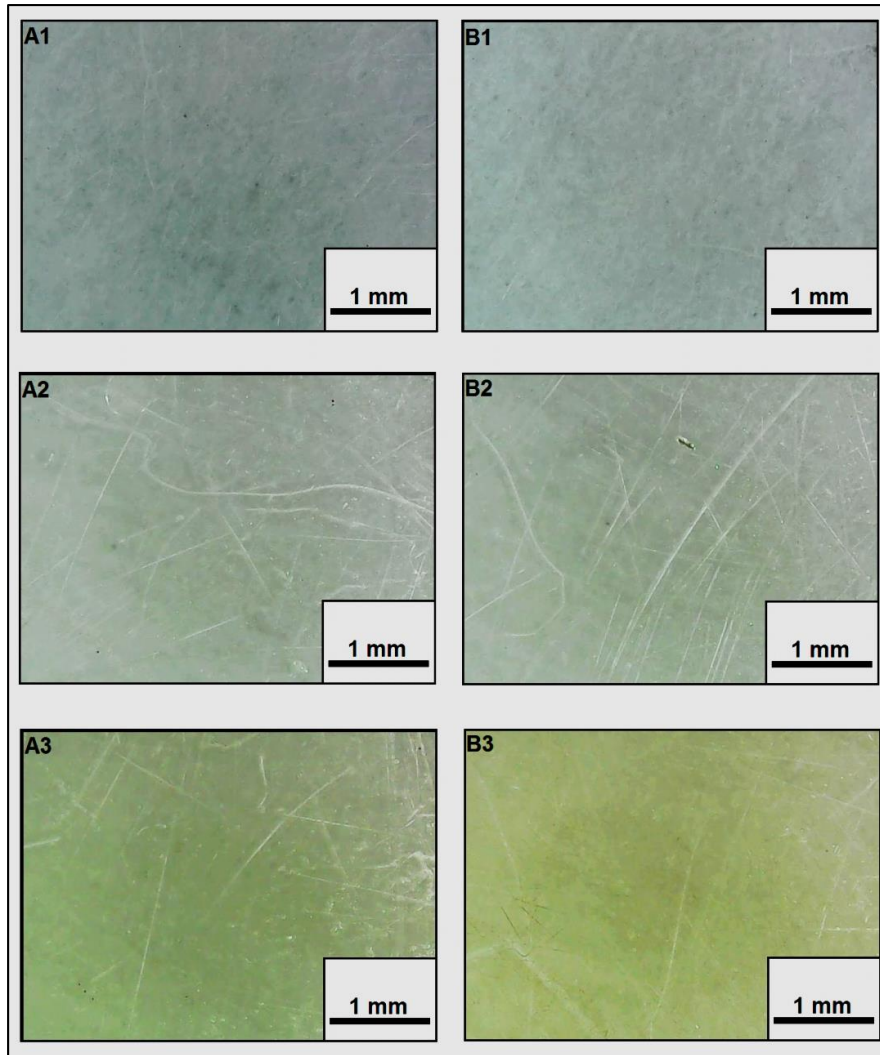


Figura 30. Imágenes de microscopio óptico digital de la superficie de muestras de PS expuestas a intemperismo artificial a una magnificación de 35X: A) 0 kGy y B) 45 kGy a diferentes horas de exposición: hora 0 (1), hora 300 (2) y hora 500 (3).

Análisis Termogravimétrico (TGA)

El análisis térmico se define como un grupo de técnicas en las que se monitorea una propiedad de la muestra frente al tiempo o la temperatura en una atmósfera especificada (Brown, 2006). Se utilizó el análisis termogravimétrico (TGA) para determinar la estabilidad térmica del PS con y sin irradiación gamma, durante la exposición a ambos tipos de intemperismo con un interés particular en la medición del peso en función de la temperatura. En las Figuras 31 y 32, se presentan los termogramas de las muestras de PS expuestas a intemperismo natural a los días 0, 110 y 190,

con dosis de 0 y 45 kGy, respectivamente. En ambas figuras se aprecia que el aumento del tiempo de exposición provoca un corrimiento en la estabilidad (disminución de la temperatura en la cual inicia el proceso de descomposición) en el termograma, en donde al día 110 y 190 de exposición, los termogramas son muy similares. Este corrimiento posiblemente es producto de la disminución del peso molecular en el PS, de acuerdo con Nishizaki y col. (1981). Cabe señalar que la degradación a los diferentes tiempos de exposición se llevó a cabo en una sola etapa. Por otro lado, comparando ambas figuras podemos apreciar que existe un ligero corrimiento en la estabilidad en el termograma en los diferentes tiempos de exposición. Esto se debe a la irradiación gamma (Figura 32). Por lo tanto, en la derivada del termograma de la Figura 31B a 0 días de exposición, se observa que la degradación se lleva a cabo en el rango de temperatura ubicado entre 356 y 453 °C, similar a lo reportado por Peterson y col. (2001), mientras que en la derivada del termograma de la Figura 32B, al mismo tiempo de exposición, sucede entre 345 y 450 °C. En la Figura 31B, a 110 días de exposición, la degradación se aprecia en el rango de temperatura ubicado entre 310 y 450 °C, mientras que en la Figura 32B sucede entre 306 y 445 °C. En la Figura 31B, a 190 días de exposición, la degradación se aprecia en el rango de temperatura ubicado entre 311 y 449 °C, mientras que en la Figura 32B, sucede entre 295 y 448 °C. Las temperaturas de descomposición máximas de las muestras sin irradiación gamma (Figura 31) se encuentran en 407, 408 y 407 °C para los días 0, 110 y 190, respectivamente. Las temperaturas de descomposición máximas de las muestras con dosis de 45 kGy (Figura 32) se encuentran en 407, 402 y 405 °C para los días 0, 110 y 190, respectivamente.

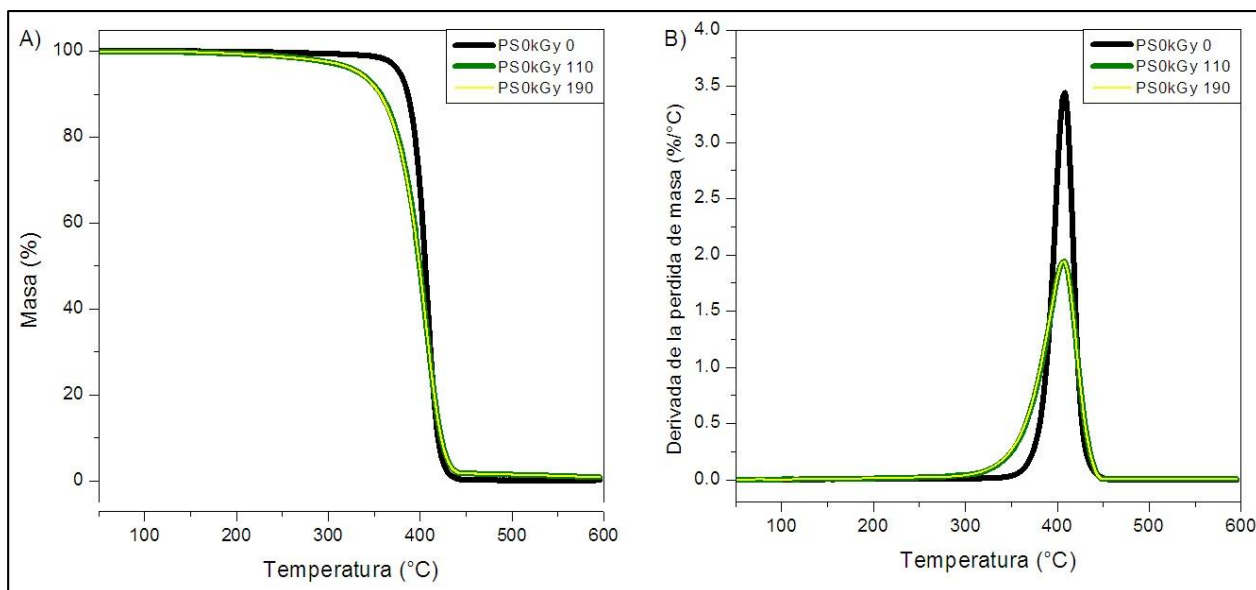


Figura 31. Termograma (A) y derivadas (B) del análisis termogravimétrico de muestras de PS irradiadas con 0 kGy y expuestas a intemperismo natural a diferentes días de exposición: 0, 110 y 190.

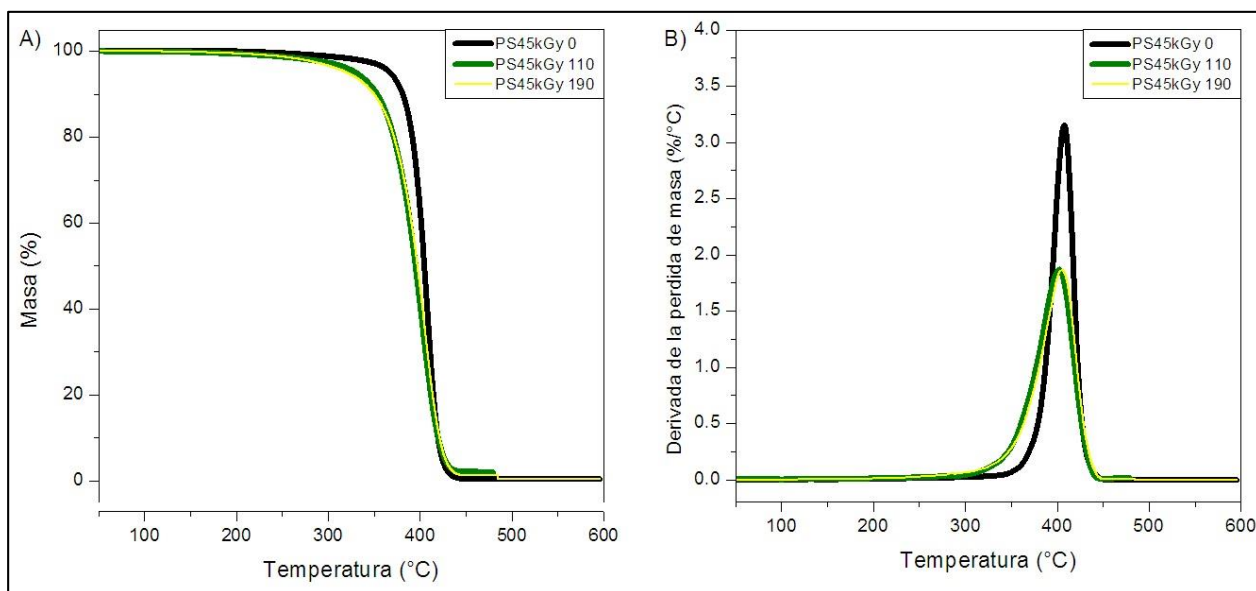


Figura 32. Termograma (A) y derivadas (B) del análisis termogravimétrico de muestras de PS irradiadas con 45 kGy y expuestas a intemperismo natural a diferentes días de exposición: 0, 110 y 190.

En las Figuras 33 y 34, se presentan los termogramas de las muestras de PS expuestas a intemperismo artificial a 0, 300 y 500 h, con dosis de 0 y 45 kGy, respectivamente. En ambas figuras, al igual que las muestras expuestas a intemperismo natural, se aprecia que el aumento del tiempo de exposición provocó un corrimiento a menor temperatura de la estabilidad térmica de las muestras expuestas a 300 y 500 h con respecto a la muestra control. De igual manera, la degradación a diferentes tiempos de exposición se presenta en una sola etapa, como también, un ligero corrimiento en la estabilidad en el termograma en los diferentes tiempos de exposición, debido a la irradiación gamma (Figura 34). En la derivada del termograma de la Figura 33B a 0 h de exposición, se observa que la degradación se lleva a cabo en el rango de temperatura ubicado entre 356 y 453 °C, mientras que en la derivada del termograma de la Figura 34B, al mismo tiempo de exposición, sucede entre 345 y 450 °C. En la Figura 33B, a 300 h de exposición, la degradación se aprecia en el rango de temperatura ubicado entre 318 y 450 °C, mientras que en la Figura 34B, sucede entre 315 y 450 °C. En la Figura 33B, a 500 h de exposición, la degradación se aprecia en el rango de temperatura ubicado entre 315 y 450 °C, mientras que en la Figura 34B, sucede entre 312 y 450 °C. Las temperaturas de descomposición máximas de las muestras sin irradiación gamma (Figura 33) se encuentran en 407, 409 y 408 °C para 0, 300 y 500 h, respectivamente. Las temperaturas de descomposición máximas de las muestras con dosis de 45 kGy (Figura 34) se encuentran en 407, 408 y 409 °C para 0, 300 y 500 h, respectivamente.

Del análisis de los resultados obtenidos por ambos tipos de intemperismo, se observó que la irradiación gamma (45 kGy) provocó una disminución de la estabilidad térmica con la cual inicia el proceso de descomposición. Este proceso causa la ruptura de los enlaces en las cadenas de PS, así como también el proceso opuesto (la formación de enlaces) que es la reticulación. Ya que las muestras con dosis de 45 kGy y expuestas a intemperismo natural, después de presentar una disminución de la temperatura de descomposición máxima, se observó que ésta aumentó al final de la exposición. Estos dos procesos opuestos provocados por la irradiación gamma, concuerda con lo reportado por Hill y col. (1996).

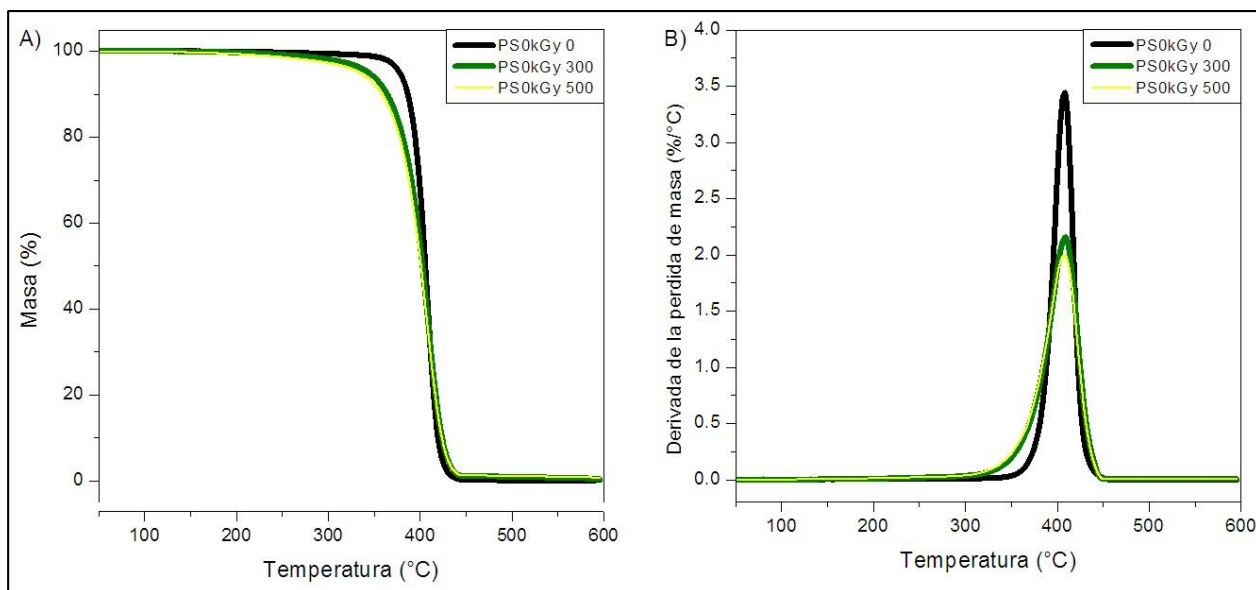


Figura 33. Termograma (A) y derivadas (B) del análisis termogravimétrico de muestras de PS irradiadas con 0 kGy y expuestas a intemperismo artificial a diferentes horas de exposición: 0, 300 y 500.

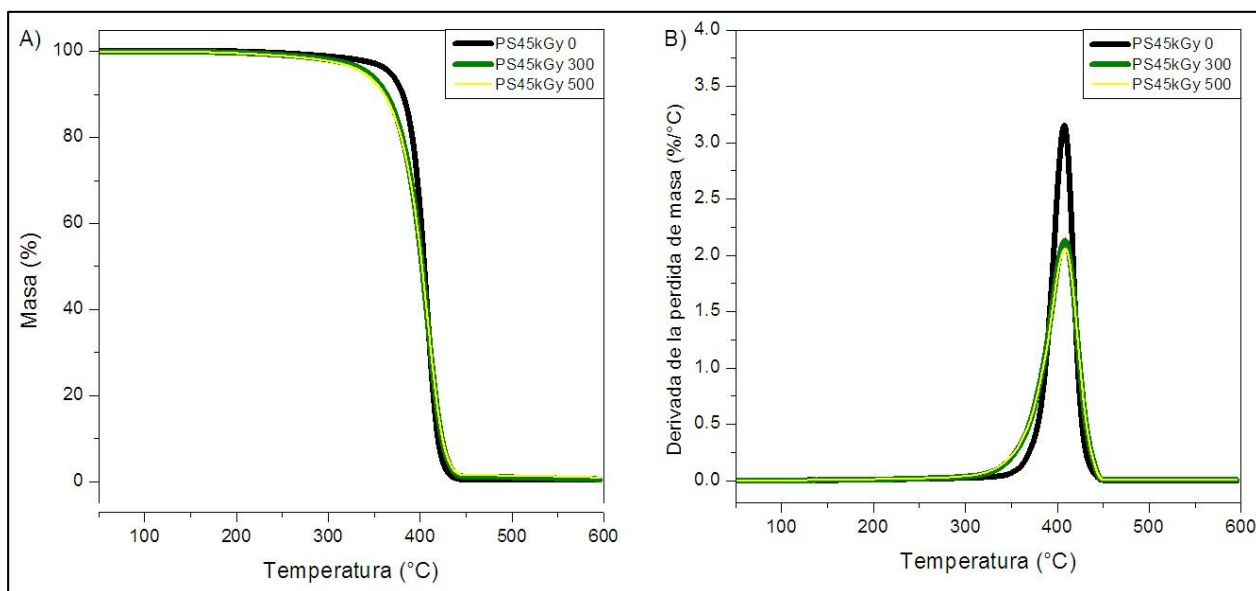


Figura 34. Termograma (A) y derivadas (B) del análisis termogravimétrico de muestras de PS irradiadas con 45 kGy y expuestas a intemperismo artificial a diferentes horas de exposición: 0, 300 y 500.

Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

La calorimetría diferencial de barrido (DSC) puede emplearse para explicar los pasos de descomposición observados en los datos de TGA (Peterson y col., 2001). El DSC se usa para identificar y cuantificar diversos parámetros térmicos de los polímeros, como la temperatura de transición vítrea (T_g). La T_g es la temperatura en la que el polímero pasa de un estado sólido vídrioso frágil a un estado de caucho blando. La temperatura coincide con el conjunto de movimiento molecular en la cadena del polímero que se produce en la región amorfa (Giles, 2005). En la Tabla 1 se presenta los valores de T_g calculados a partir de los termogramas de DSC de las muestras expuestas a intemperismo natural en tres diferentes periodos de exposición (0, 110 y 190 días) y con dosis de 0 y 45 kGy. En la Tabla 2 se presenta los valores de T_g calculados a partir de los termogramas de DSC de las muestras expuestas a intemperismo artificial en tres diferentes periodos de exposición (0, 300 y 500 h) y con dosis de 0 y 45 kGy. En ambos tipos de intemperismo, los valores de T_g fueron obtenidos para los dos ciclos de calentamiento a los que se sometieron las muestras con y sin irradiación gamma. Para propósitos de análisis y de discusión, se han considerado los valores de T_g del segundo ciclo de calentamiento, ya que los polímeros poseen un historial térmico el cual tiene una influencia en las propiedades fisicoquímicas. Por lo tanto, el primer calentamiento corresponde a la historia térmica del procesamiento del material, y una vez que se ha fundido se enfría rápidamente para mantener su estado amorfo. Un segundo calentamiento registra el historial térmico de la fase amorfa del primer ciclo calentamiento-enfriamiento (Lendlein, 2010). Podemos observar en ambos tipos de intemperismo, que el PS a 0 Días/Horas de exposición y a las dosis de irradiación gamma de 0 y 45 kGy, presentan una T_g de 102°C. Este resultado es similar a lo reportado por Wunderlich (1990). Esto indica la estabilidad del PS a la irradiación gamma. En la Tabla 1 se observan valores muy similares de la T_g en los ciclos correspondientes y los tiempos de exposición. Se ve un claro incremento de la T_g en el primer ciclo de los tiempos de exposición. Este incremento se atribuye a los gradientes de temperatura a los que están expuestas las muestras durante la exposición. En el segundo ciclo se observa una disminución en los valores de T_g . Esto significa que la historia térmica de las cadenas de PS ya fue borrada y los valores registrados corresponden a la fase amorfa. En la Tabla 2 se observa una aparente tendencia a disminuir la T_g con el paso de la exposición. Esto se debe a una disminución del peso molecular, de acuerdo con Dalnoki-Veress y col. (2001) y Aguilera (2007), causado por la irradiación UV aunado a la irradiación gamma (45 kGy). Sin embargo, llama particularmente la atención la muestra expuesta 300 h y a las dos dosis de irradiación (0 y 45 kGy), donde éstas presentan un

incremento de la Tg en el segundo ciclo de calentamiento. ¿Qué estaría causando este incremento de la Tg en el 2º ciclo? Esto puede explicarse en términos de las propiedades estructurales y mecanismo de degradación del PS que se abordarán más adelante, pero guardan una correlación con los resultados reportados en las propiedades mecánicas y color.

Tabla 1. Valores de Tg de las muestras de PS irradiadas con 0 y 45 kGy, expuestas a 0, 110 y 190 días de intemperismo natural y en dos ciclos de calentamiento.

Dosis (kGy)	Día 0		Día 110		Día 190	
	1er ciclo	2º ciclo	1er ciclo	2º ciclo	1er ciclo	2º ciclo
0	103.9	102.1	102.9	98.9	103.2	100.3
45	103.61	102.7	103.6	99.1	104.3	98.1

Tabla 2. Valores de Tg de las muestras de PS irradiadas con 0 kGy y expuestas a 0, 300 y 500 h de intemperismo artificial, y en dos ciclos de calentamiento.

Dosis (kGy)	Hora 0		Hora 300		Hora 500	
	1er ciclo	2º ciclo	1er ciclo	2º ciclo	1er ciclo	2º ciclo
0	103.9	102.1	100.2	101.3	100.6	100.9
45	102.6	102.7	97.9	100.9	105.8	99.9

En los Anexos 13 al 16 se presentan los termogramas de DSC de las muestras presentadas en esta sección.

Espectroscopia de Infrarrojo con Transformadas de Fourier con Reflexión Total Atenuada (ATR-FTIR)

En las Figuras 35 y 36, se muestran los espectros en dos regiones del IR (A y B), correspondientes a las muestras expuestas a intemperismo natural, desde el día 0 (a) hasta el día 190 (f), con dosis de irradiación a 0 y 45 kGy, respectivamente. Se observa que las muestras a 0 días de exposición presentan señales alrededor de 3022 y 2920 cm^{-1} , las cuales corresponden al estiramiento asimétrico del grupo metileno ($-\text{CH}_2$) y al estiramiento aromático (CH), respectivamente (Ifegwu y col., 2015). Además, se observa señales alrededor de 1600, 1492 y 1446 cm^{-1} , las cuales corresponden al estiramiento del doble enlace carbono-carbono ($\text{C}=\text{C}$); así como también, las señales alrededor de 748 y 690 cm^{-1} , las cuales nos indican la presencia de un sólo sustituyente sobre el benceno (monosustituido) y que se debe a la flexión fuera del plano del anillo aromático (Hummel, 2012). Las señales antes descritas concuerdan con la estructura de las cadenas de PS. Por lo tanto, la irradiación gamma no indujo la formación de grupos funcionales o la atenuación de alguna señal, de manera que se corrobora la estabilidad del PS a la irradiación gamma (Ver espectros de las Figuras 35 (A) y 36 (A)).

Por otra parte, en la Figura 35 se observa que las señales alrededor de 3022 y 2920 cm^{-1} , tienden a atenuarse con el transcurso del tiempo de exposición, siendo más evidente a partir del día 110 hasta su desaparición al día 190. Esto nos indica que el grupo metileno es atenuado significativamente por los efectos del intemperismo natural. Asimismo, en la Figura 36 se observa el mismo fenómeno, siendo más evidente la atenuación de estas señales a partir del día 70 hasta su desaparición al día 145; para después reaparecer al día 190, nuevamente las señales presentadas al día 0. En las Figuras 35 (B) y 36 (B), se observa la atenuación de las señales de alrededor de 1600, 1492, 1446, 748 y 690 cm^{-1} , con relación al tiempo de exposición. Además, al día 70 y 110, se observa la aparición de una señal de alrededor de 1750 cm^{-1} , la cual corresponde al estiramiento del grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$), de acuerdo con Waldman y col. (2008); siendo más intensa al día 110. Posteriormente, al día 145 se observa una atenuación de esta señal hasta el final de la exposición; así mismo se observa una atenuación muy marcada de otras señales en esta Figura. Finalmente, al día 190, la muestra sin dosis de irradiación gamma (Figura 35(B)) presenta un ligero aumento en la intensidad de las señales ubicadas en 748 y 690 cm^{-1} , las cuales corresponden a la señal C-H sustituyente del estireno. En cambio, la muestra con una dosis de 45 kGy y 190 días de exposición, presentan las mismas señales y con la misma intensidad que al día 0. Lo cual estaría indicando una mayor disponibilidad de grupos C-H sustituyentes del anillo

aromático (estireno) debido a la degradación tanto por la irradiación gamma, como por la exposición al intemperismo natural.

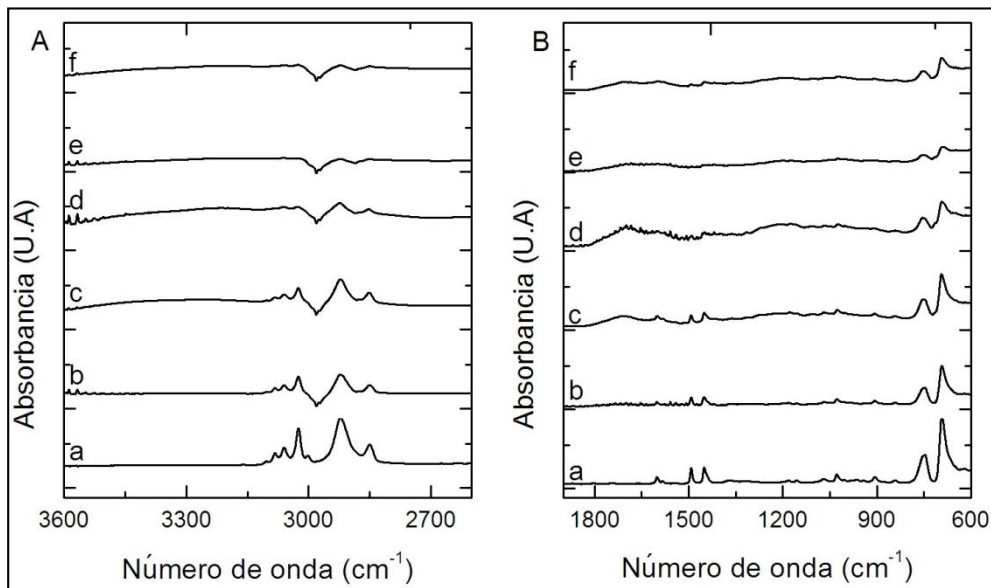


Figura 35. Espectro de FTIR de muestra de PS irradiada con 0 kGy y expuesta a intemperismo natural. (A) (3600-2600 cm^{-1}) y (B) (1900-600 cm^{-1}), a diferentes tiempos de exposición: (a) 0, (b) 45, (c) 70, (d) 110, (e) 145 y (f) 190 días.

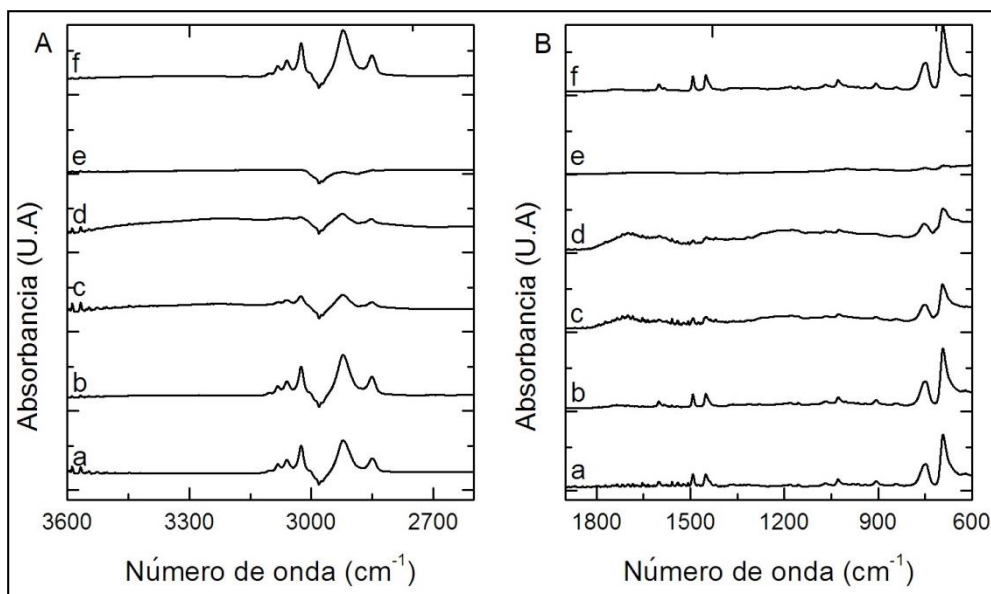


Figura 36. Espectro de FTIR de muestra de PS irradiada con 45 kGy y expuesta a intemperismo

natural. (A) ($3600\text{-}2600\text{ cm}^{-1}$) y (B) ($1900\text{-}600\text{ cm}^{-1}$), a diferentes tiempos de exposición: (a) 0, (b) 45, (c) 70, (d) 110, (e) 145 y (f) 190 días.

En las Figuras 37 y 38, se muestran los espectros de FTIR en dos regiones del IR (A y B), correspondientes a las muestras expuestas a intemperismo artificial, desde la hora 0 (a) hasta la hora 500 (f), a las dosis de 0 y 45 kGy, respectivamente. Se observa que las muestras a 0 h de exposición no presentan una diferencia en sus señales en relación a la presencia o ausencia de la irradiación gamma. Este resultado coincide con lo observado en las Figuras 35 y 36. Posteriormente, observamos un comportamiento similar al presentado por las muestras expuestas a intemperismo natural, en donde existe una atenuación de las señales con el tiempo de exposición; pero con la diferencia de una disminución paulatina de las bandas. No obstante, a la hora 400 y 500 de exposición, se observó la aparición de una señal alrededor de 1750 cm^{-1} , la cual corresponde al estiramiento del grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$), siendo más intensa esta señal a 500 h, aunque en este periodo de exposición se observó la atenuación más acentuada de las señales en ambas regiones del IR conforme transcurre el tiempo de exposición (Figura 38 (A) y (B)).

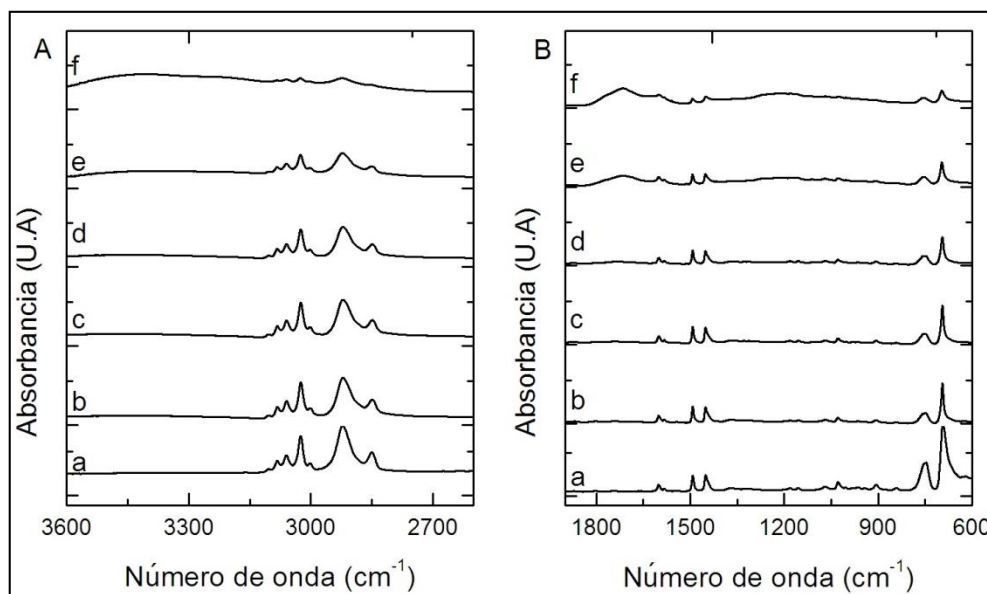


Figura 37. Espectro de FTIR de muestra de PS irradiada con 0 kGy y expuesta a intemperismo artificial. (A) ($3600\text{-}2600\text{ cm}^{-1}$) y (B) ($1900\text{-}600\text{ cm}^{-1}$), a diferentes tiempos de exposición: (a) 0, (b) 100, (c) 200, (d) 300, (e) 400 y (f) 500 h.

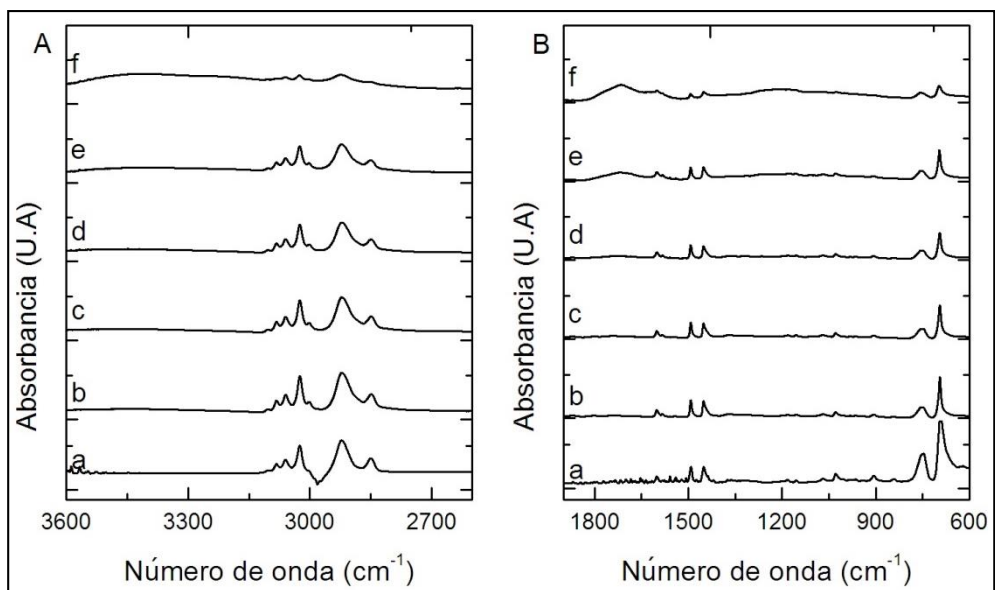


Figura 38. Espectro de FTIR de muestra de PS irradiada con 45 kGy y expuesta a intemperismo artificial. (A) (3600-2600 cm^{-1}) y (B) (1900-600 cm^{-1}), a diferentes tiempos de exposición: (a) 0, (b) 100, (c) 200, (d) 300, (e) 400 y (f) 500 h.

De acuerdo con Stuart (2005), la espectroscopía infrarroja puede utilizarse para medir el número de grupos funcionales en una molécula. Se ha encontrado que la absorptividad molar de las bandas correspondientes al grupo funcional es proporcional al número de grupos que están presentes, es decir, cada grupo tiene su propia intensidad que no varía drásticamente de molécula a molécula. Este enfoque se ha utilizado para medir la longitud de la cadena en hidrocarburos utilizando la deformación C-H, el grupo metileno a 1467 y 1305 cm^{-1} , y el número de grupos metilo, en el caso del polietileno. Por lo tanto, la atenuación en las señales conforme al transcurso del tiempo de exposición en ambos tipos de intemperismo, podría deberse a la escisión de cadenas generado por la luz UV, lo cual se traduce en cadenas de PS más cortas y con un menor número de grupos funcionales. Por otra parte, de acuerdo con Singh y col (2002), Bottino y col. (2004) y Leroux y col. (2005), se ha demostrado por medio de la espectroscopia infrarroja, la aparición de grupos carbonilo e hidroxilo en películas de PS, ante la exposición a luz UV y la presencia de oxígeno. En nuestros resultados, no observamos la aparición de una señal perteneciente al grupo hidroxilo (-OH), pero si a la aparición del grupo carbonilo a partir de 70 días de exposición, con una tendencia a disminuir la intensidad de su señal hacia el final de la exposición. Esto en el caso de las muestras expuestas a intemperismo natural. Para el caso de las muestras expuestas a intemperismo artificial, éstas presentaron la señal del grupo carbonilo

a las 400 y 500 h de exposición. Dicho lo anterior, se puede deducir que el aumento en el tiempo de exposición a luz UV aumenta la probabilidad de la formación del grupo carbonilo, pero al prolongar la exposición ésta podría causar la atenuación de esta señal. En el caso de la muestra irradiada con 45 kGy, y expuesta a intemperismo natural por 190 días, parece indicar que el aumento a la exposición a la luz solar (UV), aunado a la irradiación gamma (45 kGy), conduce a la desaparición de la señal del grupo carbonilo y a una unión entre radicales PS, generando las mismas señales que al día 0 aunque con menor intensidad.

Mecanismo de Degradación

Las muestras con y sin exposición a la irradiación gamma, que fueron ensayadas en ambos tipos de intemperismo, experimentaron un proceso de degradación foto-oxidativa, debido a la acción de la luz UV como un primer agente, aunado a las condiciones ambientales y de exposición (temperatura, humedad y condensación). Por lo tanto, para establecer un posible mecanismo de fotodegradación del PS, se deben considerar los factores: irradiación UV, dosis de irradiación gamma y medio ambiente/condiciones de exposición.

Los mecanismos de degradación de polímeros se atribuyen esencialmente a la formación de radicales macromoleculares y a las reacciones posteriores de dichos radicales con las macromoléculas poliméricas y el oxígeno. Como consecuencia de la degradación de los polímeros se presenta la decoloración, la fragilidad, la pérdida de brillo superficial y la formación de grietas superficiales (Fritscher, 1994). Los polímeros sintéticos son susceptibles a experimentar la degradación debido a la luz UV. La radiación solar que llega a la superficie terrestre tiene una energía que varía de 300 a 600 kJ/mol (región UV) y de 170 a 300 kJ/mol (región visible). La absorción de la luz ultravioleta se produce en agentes cromóforos que contienen grupos funcionales con electrones π , como son el grupo carbonilo y los dobles enlaces carbono-carbono (Waldman y col., 2008). La radiación UV posee suficiente energía para el rompimiento del enlace C-C (375 kJ/mol equivalente a 320 nm) (Singh y col., 2008). En el caso del PS, su foto-oxidación ya se ha estudiado a longitud de onda corta ($\lambda = 254$ nm), la cual es absorbida por los grupos cromóforos de estireno y longitudes de onda más largas ($\lambda \geq 300$ nm) (Mailhot y col., 1992; Gardette y col., 1995). Las longitudes de onda más largas son representativas del intemperismo natural. Sin embargo, el PS no posee agentes cromóforos a $\lambda \geq 300$ nm, pero como muchos otros polímeros, la oxidación es inducida por impurezas cromóforas, los cuales no pueden eliminarse del polímero o por complejos de transferencia de

carga (Lawrence y col., 1973; Rabek y col., 1974; Weir y col., 1989). Con base en los resultados reportados en la literatura y los obtenidos en este trabajo, se propone en la Figura 39, el esquema del mecanismo de fotodegradación del PS sometido a la irradiación gamma.

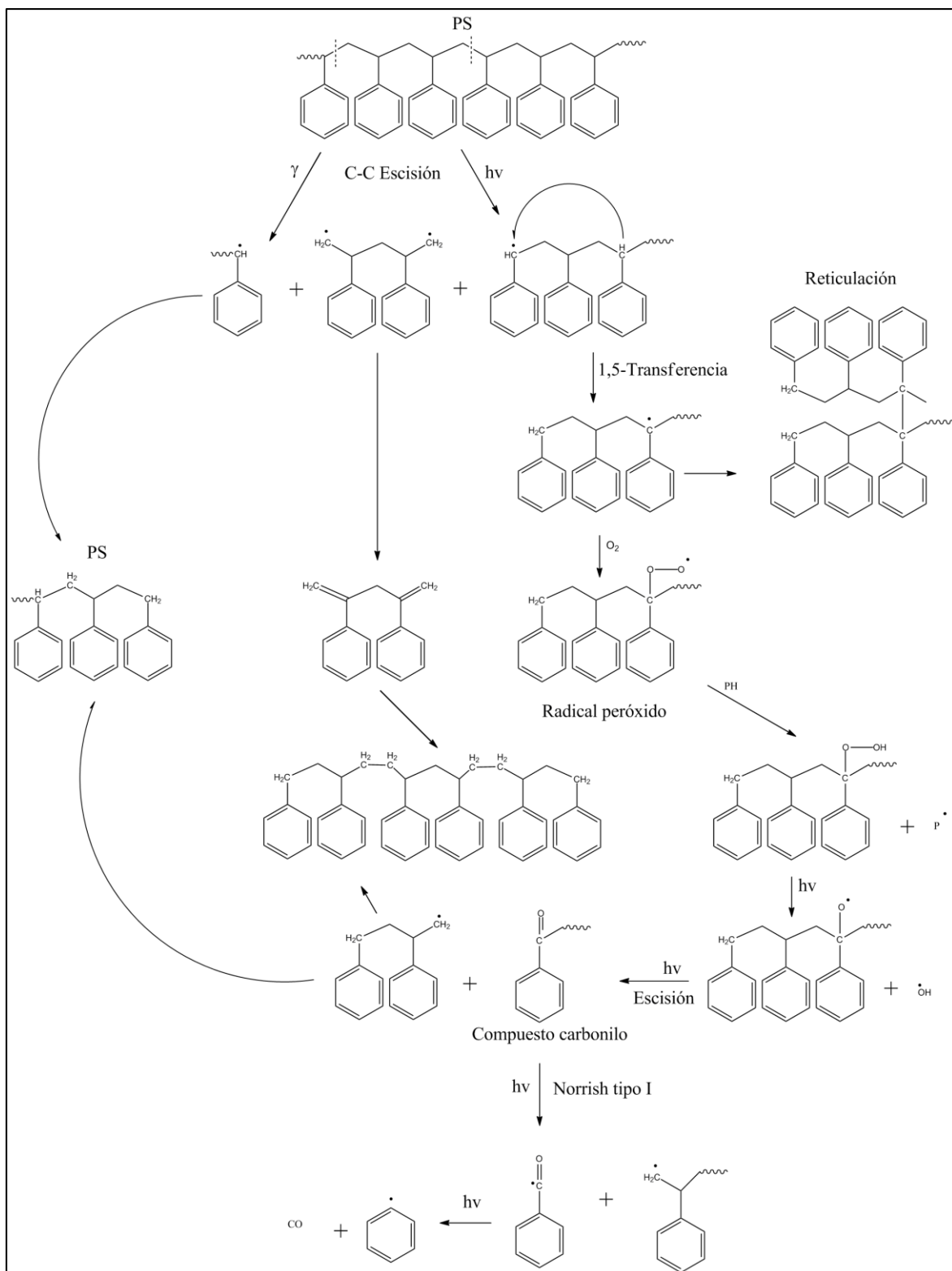


Figura 39. Esquema del mecanismo de fotodegradación para el PS sometido a la irradiación gamma.

Como se ha mencionado anteriormente, la exposición del PS a luz UV tiene como resultado la ruptura de los enlaces en la cadena principal (escisión de cadena), causando la descomposición de los enlaces poliméricos C-C. Aunque Kaczmarek (1995) reportó que la fotodegradación de PS se inicia por la absorción de radiación UV por el anillo aromático y que a su vez conduce a la escisión del enlace C-H de la cadena principal del carbono unido al anillo aromático. Se propone un mecanismo en el cual existe un predominio por la escisión de cadenas, que causa la descomposición de los enlaces C-C, esto en base a los resultados obtenidos. Consideremos en primer término el efecto de la luz UV. Primero se produjo la fisión de la cadena principal en posiciones aleatorias y se obtuvieron extremos radicales de la cadena. Luego los radicales bencilo resultan principalmente de una reacción de transferencia de 1,5-hidrógeno que ocurre en la degradación del PS (Zhang y col., 2012). Aunque el movimiento de las macromoléculas de polímero en estado sólido está restringido, los radicales libres pueden migrar a lo largo de la cadena del polímero hasta que quedan atrapados por otros radicales libres o por impurezas. Cuando dos macroradicales están cerca uno del otro, pueden producir la reticulación (Li y col., 2009). Otra alternativa es, si estos radicales en presencia de oxígeno (O₂), pueden someterse a la degradación oxidativa formando radicales peróxidos, seguido de la abstracción de H, formando los grupos hidroperóxido, los cuales, debido a la fotólisis, producen radicales alcoxi. Los radicales alcoxi pueden descomponerse por una escisión β para formar grupos carbonilo, lo que dota de polaridad al polímero (Chada y col., 2008; Li y col., 2009; Yousif y col., 2013). La fotodegradación de PS se acelera aún más por la acetofenona, la cual es un cromóforo con fuerte absorción UV (Ranby y col., 1992). Posteriormente, se da una reacción típica Norrish tipo I, en donde los carbonos de grupo carbonilo y α-carbonos de cetonas, se escinden homogéneamente por irradiación UV para formar dos radicales, y uno de los radicales acilo (RC = O) se reduce adicionalmente a monóxido de carbono (CO) y un radical alquilo (\cdot —R).

Por otra parte, al someter el PS a la irradiación gamma con un efecto combinado con la luz UV, se aumenta el grado escisión de cadenas del PS. No obstante, esto permite el incremento de la probabilidad de unión entre radicales PS, formados por la escisión del grupo alcoxi y por la escisión de cadenas debido a la irradiación gamma. Cabe aclarar que esta unión entre radicales PS se observó únicamente en las muestras irradiadas con dosis > 10 kGy y expuesta por un periodo de 190 días a intemperismo natural, reapareciendo las mismas señales observadas en FTIR al día 0 de exposición. De acuerdo con Tan y col. (2010), el PS irradiado con rayos gamma genera la formación de radicales libres (PS • + PS •) a una dosis de 12.5 kGy, coincidiendo con lo observado en nuestros resultados. Si bien, las diferentes reacciones del mecanismo que en

este trabajo ha sido corroborado por los resultados de los espectros de IR, se hace necesario realizar otros estudios empleando otras técnicas analíticas que permitan corroborar de manera fehaciente los diferentes productos del mecanismo propuesto.

CONCLUSIONES

Se evaluaron las propiedades fisicoquímicas del PS (con y sin irradiación gamma) a diferentes periodos de exposición a la intemperie natural y artificial. Se observó que la exposición a ambos tipos de intemperismo de las muestras ensayadas, presentaron una degradación evidente, lo cual se registró periódicamente durante el tiempo de exposición, presentándose una modificación significativa en sus propiedades fisicoquímicas.

La evaluación de las propiedades mecánicas de las muestras de PS (con y sin irradiación gamma) expuestas a ambos tipos de intemperismo, dio como resultado una disminución del esfuerzo máximo y de la elongación a la ruptura en función del tiempo de exposición. En contraste, el módulo de elasticidad presentó un aumento y una disminución con el paso del tiempo de exposición. Esto se debe a un efecto combinado entre la irradiación gamma y la luz UV, provocando que el aumento permaneciera prácticamente constante, mientras que la disminución del módulo de elasticidad se puede atribuir al debilitamiento del material debido a la formación y crecimiento continuo de grietas y porosidad. La evaluación del color dio como resultado el aumento lineal de C^* y ΔE , mientras que los valores del h^* respaldan el amarillamiento de las muestras con el paso de la exposición, como también el análisis morfológico. En las propiedades térmicas, la disminución del peso molecular del PS con el aumento del tiempo de exposición en ambos tipos de intemperismo, genera un corrimiento en la temperatura a la cual inicia la descomposición de las muestras (siendo mayor el corrimiento en las muestras irradiadas con rayos gamma), y también una tendencia a disminuir la T_g (aumentando en algunos casos). La espectroscopia de infrarrojo indicó cambios en los grupos funcionales en las muestras de PS (con y sin irradiación gamma) con el paso del tiempo de exposición. Se observó una disminución de grupos funcionales característicos del PS, así como la formación y desaparición del grupo carbonilo. Con base en los resultados obtenidos, el PS es un polímero que se degrada cuando se somete a la irradiación UV en condiciones de intemperismo natural o artificial, sufriendo amarillamiento rápido y una fragilidad gradual. Además, sufre la pérdida de propiedades mecánicas y la mejora en otras, por un efecto combinado con la irradiación gamma. En condiciones de intemperismo natural, el efecto combinado entre la irradiación UV y gamma, genera la unión entre radicales PS, lo cual indica que, a pesar de su degradación, el PS recupera su estructura inicial, por lo que podría prolongar el proceso de degradación a la intemperie.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achhammer B. G., Reiney M. J., and Reinhart, F. W. (1951). Study of degradation of polystyrene using infrared spectrophotometry. *J. Research National Bur. Standards*, 47, 116 RP2235. Federal Telecommunication Laboratories, Inc.
- Aguilera J.M. and Lillford P.J. (2007). *Food materials science: Principles and practice*, Food Engineering Series, New York Springer, p99.
- Andrady A.L, Neal M.A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society. B* 364:1977–1984.
- Askeland D. (1998). 15-1 Introducción. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. 3ª edición Missouri: Thomson editores. p449.
- Baukh V, Huinink H.P, Adan O, van der Ven L.G.J. (2013). Natural versus accelerated weathering: Understanding water kinetics in bilayer coatings. *Progress in Organic Coatings*. 76(9):1197-1202.
- Bedia E. L, Paglicawan M.A, Bernas C.V, Bernardo S.T, Tosaka M, Kohjiya S. (2003). Natural weathering of polypropylene in a Tropical Zone. *Journal of Applied Polymer Science*. 87:931–8.
- Blaga A (1980). *Durability of Building Materials and Compounds*, ASTM STP 691. ASTM, Philadelphia, In: Sereda PJ, Litvin GG (Eds) pp827–837.
- Bonten C, Berlich R. (2001). *Aging and chemical resistance*. Germany: Carl Hanser Verlag; ISBN 3-446-21697-9.
- Bottino F.A, Cinquegrani A.R, Di Pasquale G, Leonardi L, Pollicino A (2003). Chemical modification, mechanical properties and surface photooxidation of films of polystyrene. *Polymer Testing*. 12:405–411.
- Bottino, F. A., Cinquegrani, A. R., Di Pasquale, G., Leonardi, L., & Pollicino, A. (2004). Chemical modifications, mechanical properties and surface photo-oxidation of films of polystyrene (PS). *Polymer Testing*. 23(4):405-411.

Bowmer, T. N., Cowen, L. K., O'donnell, J. H., & Winzor, D. J. (1979). Degradation of polystyrene by gamma irradiation: Effect of air on the radiation-induced changes in mechanical and molecular properties. *Journal of Applied Polymer Science*. 24(2):425-439.

Brennan L.B., Isaac D.H., Arnold J.C. (2002). Recycling of acrylonitrile–butadiene– styrene and high-impact polystyrene from waste computer equipment. *Journal of Applied Polymer Science*. 86(0):572–578.

Brown M.E (2006). Introduction to thermal analysis: Techniques and applications, *Hot Topics in Thermal Analysis and Calorimetry*, Springer Netherlands p2.

Carraher C.E, Seymour R.B. (2003). 6- Step-Reaction Polymerization or Polycondensation Reactions. Seymour/Carraher's *Polymer Chemistry*, 6th Ed .New York. Marcel Dekker. pp198-199.

Chada, S., & Yan, M. (2008). Self-assembled nanostructures from homopolymer induced by UV and solvent exposure. *Soft Matter*. 4(11):2164-2167.

Chaukura, N., Gwenzi, W., Bunhu, T., Ruziwa, D. T, & Pumure, I. (2016). Potential uses and value-added products derived from waste polystyrene in developing countries: A review. *Resources, Conservation & Recycling*. 107(0):157-165.

Cheremisinoff, N.P (1989). *Handbook of Polymer Science and Technology* Taylor & Francis vol 1. p123.

Compton R.G., Bamford C.H., Tipper C.F.H. (1975). Degradation of polymers, *Comprehensive Chemical Kinetics*, (Vol. 14). Elsevier Science p1.

Dalnoki-Veress, K., Forrest, J. A., Murray, C., Gigault, C., & Dutcher, J. R. (2001). Molecular weight dependence of reductions in the glass transition temperature of thin, freely standing polymer films. *Physical Review E*. 63(3):031801.

Dindar B, Icli S (2001). Unusual photoreactivity of zinc oxide irradiated by concentrated sunlight. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 140:263-268.

Dumitriu, S, Popa, V. (2013). 11- Natural Polymers as Components of Blends for Biomedical Applications. *Polymeric Biomaterials: Structure and Function*. Boca Raton, FL: CRC Press. p310.

Feldman, D. (2002). Polymer weathering: photo-oxidation. *Journal of Polymers and the Environment*. 10(4):163-173.

Francis F.J. (1980). Color quality evaluation of horticultural crops. *Hort Science*. 15:58-59.

Fritscher C. (1994). *International Journal of Materials and Product Technology*. 9(4):482–495.

Gardette J.L., Mailhot, B. J. Lemaire, (1995). *Polymer Degradation and Stability*. 48:457.

George, J., Kumar, R., Sajeevkumar, V.A., Sabapathy, S.N., Vaijapurkar, S.G., Kumar, D., Kchawahha, A., Bawa, A.S., (2007). Effect of γ -irradiation on commercial polypropylene based mono and multi-layered retortable food packaging materials. *Radiation Physics and Chemistry*. 76(7):1205-1212.

Geuskens G, Baeyens-Volant D, Delaunois G, Lu-Vinh Q, Piret W, David C (1978). Polymer photodegradation: mechanisms and experimental methods. *European Polymer Journal*. 14:299–303.

Giles H. F, Wagner J. R, Mount III E. M. (2005). 18 Polymer Overview and Definitions. *Extrusion-The definitive Processing Guide and Handbook*. Norwich, NY: William Andrew Pub. pp165-215.

Guaita M, Chiantore O, Costa L (1985). Changes in degree of polymerization in the thermal degradation of polystyrene. *Polymer Degradation stabilization*. 12(4):135–332.

Guillet J. (1985). *Polymer Photophysics and Photochemistry*. Cambridge University Press p419.

Gupper A, Kazarian S.G (2005). Study of solvent diffusion and solvent induced crystallization syndiotactic polystyrene using FTIR spectroscopy and imaging. *Macromolecules*. 38(6):2327–2332.

Hamid S., Amin M., (1995). Lifetime prediction of polymers. *Journal of Applied Polymer Science*.

55:1385–1394.

Hamid S.H, Amin M.B, Maadhah A.G. (1992). Handbook of polymer degradation. Compounds, ASTM STP 691. ASTM, Philadelphia. USA: Marcel Dekker; pp827–837.

Hill, D. J., Milne, K. A., O'Donnell, J. H., & Pomery, P. J. (1996). A recent advance in the determination of scission and cross-linking yields of gamma-ray irradiated polymers. Series 620. Clough, R.L., Shalaby, S.W. (Eds.). Irradiation of Polymers, Fundamentals and Technological Applications. ACS Symposium, Washington DC, pp74–80.

Horikx, M. M. (1956). Chain scissions in a polymer network. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry. 19(93):445-454.

Horsfall (1982). Factors influencing the daylight photodegradation of Nylon. Text. Res. J., 52:197.

Hummel, D. O. (2012). Atlas of Plastics Additives: Analysis by Spectrometric Methods. Springer Science & Business Media.

Ifegwu, O. C., Anyakora, C., Chigome, S., & Torto, N. (2015). Electrospun nanofiber sorbents for the pre-concentration of urinary 1-hydroxypyrene. Journal of Analytical Science and Technology. 6(1):14.

ILSI (2002). 2. Polystyrene for food packaging applications. Packaging Materials. Brussels, Belgium: International Life Sciences Institute. p19.

Iovino R, Zullo R, Rao M.A, Cassar L, Gianfreda L. (2007). Biodegradation of poly (lactic acid)/starch/coir biocomposites under controlled composting conditions. Polymer Degradation and Stability. 93(1):147-157.

Jacques L. (2000). Accelerated and outdoor/natural exposure testing of coatings. Progress in Polymer Science. 25(9):1337–1362.

Kaboudin B., Khanmohammadi H, Kazemi F. (2017). Polymer supported gold nanoparticles: Synthesis and characterization of functionalized polystyrene-supported gold nanoparticles and

their application in catalytic oxidation of alcohols in water. *Applied Surface Science*. 425(0):400-406.

Kaczmarek H. (1995). Photodegradation of polystyrene and poly (vinyl acetate) blends e II. Irradiation of PS/PVAc blends by fluorescent lamp. *European Polymer Journal*. 31:1175e84.

Kiatkamjornwong S, Sonsuk M, Wittayapichet S, Prasassarakich P, Vejjanukroh P. (1999). Degradation of styrene-g-cassava starch filled polystyrene plastics. *Polymer Degradation and Stability*. 66(3):323-335.

Kockott, D. (1989). Natural and artificial weathering of polymers. *Polymer Degradation and Stability*. 25(2-4):181–208.

Kovacs-Stahl, A. (1995). *Pitture e Vernici*, 71, 13, 11.

Kuzina SI, Mikhailov AI (1993). Plastics and the environment. *European Polymer Journal* 29(12):1549–1589.

La Mantia F.P., Morreale M., Botta L., Mistretta M.C., Ceraulo M., Scaffaro R. (2017). Degradation of polymer blends: A brief review, *Polymer Degradation and Stability*. 145:79-92.

La Mantia, F. P. (1996). Basic Concept on the Recycling of Homogeneous and heterogeneous Plastics. *Recycling of PVC & Mixed Plastic Waste*, ChemTec Publisher, Toronto, pp63-76.

Lawrence, J. B., & Weir, N. A. (1973). Photodecomposition of polystyrene on long-wave ultraviolet irradiation: A possible mechanism of initiation of photooxidation. *Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition*. 11(1):05-118.

Lendlein A., (2010). Shape-memory polymers, *Advances in Polymer Science*, Springer Berlin Heidelberg, pp110.

Leroux F, Meddar L, Mailhot, B., Morlat-Thérias, S., Gardette, J. L (2005). Characterization and photooxidative behaviour of nanocomposites formed with polystyrene and LDHs organo-modified by monomer surfactant. *Polymer*. 46(11):3571-3578.

Li, L., Zhong, Y., Li, J., Chen, C., Zhang, A., Xu, J., & Ma, Z. (2009). Thermally stable and solvent resistant honeycomb structured polystyrene films via photochemical cross-linking. *Journal of Materials Chemistry*. 19(39): 7222-7227.

Lucki, J., & Ranby, B. (1979). Photo-oxidation of polystyrene—Part I. Formation of hydroperoxide groups in photo-oxidised polystyrene and 2-phenyl butane. *Polymer Degradation and Stability*. 1(1):1-16.

Mailhot, B. and Gardette, J.L. (1992). Polystyrene Photooxidation. 1. Identification of the IR-Absorbing Photoproducts Formed at Short and Long Wavelengths. *Macromolecules*. 25:4119-4126.

Marsh, K., Bugusu B. (2007). Food packaging—roles, materials, and environmental issues. *Journal of Food Science*. 72(3):39-55.

Maskan, M. (2001). Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*. 48(2):169-175.

Matar S, Hatch L. F. (2001). 12- Synthetic Petroleum-Based Polymers. *Chemistry of petrochemical processes second*, Boston: Gulf Professional Publishing. pp320-323.

Mathieu E., Laurent J. (1996). Comparison of two instruments for accelerated weathering test on plasticized PVC. *Polymer Degradation and Stability*. 51:77–81.

McGuire R.G. (1992). Reporting of objective color measurements. *Hort Science*. 27(12):1254-1255.

Mcneill, I.C. (1992). Fundamental Aspects of Polymer Degradation. In: Allen, N.S.; Edge, M.; Horie, C.V. (eds.): *Polymers in Conservation*. Cambridge: Royal Society of Chemistry pp14-31.

Meenakshi P, Noorjahan SE, Rajini R, Venkateswarlu U, Crose S (2002). Mechanical and microstructure studies on the modification of CA film by blending with Polystyrene. *Indian Academy of Sciences*. 25(1):25–29.

Mishra, M., Yagci, Y. (1998). Chapter 2. Handbook of radical vinyl polymerization Vol. 73. Boca Raton. CRC Press. p316.

Mittal V. (2011). Thermally stable and flame retardant polymer nanocomposites. Cambridge University Press. p67.

Morales, L. G., & Colino, V. G. (2013). La imagen digital: El valor de lo intangible. ASRI: Arte y sociedad. Revista de investigación. (4):6.

Nicholson, L. M., Whitley, K. S., Gates, T. S., & Hinkley, J. A. (2000). Influence of molecular weight on the mechanical performance of a thermoplastic glassy polyimide. Journal of Materials Science. 35(24):6111-6121.

Nishizaki, H., & Yoshida, K. (1981). Effect of molecular weight on various TGA methods in polystyrene degradation. Journal of Applied Polymer Science. 26(10):3503-3504.

O'Donnell, B., Qayyum, M. M., Tong, L., & White, J. R. (1994). Mechanisms of failure in polymers weathered in an extreme natural environment. Plastics rubber and composites processing and applications. 21(5):297-307.

Otake, Y., T. Kobayashi, H. Asabe, N. Murakami and K. Ono. (1995). Biodegradation of lowdensity polyethylene, polystyrene, polyvinyl chloride, and urea formaldehyde resin buried under soil for over 32 years. Journal of Applied Polymer Science. 56(13):1789-1796.

Pani B (2007). Textbook of environmental chemistry, I.K. New Dehli. International Publishing House. p448.

Park H.M., Lee W.K., Park C.Y., Cho W.J., Ha, C. S. (2003). Environmentally friendly polymer hybrids – Part I – Mechanical, thermal, and barrier properties of thermoplastic starch/clay nanocomposites. Journal of Materials Science. 38(5):909–915.

Pastorelli, G., Cucci, C., Garcia, O., Piantanida, G., Elnaggar, A., Cassar, M., & Strlič, M. (2014). Environmentally induced color change during natural degradation of selected polymers. Polymer Degradation and Stability. 107:198-209.

Peterson, J. D., Vyazovkin, S., & Wight, C. A. (2001). Kinetics of the thermal and thermo-oxidative degradation of polystyrene, polyethylene and poly (propylene). *Macromolecular Chemistry and Physics*. 202(6):775-784.

Pielichowski K., Njuguna J, Rapra. Technology Limited (2005). Thermal degradation of polymeric materials, Rapra Technology, Shawbury, Surrey, UK. p216.

Plastics Europe (2016). *Plastics - the Facts 2016: an Analysis of European Plastics Production, demand and waste data*. Plastics Europe, Belgium. p12.

Plester, D.W. B.SC., A.R.I.C (1973). Effects of radiation sterilization on plastics. United States: Duke Univ Press. Polystyrene. *European Polymer Journal*. 4:9–14.

Potts J.E. (1981). Environmentally Degradable Plastics. In: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 3rd ed., Suppl. Vol., John-Wiley, New York. pp638–668.

Rabek J.F (1987). Mechanism of Photophysical Process and Photochemical Reaction in polymers: Theory and Practical Applications, John Wiley and Sons, New York. p571.

Rabek J.F. and Ranby B., (1974). Polymer photophysics and photochemistry: an introduction to the study of Photoprocess of macromolecules. *Journal Polymer Science. Part A*. 12:273.

Rabie S.T, Ahmed A.E., Sabaa, M.W, El-Ghaffar M.A (2013). Maleic diamides as photostabilizers for polystyrene. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 19(6):1869-1878.

Rabie S.T, Mahran A.M, Kamel E.M, Abdel Hamid N.H (2008). Photodegradation of polystyrene stabilized with uracil derivative. *Journal of Applied Sciences Research*. 4(12):2015–2026.

Ranby B, Rabek J.F (1974). Studies on the photooxidation mechanism of polymers. I. Photolysis and photooxidation of polystyrene. *Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition*. 12(2):273-294.

Ranby B, Rabek JA. (1992). First supplement volume: photodegradation of polymer materials. *Comprehensive polymer science*. Oxford: Pergamon Press. p.272.

Reid B.D (1995). Gamma processing technology: An alternative technology for terminal sterilization of parenterals. *PDA Journal of Pharmaceutical Science and Technology*. 49(2):83-89.

Retting, M. K., & Ah - Hen, K. (2014). El color de los alimentos un criterio de calidad medible. *Agrosur*. 42(2):2-7.

Rizzarelli P., Carroccio S. (2014). Modern mass spectrometry in the characterization and degradation of biodegradable polymers. *Analytica Chimica Acta*. 808(0):18-43.

Roberts, R. J., Rowe, R. C., & York, P. (1991). The relationship between Young's modulus of elasticity of organic solids and their molecular structure. *Powder Technology*. 65(1-3):139-146.

Robertson, G.L. (2006). *Food packaging, principles and practice*. CRC Press. Taylor and Francis Group. Boca Raton, FL. USA.

Şahin T, Sınmazçelik T, Şahin Ş. (2007). The effect of natural weathering on the mechanical, morphological and thermal properties of high impact polystyrene (HIPS), *Materials & Design*. 28(8):2303-2309.

Saitoh A, Amutharani D, Yamamoto Y, Tsujita Y, Yoshimizu H, Okamoto S. (2003). Structure and properties of the mesophase of syndiotactic polystyrene IV. Release of guest molecules from δ form of syndiotactic polystyrene by time resolved FT-IR and WAXD measurement. *Polymer Journal*. 35(11):868–871.

San Andrés M., Chércoles R, De La Roja J.M, Gómez M. (2010). Factores responsables de la degradación química de los polímeros. Efectos provocados por la radiación lumínica sobre algunos materiales utilizados en conservación: primeros resultados. 21 de noviembre del 2010. *Proceedings XI Jornada de Conservación de Arte Contemporáneo (GEIIC)*, Madrid, pp331-338.

Santana R.M.C., Manrich S. (2003). Morphology and mechanical properties of polypropylene/high-impact polystyrene blends from postconsumer plastic waste, *Journal of Applied Polymer Science*. 88:2861–2867.

Sastri V. R. (2013). *Plastics in medical devices: properties, requirements, and applications*.

William Andrew, Oxford, pp 19-31.

Schellenberg, J. and Leder, H.-J. (2006). Syndiotactic polystyrene: Process and applications. *Polymers for Advanced Technologies*. 25:141–151.

Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., & Ahmed, S. (2008). Biological degradation of plastics: a comprehensive review. *Biotechnology Advances*. 26(3):246-265.

Shi, X., Hinderliter, B. R., & Croll, S. G. (2010). Environmental and time dependence of moisture transportation in an epoxy coating and its significance for accelerated weathering. *Journal of Coatings Technology and Research*. 7(4):419-430.

Singh, B., & Sharma, N. (2008). Mechanistic implications of plastic degradation. *Polymer Degradation and Stability*. 93(3):561-584.

Singh, R. P., Vishwa Prasad, A., & Solanky, S. S. (2002). The oxidative degradation of styrenic copolymers: a comparison of photoproducts formation under natural and accelerated conditions. *Journal of Applied Polymer Science*. 85(8):1676-1682.

Speight J.G. (2011). 14-Monomers, Polymers, and Plastics. *Handbook of industrial hydrocarbon processes*. Oxford, UK: Elsevier. p512.

Srivastava H. P, Arthanareeswaran G, Anantharaman N, Starov V.M. (2011). Performance and properties of modified poly (vinylidene fluoride) membranes using general purpose polystyrene (GPPS) by DIPS method. *Desalination*. 283(0):169-177.

Strlic M., Kolar J., (2005). *Ageing and Stabilisation of Paper*. Ljubljana. National and University Library. pp27-47.

Stuart B. (2005). *Infrared spectroscopy*. Hoboken, USA. John Wiley & Sons, Inc. pp14.

Tan, W. T., Radhi, M. M., Ab Rahman, M. Z. B., & Kassim, A. B. (2010). Synthesis and characterization of grafted polystyrene with acrylonitrile using gamma-irradiation. *Applied Sciences*. 10:139-144.

Thompson R.C, Swan S.H, Moore C.J, vom Saal F.S (2009). Our plastic age. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 364:1973–1976.

Torres, J. M., Stafford, C. M., & Vogt, B. D. (2010). Manipulation of the elastic modulus of polymers at the nanoscale: Influence of UV– ozone cross-linking and plasticizer. *ACS nano*. 4(9):5357-5365.

Tsurue, T; Suzuki, S (1981). *Hokkaido Kogyo Kaihatsu Shikensho Hokoku*. 24:136.

UNEP (2009). *Converting waste plastics into resource*. Osaka/Shiga, Japan: Compendium of technologies. Intl. Environment Technology Center.

Vesely R; Kalenda M, (1969). Das Bewitterungsverhalten von Polyacetal. *Kunststoffe*, vol 59, p107.

Vinhas G.M, Souto Maiora R.M, Lapa C.M, Almeida Y.M.B (2003). Degradation studies on plasticized PVC films submitted to gamma radiation. *Materials Research*. 6:497–500.

Waldman, W. R., & De Paoli, M. A. (2008). Photodegradation of polypropylene/polystyrene blends: Styrene–butadiene–styrene compatibilisation effect. *Polymer Degradation and Stability*. 93(1):273-280.

Weir, N. A., & Whiting, K. (1989). Initial steps in the photolysis and photooxidation of polystyrene. *European Polymer Journal*. 25(3):291-295.

Weir, N. A. (1978). New aspect of photodegradation and photooxidation of polystyrene. *European Polymer Journal* 4:9-14.

White, J.R., Shyichuk, A.V., (2007). Macromolecular scission and crosslinking rate changes during polyolefin photo-oxidation. *Polymer Degradation and Stability* 92:1161–1168.

Wunderlich B. (1990). *Thermal Analysis*, Academic Press, New York, USA. pp 123–218.

Wünsch, J. R. (2000). *Polystyrene: Synthesis, production and applications*. Shrewsbury, Shrop

shire, UK. .iSmithers Rapra Publishing. 10 (4):12.

Wypych G. (2008). Handbook of material weathering. 4th Ed. Toronto, Chemtec Publishing.

Yashchuk, O., Portillo, F. S., & Hermida, E. B. (2012). Degradation of polyethylene film samples containing oxo-degradable additives. *Procedia Materials Science*.1:439-445.

Yousif E., Haddad R. (2013). Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review. *Springer Plus*. 2(1):398.

Zhang C, Garrison T. F, Madbouly S. A, Kessler M. R. (2017). Recent Advances in Vegetable Oil-Based Polymers and Their Composites. *Progress in Polymer Science*. 71:91-143.

Zhang, N., Zhou, Y., Zhen, C., Li, Y., Xiong, C., Wang, J., & Nie, Z. (2012). Structural characterization of synthetic polymers using thermal-assisted atmospheric pressure glow discharge mass spectrometry. *Analyst*. 137(21):5051-5056.

Zweifel H. (1998). Stabilization of polymeric materials. Berlin Heidelberg, Springer-Verslag.

ANEXOS

Análisis de Varianza de Propiedades Mecánica

1. Esfuerzo máximo de muestras expuestas a intemperismo natural.

1.1 Evaluación de la dosis de irradiación vs tiempo de exposición.

0 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D0kGy,PS110D0kGy,PS145D0kGy,PS190D0kGy,PS45D0kGy,PS70D0kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=8 MSE=0.4126343 Critical Value=5.1672

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS110D0kGy	2	6.90775	PS190D0kGy, PS145D0kGy, PS70D0kGy, PS45D0kGy, PS0D0kGy
PS190D0kGy	2	11.2365	PS110D0kGy, PS145D0kGy, PS70D0kGy, PS45D0kGy, PS0D0kGy
PS145D0kGy	2	13.7323	PS110D0kGy, PS190D0kGy, PS70D0kGy, PS45D0kGy, PS0D0kGy
PS70D0kGy	2	16.7985	PS110D0kGy, PS190D0kGy, PS145D0kGy, PS45D0kGy, PS0D0kGy
PS45D0kGy	2	30.18785	PS110D0kGy, PS190D0kGy, PS145D0kGy, PS70D0kGy, PS0D0kGy
PS0D0kGy	4	58.72918	PS110D0kGy, PS190D0kGy, PS145D0kGy, PS70D0kGy, PS45D0kGy

10 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D10kGy,PS110D10kGy,PS145D10kGy,PS190D10kGy,PS45D10kGy,PS70D10kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=6 MSE=2.817699 Critical Value=5.6284

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS110D10kGy	2	9.6887	PS70D10kGy, PS45D10kGy, PS0D10kGy
PS190D10kGy	2	12.53905	PS45D10kGy, PS0D10kGy

PS145D10kGy	2	15.58065	PS45D10kGy, PS0D10kGy
PS70D10kGy	2	17.0497	PS110D10kGy, PS45D10kGy, PS0D10kGy
PS45D10kGy	2	34.37535	PS110D10kGy, PS190D10kGy, PS145D10kGy
PS0D10kGy	2	61.68035	PS70D10kGy, PS0D10kGy PS110D10kGy, PS190D10kGy, PS145D10kGy PS70D10kGy, PS45D10kGy

30 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D30kGy,PS110D30kGy,PS145D30kGy,PS190D30kGy,PS45D30kGy,PS70D30kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=8 MSE=0.9616299 Critical Value=5.1672

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS145D30kGy	2	11.4423	PS110D30kGy, PS70D30kGy, PS45D30kGy PS0D30kGy
PS190D30kGy	2	12.1841	PS110D30kGy, PS70D30kGy, PS45D30kGy PS0D30kGy
PS110D30kGy	2	18.00575	PS145D30kGy, PS190D30kGy, PS70D30kGy PS45D30kGy, PS0D30kGy
PS70D30kGy	2	22.5835	PS145D30kGy, PS190D30kGy, PS110D30kGy PS45D30kGy, PS0D30kGy
PS45D30kGy	2	32.42355	PS145D30kGy, PS190D30kGy, PS110D30kGy PS70D30kGy, PS0D30kGy
PS0D30kGy	4	58.92	PS145D30kGy, PS190D30kGy, PS110D30kGy PS70D30kGy, PS45D30kGy

45 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D45kGy,PS110D45kGy,PS145D45kGy,PS190D45kGy,PS45D45kGy,PS7045kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=7 MSE=2.896634 Critical Value=5.3591

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS110D45kGy	2	9.124	PS7045kGy, PS45D45kGy, PS0D45kGy
PS145D45kGy	2	11.6288	PS7045kGy, PS45D45kGy, PS0D45kGy
PS190D45kGy	2	11.65625	PS7045kGy, PS45D45kGy, PS0D45kGy
PS7045kGy	2	18.61095	PS110D45kGy, PS145D45kGy, PS190D45kGy PS45D45kGy, PS0D45kGy
PS45D45kGy	2	30.27515	PS110D45kGy, PS145D45kGy, PS190D45kGy PS7045kGy, PS0D45kGy
PS0D45kGy	3	59.79424	PS110D45kGy, PS145D45kGy, PS190D45kGy PS7045kGy, PS45D45kGy

1.2 Evaluación del periodo de exposición vs dosis de irradiación.

0 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D0kGy,PS0D10kGy,PS0D30kGy,PS0D45kGy

Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=9 MSE=2.647876 Critical Value=4.4149

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0D0kGy	4	58.72918	
PS0D30kGy	4	58.92	
PS0D45kGy	3	59.79424	
PS0D10kGy	2	61.68035	

45 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS45D0kGy,PS45D10kGy,PS45D30kGy,PS45D45kGy

Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=1.270992 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS45D0kGy	2	30.18785	
PS45D45kGy	2	30.27515	
PS45D30kGy	2	32.42355	
PS45D10kGy	2	34.37535	

70 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS7045kGy,PS70D0kGy,PS70D10kGy,PS70D30kGy

Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=0.2945612 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS70D0kGy	2	16.7985	PS70D30kGy
PS70D10kGy	2	17.0497	PS70D30kGy
PS7045kGy	2	18.61095	PS70D30kGy
PS70D30kGy	2	22.5835	PS70D0kGy, PS70D10kGy, PS7045kGy

110 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS110D0kGy,PS110D10kGy,PS110D30kGy,PS110D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=0.2340265 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS110D0kGy	2	6.90775	PS110D45kGy, PS110D10kGy, PS110D30kGy
PS110D45kGy	2	9.124	PS110D0kGy, PS110D30kGy
PS110D10kGy	2	9.6887	PS110D0kGy, PS110D30kGy
PS110D30kGy	2	18.00575	PS110D0kGy, PS110D45kGy, PS110D10kGy

145 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS145D0kGy,PS145D10kGy,PS145D30kGy,PS145D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=1.010028 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS145D30kGy	2	11.4423	PS145D10kGy
PS145D45kGy	2	11.6288	
PS145D0kGy	2	13.7323	
PS145D10kGy	2	15.58065	PS145D30kGy

190 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS190D0kGy,PS190D10kGy,PS190D30kGy,PS190D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=3.276858 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS190D0kGy	2	11.2365	
PS190D45kGy	2	11.65625	
PS190D30kGy	2	12.1841	
PS190D10kGy	2	12.53905	

2. Esfuerzo máximo de muestras expuestas a intemperismo artificial

2.1 Evaluación de la dosis de irradiación vs tiempo de exposición.

0 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H0kGy,PS100H0kGy,PS200H0kGy,PS300H0kGy,PS400H0kGy,PS500H0kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=10 MSE=0.3001264 Critical Value=4.9120

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS500H0kGy	3	13.6359	PS400H0kGy, PS300H0kGy, PS200H0kGy, PS100H0kGy, PS0H0kGy
PS400H0kGy	3	16.26533	PS500H0kGy, PS300H0kGy, PS200H0kGy, PS100H0kGy, PS0H0kGy
PS300H0kGy	2	23.7476	PS500H0kGy, PS400H0kGy, PS200H0kGy, PS100H0kGy, PS0H0kGy
PS200H0kGy	2	33.0829	PS500H0kGy, PS400H0kGy, PS300H0kGy, PS100H0kGy, PS0H0kGy
PS100H0kGy	2	50.3495	PS500H0kGy, PS400H0kGy, PS300H0kGy, PS200H0kGy, PS0H0kGy
PS0H0kGy	4	58.72918	PS500H0kGy, PS400H0kGy, PS300H0kGy, PS200H0kGy, PS100H0kGy

10 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H10kGy,PS100H10kGy,PS200H10kGy,PS300H10kGy,PS400H10kGy,PS500H10kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=7 MSE=1.251125 Critical Value=5.3591

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS400H10kGy	3	11.8049	PS300H10kGy, PS200H10kGy, PS100H10kGy, PS0H10kGy
PS500H10kGy	2	11.98015	PS300H10kGy, PS200H10kGy, PS100H10kGy, PS0H10kGy
PS300H10kGy	2	16.2404	PS400H10kGy, PS500H10kGy, PS200H10kGy, PS100H10kGy, PS0H10kGy
PS200H10kGy	2	25.3475	PS400H10kGy, PS500H10kGy, PS300H10kGy, PS100H10kGy, PS0H10kGy
PS100H10kGy	2	44.795	PS400H10kGy, PS500H10kGy, PS300H10kGy, PS200H10kGy, PS0H10kGy
PS0H10kGy	2	61.68035	PS400H10kGy, PS500H10kGy, PS300H10kGy, PS200H10kGy, PS100H10kGy

30 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H30kGy,PS100H30kGy,PS200H30kGy,PS300H30kGy,PS400H30kGy,PS500H30kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=8 MSE=0.9294384 Critical Value=5.1672

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS500H30kGy	2	12.5188	PS300H30kGy, PS200H30kGy, PS100H30kGy, PS0H30kGy
PS400H30kGy	2	15.2379	PS300H30kGy, PS200H30kGy, PS100H30kGy, PS0H30kGy
PS300H30kGy	2	23.0591	PS500H30kGy, PS400H30kGy, PS200H30kGy, PS100H30kGy, PS0H30kGy
PS200H30kGy	2	34.2353	PS500H30kGy, PS400H30kGy, PS300H30kGy, PS100H30kGy, PS0H30kGy
PS100H30kGy	2	54.02937	PS500H30kGy, PS400H30kGy, PS300H30kGy, PS200H30kGy, PS0H30kGy
PS0H30kGy	4	58.92	PS500H30kGy, PS400H30kGy, PS300H30kGy, PS200H30kGy, PS100H30kGy

45 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H45kGy,PS100H45kGy,PS200H45kGy,PS300H45kGy,PS400H45kGy,PS500H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=9 MSE=1.48937 Critical Value=5.0235

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS500H45kGy	4	13.63195	PS400H45kGy, PS300H45kGy, PS200H45kGy, PS100H45kGy, PS0H45kGy
PS400H45kGy	2	17.85415	PS500H45kGy, PS200H45kGy, PS100H45kGy, PS0H45kGy
PS300H45kGy	2	19.00395	PS500H45kGy, PS200H45kGy, PS100H45kGy, PS0H45kGy
PS200H45kGy	2	25.067	PS500H45kGy, PS400H45kGy, PS300H45kGy, PS100H45kGy, PS0H45kGy
PS100H45kGy	2	52.06235	PS500H45kGy, PS400H45kGy, PS300H45kGy, PS200H45kGy, PS0H45kGy
PS0H45kGy	3	59.79424	PS500H45kGy, PS400H45kGy, PS300H45kGy, PS200H45kGy, PS100H45kGy

2.2 Evaluación del periodo de exposición vs dosis de irradiación

0 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H0kGy,PS0H10kGy,PS0H30kGy,PS0H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=9 MSE=2.647876 Critical Value=4.4149

Group	Count	Mean	Different From Groups
-------	-------	------	-----------------------

PS0H0kGy	4	58.72918
PS0H30kGy	4	58.92
PS0H45kGy	3	59.79424
PS0H10kGy	2	61.68035

100 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS100H0kGy,PS100H10kGy,PS100H30kGy,PS100H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=5.080158E-02 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS100H10kGy	2	44.795	PS100H0kGy, PS100H45kGy, PS100H30kGy
PS100H0kGy	2	50.3495	PS100H10kGy, PS100H45kGy, PS100H30kGy
PS100H45kGy	2	52.06235	PS100H10kGy, PS100H0kGy, PS100H30kGy
PS100H30kGy	2	54.02937	PS100H10kGy, PS100H0kGy, PS100H45kGy

200 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS200H0kGy,PS200H10kGy,PS200H30kGy,PS200H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=0.3849488 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS200H45kGy	2	25.067	PS200H0kGy, PS200H30kGy
PS200H10kGy	2	25.3475	PS200H0kGy, PS200H30kGy
PS200H0kGy	2	33.0829	PS200H45kGy, PS200H10kGy
PS200H30kGy	2	34.2353	PS200H45kGy, PS200H10kGy

300 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS300H0kGy,PS300H10kGy,PS300H30kGy,PS300H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=1.507977 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS300H10kGy	2	16.2404	PS300H30kGy, PS300H0kGy
PS300H45kGy	2	19.00395	
PS300H30kGy	2	23.0591	PS300H10kGy
PS300H0kGy	2	23.7476	PS300H10kGy

400 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS400H0kGy,PS400H10kGy,PS400H30kGy,PS400H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=6 MSE=5.649263E-02 Critical Value=4.8956

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS400H10kGy	3	11.8049	PS400H30kGy, PS400H0kGy, PS400H45kGy
PS400H30kGy	2	15.2379	PS400H10kGy, PS400H0kGy, PS400H45kGy
PS400H0kGy	3	16.26533	PS400H10kGy, PS400H30kGy, PS400H45kGy
PS400H45kGy	2	17.85415	PS400H10kGy, PS400H30kGy, PS400H0kGy

500 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS500H0kGy,PS500H10kGy,PS500H30kGy,PS500H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=7 MSE=9.346119E-02 Critical Value=4.6813

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS500H10kGy	2	11.98015	PS500H45kGy, PS500H0kGy
PS500H30kGy	2	12.5188	PS500H45kGy, PS500H0kGy
PS500H45kGy	4	13.63195	PS500H10kGy, PS500H30kGy
PS500H0kGy	3	13.6359	PS500H10kGy, PS500H30kGy

3. Elongación a la ruptura de muestras expuestas a intemperismo natural.

3.1 Evaluación de la dosis de irradiación vs tiempo de exposición.

0 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D0kGy,PS110D0kGy,PS145D0kGy,PS190D0kGy,PS45D0kGy,PS70D0kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=8 MSE=9.274245E-03 Critical Value=5.1672

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS110D0kGy	2	0.24815	PS45D0kGy, PS0D0kGy
PS145D0kGy	2	0.36627	PS45D0kGy, PS0D0kGy
PS190D0kGy	2	0.37857	PS45D0kGy, PS0D0kGy

PS70D0kGy	2	0.434405	PS45D0kGy, PS0D0kGy
PS45D0kGy	2	1.206575	PS110D0kGy, PS145D0kGy, PS190D0kGy
PS0D0kGy	4	2.229633	PS70D0kGy, PS0D0kGy
			PS110D0kGy, PS145D0kGy, PS190D0kGy
			PS70D0kGy, PS45D0kGy

10 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D10kGy,PS110D10kGy,PS145D10kGy,PS190D10kGy,PS45D10kGy,PS70D10kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=6 MSE=1.076249E-03 Critical Value=5.6284

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS110D10kGy	2	0.24561	PS145D10kGy, PS70D10kGy, PS45D10kGy, PS0D10kGy
PS190D10kGy	2	0.348925	PS45D10kGy, PS0D10kGy
PS145D10kGy	2	0.388035	PS110D10kGy, PS45D10kGy, PS0D10kGy
PS70D10kGy	2	0.43133	PS110D10kGy, PS45D10kGy, PS0D10kGy
PS45D10kGy	2	0.85627	PS110D10kGy, PS190D10kGy, PS145D10kGy, PS70D10kGy, PS0D10kGy
PS0D10kGy	2	2.30955	PS110D10kGy, PS190D10kGy, PS145D10kGy, PS70D10kGy, PS45D10kGy

30 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D30kGy,PS110D30kGy,PS145D30kGy,PS190D30kGy,PS45D30kGy,PS70D30kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=8 MSE=2.709299E-03 Critical Value=5.1672

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS190D30kGy	2	0.284845	PS110D30kGy, PS70D30kGy, PS45D30kGy, PS0D30kGy
PS145D30kGy	2	0.34708	PS110D30kGy, PS70D30kGy, PS45D30kGy, PS0D30kGy
PS110D30kGy	2	0.54534	PS190D30kGy, PS145D30kGy, PS45D30kGy, PS0D30kGy
PS70D30kGy	2	0.577445	PS190D30kGy, PS145D30kGy, PS45D30kGy, PS0D30kGy
PS45D30kGy	2	0.8022	PS190D30kGy, PS145D30kGy, PS110D30kGy, PS70D30kGy, PS0D30kGy
PS0D30kGy	4	2.189573	PS190D30kGy, PS145D30kGy, PS110D30kGy, PS70D30kGy, PS45D30kGy

45 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D45kGy,PS110D45kGy,PS145D45kGy,PS190D45kGy,PS45D45kGy,PS7045kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=7 MSE=1.524433E-03 Critical Value=5.3591

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS190D45kGy	2	0.300215	PS45D45kGy, PS0D45kGy
PS110D45kGy	2	0.32088	PS45D45kGy, PS0D45kGy
PS145D45kGy	2	0.375615	PS45D45kGy, PS0D45kGy
PS7045kGy	2	0.436245	PS45D45kGy, PS0D45kGy
PS45D45kGy	2	0.745945	PS190D45kGy, PS110D45kGy, PS145D45kGy PS7045kGy, PS0D45kGy
PS0D45kGy	3	2.126127	PS190D45kGy, PS110D45kGy, PS145D45kGy PS7045kGy, PS45D45kGy

3.2 Evaluación del periodo de exposición vs dosis de irradiación

0 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D0kGy,PS0D10kGy,PS0D30kGy,PS0D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=9 MSE=9.595565E-03 Critical Value=4.4149

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0D45kGy	3	2.126127	
PS0D30kGy	4	2.189573	
PS0D0kGy	4	2.229633	
PS0D10kGy	2	2.30955	

45 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS45D0kGy,PS45D10kGy,PS45D30kGy,PS45D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=3.389887E-03 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS45D45kGy	2	0.745945	PS45D0kGy
PS45D30kGy	2	0.8022	PS45D0kGy
PS45D10kGy	2	0.85627	PS45D0kGy
PS45D0kGy	2	1.206575	PS45D45kGy, PS45D30kGy, PS45D10kGy

70 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS7045kGy,PS70D0kGy,PS70D10kGy,PS70D30kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=1.041728E-03 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS70D10kGy	2	0.43133	PS70D30kGy
PS70D0kGy	2	0.434405	PS70D30kGy
PS7045kGy	2	0.436245	PS70D30kGy
PS70D30kGy	2	0.577445	PS70D10kGy, PS70D0kGy, PS7045kGy

110 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS110D0kGy,PS110D10kGy,PS110D30kGy,PS110D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=1.28773E-03 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS110D10kGy	2	0.24561	PS110D30kGy
PS110D0kGy	2	0.24815	PS110D30kGy
PS110D45kGy	2	0.32088	PS110D30kGy
PS110D30kGy	2	0.54534	PS110D10kGy, PS110D0kGy, PS110D45kGy

145 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS145D0kGy,PS145D10kGy,PS145D30kGy,PS145D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=2.62542E-04 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS145D30kGy	2	0.34708	
PS145D0kGy	2	0.36627	
PS145D45kGy	2	0.375615	
PS145D10kGy	2	0.388035	

190 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS190D0kGy,PS190D10kGy,PS190D30kGy,PS190D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=6.773134E-04 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS190D30kGy	2	0.284845	
PS190D45kGy	2	0.300215	
PS190D10kGy	2	0.348925	
PS190D0kGy	2	0.37857	

4. Elongación a la ruptura de muestras expuestas a intemperismo artificial.

4.1 Evaluación de la dosis de irradiación vs tiempo de exposición.

0 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H0kGy,PS100H0kGy,PS200H0kGy,PS300H0kGy,PS400H0kGy,PS500H0kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=10 MSE=7.047003E-03 Critical Value=4.9120

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS500H0kGy	3	0.3676333	PS200H0kGy, PS100H0kGy, PS0H0kGy
PS400H0kGy	3	0.389	PS200H0kGy, PS100H0kGy, PS0H0kGy
PS300H0kGy	2	0.56225	PS100H0kGy, PS0H0kGy
PS200H0kGy	2	0.7496	PS500H0kGy, PS400H0kGy, PS100H0kGy, PS0H0kGy
PS100H0kGy	2	1.405804	PS500H0kGy, PS400H0kGy, PS300H0kGy, PS200H0kGy, PS0H0kGy
PS0H0kGy	4	2.229633	PS500H0kGy, PS400H0kGy, PS300H0kGy, PS200H0kGy, PS100H0kGy

10 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H10kGy,PS100H10kGy,PS200H10kGy,PS300H10kGy,PS400H10kGy,PS500H10kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=7 MSE=0.0015158 Critical Value=5.3591

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS500H10kGy	2	0.28825	PS300H10kGy, PS200H10kGy, PS100H10kGy, PS0H10kGy
PS400H10kGy	3	0.3042333	PS300H10kGy, PS200H10kGy, PS100H10kGy, PS0H10kGy
PS300H10kGy	2	0.53955	PS500H10kGy, PS400H10kGy, PS100H10kGy, PS0H10kGy

PS200H10kGy	2	0.56065	PS500H10kGy, PS400H10kGy, PS100H10kGy, PS0H10kGy
PS100H10kGy	2	1.8565	PS500H10kGy, PS400H10kGy, PS300H10kGy, PS200H10kGy, PS0H10kGy
PS0H10kGy	2	2.30955	PS500H10kGy, PS400H10kGy, PS300H10kGy, PS200H10kGy, PS100H10kGy

30 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H30kGy,PS100H30kGy,PS200H30kGy,PS300H30kGy,PS400H30kGy,PS500H30kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=8 MSE=1.560333E-03 Critical Value=5.1672

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS400H30kGy	2	0.3564	PS300H30kGy, PS200H30kGy, PS100H30kGy, PS0H30kGy
PS500H30kGy	2	0.3566	PS300H30kGy, PS200H30kGy, PS100H30kGy, PS0H30kGy
PS300H30kGy	2	0.57595	PS400H30kGy, PS500H30kGy, PS200H30kGy, PS100H30kGy, PS0H30kGy
PS200H30kGy	2	0.78685	PS400H30kGy, PS500H30kGy, PS300H30kGy, PS100H30kGy, PS0H30kGy
PS100H30kGy	2	1.350702	PS400H30kGy, PS500H30kGy, PS300H30kGy, PS200H30kGy, PS0H30kGy
PS0H30kGy	4	2.189573	PS400H30kGy, PS500H30kGy, PS300H30kGy, PS200H30kGy, PS100H30kGy

45 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H45kGy,PS100H45kGy,PS200H45kGy,PS300H45kGy,PS400H45kGy,PS500H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=9 MSE=1.482101E-03 Critical Value=5.0235

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS500H45kGy	4	0.336325	PS400H45kGy, PS300H45kGy, PS200H45kGy, PS100H45kGy, PS0H45kGy
PS400H45kGy	2	0.46925	PS500H45kGy, PS100H45kGy, PS0H45kGy
PS300H45kGy	2	0.4833	PS500H45kGy, PS100H45kGy, PS0H45kGy
PS200H45kGy	2	0.5699	PS500H45kGy, PS100H45kGy, PS0H45kGy
PS100H45kGy	2	1.533224	PS500H45kGy, PS400H45kGy, PS300H45kGy, PS200H45kGy, PS0H45kGy
PS0H45kGy	3	2.126127	PS500H45kGy, PS400H45kGy, PS300H45kGy, PS200H45kGy, PS100H45kGy

4.2 Evaluación del periodo de exposición vs dosis de irradiación.

0 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H0kGy,PS0H10kGy,PS0H30kGy,PS0H45kGy

Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=9 MSE=9.595565E-03 Critical Value=4.4149

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0H45kGy	3	2.126127	
PS0H30kGy	4	2.189573	
PS0H0kGy	4	2.229633	
PS0H10kGy	2	2.30955	

100 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS100H0kGy,PS100H10kGy,PS100H30kGy,PS100H45kGy

Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=2.245432E-03 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS100H30kGy	2	1.350702	PS100H10kGy
PS100H0kGy	2	1.405804	PS100H10kGy
PS100H45kGy	2	1.533224	PS100H10kGy
PS100H10kGy	2	1.8565	PS100H30kGy, PS100H0kGy, PS100H45kGy

200 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS200H0kGy,PS200H10kGy,PS200H30kGy,PS200H45kGy

Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=1.540825E-04 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS200H10kGy	2	0.56065	PS200H0kGy, PS200H30kGy
PS200H45kGy	2	0.5699	PS200H0kGy, PS200H30kGy
PS200H0kGy	2	0.7496	PS200H10kGy, PS200H45kGy
PS200H30kGy	2	0.78685	PS200H10kGy, PS200H45kGy

300 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS300H0kGy,PS300H10kGy,PS300H30kGy,PS300H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=9.675038E-04 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS300H45kGy	2	0.4833	
PS300H10kGy	2	0.53955	
PS300H0kGy	2	0.56225	
PS300H30kGy	2	0.57595	

400 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS400H0kGy,PS400H10kGy,PS400H30kGy,PS400H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=6 MSE=6.071053E-04 Critical Value=4.8956

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS400H10kGy	3	0.3042333	PS400H0kGy, PS400H45kGy
PS400H30kGy	2	0.3564	PS400H45kGy
PS400H0kGy	3	0.389	PS400H10kGy, PS400H45kGy
PS400H45kGy	2	0.46925	PS400H10kGy, PS400H30kGy, PS400H0kGy

500 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS500H0kGy,PS500H10kGy,PS500H30kGy,PS500H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=7 MSE=4.902027E-04 Critical Value=4.6813

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS500H10kGy	2	0.28825	PS500H0kGy
PS500H45kGy	4	0.336325	
PS500H30kGy	2	0.3566	
PS500H0kGy	3	0.3676333	PS500H10kGy

5. Módulo de elasticidad de muestras expuestas a intemperismo natural.

5.1 Evaluación de la dosis de irradiación vs tiempo de exposición.

0 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D0kGy,PS110D0kGy,PS145D0kGy,PS190D0kGy,PS45D0kGy,PS70D0kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=8 MSE=22741.95 Critical Value=5.1672

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS45D0kGy	2	3231.7	PS0D0kGy, PS145D0kGy, PS70D0kGy
PS190D0kGy	2	3374.3	PS145D0kGy, PS70D0kGy
PS110D0kGy	2	3523.25	PS145D0kGy, PS70D0kGy
PS0D0kGy	4	3791.775	PS45D0kGy
PS145D0kGy	2	4154.45	PS45D0kGy, PS190D0kGy, PS110D0kGy
PS70D0kGy	2	4176.05	PS45D0kGy, PS190D0kGy, PS110D0kGy

10 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D10kGy,PS110D10kGy,PS145D10kGy,PS190D10kGy,PS45D10kGy,PS70D10kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=6 MSE=267675.8 Critical Value=5.6284

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0D10kGy	2	3831.8	
PS190D10kGy	2	4101.85	
PS70D10kGy	2	4314.7	
PS110D10kGy	2	4461.05	
PS45D10kGy	2	4542.7	
PS145D10kGy	2	4574.25	

30 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D30kGy,PS110D30kGy,PS145D30kGy,PS190D30kGy,PS45D30kGy,PS70D30kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=8 MSE=30667.44 Critical Value=5.1672

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS110D30kGy	2	3417.55	PS45D30kGy, PS70D30kGy, PS190D30kGy
PS0D30kGy	4	3767.7	PS45D30kGy, PS70D30kGy, PS190D30kGy
PS145D30kGy	2	3781.05	PS45D30kGy, PS70D30kGy, PS190D30kGy

PS45D30kGy	2	4500.95	PS110D30kGy, PS0D30kGy, PS145D30kGy PS190D30kGy
PS70D30kGy	2	4520.65	PS110D30kGy, PS0D30kGy, PS145D30kGy PS190D30kGy
PS190D30kGy	2	5160.75	PS110D30kGy, PS0D30kGy, PS145D30kGy PS45D30kGy, PS70D30kGy

45 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D45kGy,PS110D45kGy,PS145D45kGy,PS190D45kGy,PS45D45kGy,PS7045kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=7 MSE=51534.4 Critical Value=5.3591

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS110D45kGy	2	2962.05	PS0D45kGy, PS45D45kGy, PS190D45kGy PS7045kGy
PS145D45kGy	2	3552.05	PS190D45kGy, PS7045kGy
PS0D45kGy	3	3827.233	PS110D45kGy
PS45D45kGy	2	4384.05	PS110D45kGy
PS190D45kGy	2	4443.85	PS110D45kGy, PS145D45kGy
PS7045kGy	2	4541.95	PS110D45kGy, PS145D45kGy

5.2 Evaluación del periodo de exposición vs dosis de irradiación.

0 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D0kGy,PS0D10kGy,PS0D30kGy,PS0D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=9 MSE=5951.164 Critical Value=4.4149

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0D30kGy	4	3767.7	
PS0D0kGy	4	3791.775	
PS0D45kGy	3	3827.233	
PS0D10kGy	2	3831.8	

45 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS45D0kGy,PS45D10kGy,PS45D30kGy,PS45D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=44396.87 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS45D0kGy	2	3231.7	PS45D45kGy, PS45D30kGy, PS45D10kGy
PS45D45kGy	2	4384.05	PS45D0kGy
PS45D30kGy	2	4500.95	PS45D0kGy
PS45D10kGy	2	4542.7	PS45D0kGy

70 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS7045kGy,PS70D0kGy,PS70D10kGy,PS70D30kGy

Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=24753.48 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS70D0kGy	2	4176.05	
PS70D10kGy	2	4314.7	
PS70D30kGy	2	4520.65	
PS7045kGy	2	4541.95	

110 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS110D0kGy,PS110D10kGy,PS110D30kGy,PS110D45kGy

Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=93991.97 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS110D45kGy	2	2962.05	PS110D10kGy
PS110D30kGy	2	3417.55	
PS110D0kGy	2	3523.25	
PS110D10kGy	2	4461.05	PS110D45kGy

145 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS145D0kGy,PS145D10kGy,PS145D30kGy,PS145D45kGy

Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=36648.7 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS145D45kGy	2	3552.05	PS145D10kGy
PS145D30kGv	2	3781.05	PS145D10kGv

PS145D0kGy	2	4154.45	
PS145D10kGy	2	4574.25	PS145D45kGy, PS145D30kGy

190 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS190D0kGy,PS190D10kGy,PS190D30kGy,PS190D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=385336.5 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS190D0kGy	2	3374.3	
PS190D10kGy	2	4101.85	
PS190D45kGy	2	4443.85	
PS190D30kGy	2	5160.75	

6. Módulo de elasticidad de muestras expuestas a intemperismo artificial.

6.1 Evaluación de la dosis de irradiación vs tiempo de exposición.

0 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H0kGy,PS100H0kGy,PS200H0kGy,PS300H0kGy,PS400H0kGy,PS500H0kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=10 MSE=29915.63 Critical Value=4.9120

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS500H0kGy	3	3634.467	PS400H0kGy, PS100H0kGy, PS200H0kGy, PS300H0kGy
PS0H0kGy	4	3791.775	PS400H0kGy, PS100H0kGy, PS200H0kGy, PS300H0kGy
PS400H0kGy	3	4413.9	PS500H0kGy, PS0H0kGy
PS100H0kGy	2	4612.3	PS500H0kGy, PS0H0kGy
PS200H0kGy	2	4718.95	PS500H0kGy, PS0H0kGy
PS300H0kGy	2	4810.3	PS500H0kGy, PS0H0kGy

10 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H10kGy,PS100H10kGy,PS200H10kGy,PS300H10kGy,PS400H10kGy,PS500H10kGy
 Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=7 MSE=40287.38 Critical Value=5.3591

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS300H10kGy	2	3653.2	PS100H10kGy, PS500H10kGy, PS200H10kGy
PS0H10kGy	2	3831.8	PS200H10kGy
PS400H10kGy	3	4301.9	
PS100H10kGy	2	4437.65	PS300H10kGy
PS500H10kGy	2	4464.25	PS300H10kGy
PS200H10kGy	2	4770	PS300H10kGy, PS0H10kGy

30 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H30kGy,PS100H30kGy,PS200H30kGy,PS300H30kGy,PS400H30kGy,PS500H30kGy
 Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=8 MSE=67077.3 Critical Value=5.1672

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS500H30kGy	2	3603.5	PS100H30kGy, PS200H30kGy
PS0H30kGy	4	3767.7	PS100H30kGy, PS200H30kGy
PS400H30kGy	2	4260.7	
PS300H30kGy	2	4385.7	
PS100H30kGy	2	4677.65	PS500H30kGy, PS0H30kGy
PS200H30kGy	2	4723.4	PS500H30kGy, PS0H30kGy

45 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H45kGy,PS100H45kGy,PS200H45kGy,PS300H45kGy,PS400H45kGy,PS500H45kGy
 Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=9 MSE=58188.34 Critical Value=5.0235

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0H45kGy	3	3827.233	PS200H45kGy
PS500H45kGy	4	4088.575	
PS100H45kGy	2	4256.7	
PS300H45kGy	2	4271.75	
PS400H45kGy	2	4374.85	
PS200H45kGy	2	4715.25	PS0H45kGy

6.2 Evaluación del periodo de exposición vs dosis de irradiación.

0 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H0kGy,PS0H10kGy,PS0H30kGy,PS0H45kGy

Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=9 MSE=5951.164 Critical Value=4.4149

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0H30kGy	4	3767.7	
PS0H0kGy	4	3791.775	
PS0H45kGy	3	3827.233	
PS0H10kGy	2	3831.8	

100 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS100H0kGy,PS100H10kGy,PS100H30kGy,PS100H45kGy

Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=75456.41 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS100H45kGy	2	4256.7	
PS100H10kGy	2	4437.65	
PS100H0kGy	2	4612.3	
PS100H30kGy	2	4677.65	

200 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS200H0kGy,PS200H10kGy,PS200H30kGy,PS200H45kGy

Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=9720.923 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS200H45kGy	2	4715.25	
PS200H0kGy	2	4718.95	
PS200H30kGy	2	4723.4	
PS200H10kGy	2	4770	

300 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS300H0kGy,PS300H10kGy,PS300H30kGy,PS300H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=4 MSE=92655.34 Critical Value=5.7569

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS300H10kGy	2	3653.2	
PS300H45kGy	2	4271.75	
PS300H30kGy	2	4385.7	
PS300H0kGy	2	4810.3	

400 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS400H0kGy,PS400H10kGy,PS400H30kGy,PS400H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=6 MSE=62609.23 Critical Value=4.8956

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS400H30kGy	2	4260.7	
PS400H10kGy	3	4301.9	
PS400H45kGy	2	4374.85	
PS400H0kGy	3	4413.9	

500 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS500H0kGy,PS500H10kGy,PS500H30kGy,PS500H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=7 MSE=71562.13 Critical Value=4.6813

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS500H30kGy	2	3603.5	
PS500H0kGy	3	3634.467	PS500H10kGy
PS500H45kGy	4	4088.575	
PS500H10kGy	2	4464.25	PS500H0kGy

Análisis de Varianza de color

7. Parámetro C* de muestras expuestas a intemperismo natural.

7.1 Evaluación de la dosis de irradiación vs tiempo de exposición.

0 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D0kGy,PS110D0kGy,PS145D0kGy,PS190D0kGy,PS45D0kGy,PS70D0kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=1.387961 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0D0kGy	5	1.437325	PS45D0kGy, PS70D0kGy, PS110D0kGy, PS145D0kGy, PS190D0kGy
PS45D0kGy	5	12.32984	PS0D0kGy, PS70D0kGy, PS110D0kGy, PS145D0kGy, PS190D0kGy
PS70D0kGy	5	21.18021	PS0D0kGy, PS45D0kGy, PS110D0kGy, PS145D0kGy, PS190D0kGy
PS110D0kGy	5	25.56347	PS0D0kGy, PS45D0kGy, PS70D0kGy, PS145D0kGy, PS190D0kGy
PS145D0kGy	5	28.28908	PS0D0kGy, PS45D0kGy, PS70D0kGy, PS110D0kGy, PS190D0kGy
PS190D0kGy	5	31.45626	PS0D0kGy, PS45D0kGy, PS70D0kGy, PS110D0kGy, PS145D0kGy

10 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D10kGy,PS110D10kGy,PS145D10kGy,PS190D10kGy,PS45D10kGy,PS70D10kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=0.8347955 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0D10kGy	5	1.816243	PS45D10kGy, PS70D10kGy, PS110D10kGy, PS145D10kGy, PS190D10kGy
PS45D10kGy	5	13.08934	PS0D10kGy, PS70D10kGy, PS110D10kGy, PS145D10kGy, PS190D10kGy
PS70D10kGy	5	21.84153	PS0D10kGy, PS45D10kGy, PS110D10kGy, PS145D10kGy, PS190D10kGy
PS110D10kGy	5	25.1254	PS0D10kGy, PS45D10kGy, PS70D10kGy, PS145D10kGy, PS190D10kGy
PS145D10kGy	5	28.63565	PS0D10kGy, PS45D10kGy, PS70D10kGy, PS110D10kGy, PS190D10kGy
PS190D10kGy	5	30.3277	PS0D10kGy, PS45D10kGy, PS70D10kGy, PS110D10kGy

30 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D30kGy,PS110D30kGy,PS145D30kGy,PS190D30kGy,PS45D30kGy,PS70D30kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=2.046574 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0D30kGy	5	2.034471	PS45D30kGy, PS70D30kGy, PS145D30kGy, PS110D30kGy, PS190D30kGy
PS45D30kGy	5	11.77656	PS0D30kGy, PS70D30kGy, PS145D30kGy, PS110D30kGy, PS190D30kGy
PS70D30kGy	5	20.42426	PS0D30kGy, PS45D30kGy, PS145D30kGy, PS110D30kGy, PS190D30kGy
PS145D30kGy	5	25.631	PS0D30kGy, PS45D30kGy, PS70D30kGy, PS190D30kGy
PS110D30kGy	5	27.12045	PS0D30kGy, PS45D30kGy, PS70D30kGy
PS190D30kGy	5	28.55624	PS0D30kGy, PS45D30kGy, PS70D30kGy, PS145D30kGy

45 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D45kGy,PS110D45kGy,PS145D45kGy,PS190D45kGy,PS45D45kGy,PS7045kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=1.779613 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0D45kGy	5	2.015035	PS45D45kGy, PS7045kGy, PS110D45kGy, PS145D45kGy, PS190D45kGy
PS45D45kGy	5	10.72372	PS0D45kGy, PS7045kGy, PS110D45kGy, PS145D45kGy, PS190D45kGy
PS7045kGy	5	19.35088	PS0D45kGy, PS45D45kGy, PS110D45kGy, PS145D45kGy, PS190D45kGy
PS110D45kGy	5	25.89491	PS0D45kGy, PS45D45kGy, PS7045kGy
PS145D45kGy	5	27.22492	PS0D45kGy, PS45D45kGy, PS7045kGy
PS190D45kGy	5	28.4978	PS0D45kGy, PS45D45kGy, PS7045kGy

7.2 Evaluación del periodo de exposición vs dosis de irradiación.

0 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D0kGy,PS0D10kGy,PS0D30kGy,PS0D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=3.958184E-02 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0D0kGy	5	1.437325	PS0D10kGy, PS0D45kGy, PS0D30kGy
PS0D10kGy	5	1.816243	PS0D0kGy
PS0D45kGy	5	2.015035	PS0D0kGy
PS0D30kGy	5	2.034471	PS0D0kGy

45 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS45D0kGy,PS45D10kGy,PS45D30kGy,PS45D45kGy

Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=0.3539259 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS45D45kGy	5	10.72372	PS45D0kGy, PS45D10kGy
PS45D30kGy	5	11.77656	PS45D10kGy
PS45D0kGy	5	12.32984	PS45D45kGy
PS45D10kGy	5	13.08934	PS45D45kGy, PS45D30kGy

70 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS7045kGy,PS70D0kGy,PS70D10kGy,PS70D30kGy

Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=2.361818 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS7045kGy	5	19.35088	
PS70D30kGy	5	20.42426	
PS70D0kGy	5	21.18021	
PS70D10kGy	5	21.84153	

110 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS110D0kGy,PS110D10kGy,PS110D30kGy,PS110D45kGy

Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=1.528616 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS110D10kGy	5	25.1254	
PS110D0kGy	5	25.56347	
PS110D45kGy	5	25.89491	

PS110D30kGy 5 27.12045

145 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS145D0kGy,PS145D10kGy,PS145D30kGy,PS145D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=2.569595 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS145D30kGy	5	25.631	PS145D10kGy
PS145D45kGy	5	27.22492	
PS145D0kGy	5	28.28908	
PS145D10kGy	5	28.63565	PS145D30kGy

190 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS190D0kGy,PS190D10kGy,PS190D30kGy,PS190D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=2.21988 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS190D45kGy	5	28.4978	PS190D0kGy
PS190D30kGy	5	28.55624	PS190D0kGy
PS190D10kGy	5	30.3277	
PS190D0kGy	5	31.45626	PS190D45kGy, PS190D30kGy

8. Parámetro C* de muestras expuestas a intemperismo artificial.

8.1 Evaluación de la dosis de irradiación vs tiempo de exposición.

0 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H0kGy,PS100H0kGy,PS200H0kGy,PS300H0kGy,PS400H0kGy,PS500H0kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=4.641224E-02 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0H0kGy	5	1.437325	PS100H0kGy, PS200H0kGy, PS300H0kGy, PS400H0kGy, PS500H0kGy
PS100H0kGy	5	11.32839	PS0H0kGy, PS200H0kGy, PS300H0kGy, PS400H0kGy, PS500H0kGy
PS200H0kGy	5	15.6944	PS0H0kGy, PS100H0kGy, PS300H0kGy, PS400H0kGy, PS500H0kGy
PS300H0kGy	5	21.09087	PS0H0kGy, PS100H0kGy, PS200H0kGy, PS400H0kGy, PS500H0kGy
PS400H0kGy	5	26.08514	PS0H0kGy, PS100H0kGy, PS200H0kGy, PS300H0kGy, PS500H0kGy
PS500H0kGy	5	32.7947	PS0H0kGy, PS100H0kGy, PS200H0kGy, PS300H0kGy, PS400H0kGy

10 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H10kGy,PS100H10kGy,PS200H10kGy,PS300H10kGy,PS400H10kGy,PS500H10kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=3.940813E-02 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0H10kGy	5	1.816243	PS100H10kGy, PS200H10kGy, PS300H10kGy, PS400H10kGy, PS500H10kGy
PS100H10kGy	5	12.20478	PS0H10kGy, PS200H10kGy, PS300H10kGy, PS400H10kGy, PS500H10kGy
PS200H10kGy	5	16.39884	PS0H10kGy, PS100H10kGy, PS300H10kGy, PS400H10kGy, PS500H10kGy
PS300H10kGy	5	20.98202	PS0H10kGy, PS100H10kGy, PS200H10kGy, PS400H10kGy, PS500H10kGy
PS400H10kGy	5	27.55659	PS0H10kGy, PS100H10kGy, PS200H10kGy, PS300H10kGy, PS500H10kGy
PS500H10kGy	5	30.75728	PS0H10kGy, PS100H10kGy, PS200H10kGy, PS300H10kGy, PS400H10kGy

30 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H30kGy,PS100H30kGy,PS200H30kGy,PS300H30kGy,PS400H30kGy,PS500H30kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=0.0358534 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0H30kGy	5	2.034471	PS100H30kGy, PS200H30kGy, PS300H30kGy, PS400H30kGy, PS500H30kGy
PS100H30kGy	5	12.45097	PS0H30kGy, PS200H30kGy, PS300H30kGy, PS400H30kGy, PS500H30kGy

PS200H30kGy	5	15.78777	PS0H30kGy, PS100H30kGy, PS300H30kGy PS400H30kGy, PS500H30kGy
PS300H30kGy	5	18.29032	PS0H30kGy, PS100H30kGy, PS200H30kGy PS400H30kGy, PS500H30kGy
PS400H30kGy	5	23.6343	PS0H30kGy, PS100H30kGy, PS200H30kGy PS300H30kGy, PS500H30kGy
PS500H30kGy	5	32.49629	PS0H30kGy, PS100H30kGy, PS200H30kGy PS300H30kGy, PS400H30kGy

45 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H45kGy,PS100H45kGy,PS200H45kGy,PS300H45kGy,PS400H45kGy,PS500H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=2.374836E-02 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0H45kGy	5	2.015035	PS100H45kGy, PS200H45kGy, PS300H45kGy PS400H45kGy, PS500H45kGy
PS100H45kGy	5	12.26453	PS0H45kGy, PS200H45kGy, PS300H45kGy PS400H45kGy, PS500H45kGy
PS200H45kGy	5	17.40939	PS0H45kGy, PS100H45kGy, PS300H45kGy PS400H45kGy, PS500H45kGy
PS300H45kGy	5	21.62455	PS0H45kGy, PS100H45kGy, PS200H45kGy PS400H45kGy, PS500H45kGy
PS400H45kGy	5	27.70642	PS0H45kGy, PS100H45kGy, PS200H45kGy PS300H45kGy, PS500H45kGy
PS500H45kGy	5	35.09697	PS0H45kGy, PS100H45kGy, PS200H45kGy PS300H45kGy, PS400H45kGy

8.2 Evaluación del periodo de exposición vs dosis de irradiación.

0 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H0kGy,PS0H10kGy,PS0H30kGy,PS0H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=3.958184E-02 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0H0kGy	5	1.437325	PS0H10kGy, PS0H45kGy, PS0H30kGy
PS0H10kGy	5	1.816243	PS0H0kGy
PS0H45kGy	5	2.015035	PS0H0kGy
PS0H30kGy	5	2.034471	PS0H0kGy

100 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS100H0kGy,PS100H10kGy,PS100H30kGy,PS100H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=1.689814E-02 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS100H0kGy	5	11.32839	PS100H10kGy, PS100H45kGy, PS100H30kGy
PS100H10kGy	5	12.20478	PS100H0kGy, PS100H30kGy
PS100H45kGy	5	12.26453	PS100H0kGy
PS100H30kGy	5	12.45097	PS100H0kGy, PS100H10kGy

200 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS200H0kGy,PS200H10kGy,PS200H30kGy,PS200H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=2.186183E-02 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS200H0kGy	5	15.6944	PS200H10kGy, PS200H45kGy
PS200H30kGy	5	15.78777	PS200H10kGy, PS200H45kGy
PS200H10kGy	5	16.39884	PS200H0kGy, PS200H30kGy, PS200H45kGy
PS200H45kGy	5	17.40939	PS200H0kGy, PS200H30kGy, PS200H10kGy

300 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS300H0kGy,PS300H10kGy,PS300H30kGy,PS300H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=1.631115E-02 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS300H30kGy	5	18.29032	PS300H10kGy, PS300H0kGy, PS300H45kGy
PS300H10kGy	5	20.98202	PS300H30kGy, PS300H45kGy
PS300H0kGy	5	21.09087	PS300H30kGy, PS300H45kGy
PS300H45kGy	5	21.62455	PS300H30kGy, PS300H10kGy, PS300H0kGy

400 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS400H0kGy,PS400H10kGy,PS400H30kGy,PS400H45kGy
 Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=7.971005E-02 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS400H30kGy	5	23.6343	PS400H0kGy, PS400H10kGy, PS400H45kGy
PS400H0kGy	5	26.08514	PS400H30kGy, PS400H10kGy, PS400H45kGy
PS400H10kGy	5	27.55659	PS400H30kGy, PS400H0kGy
PS400H45kGy	5	27.70642	PS400H30kGy, PS400H0kGy

500 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS500H0kGy,PS500H10kGy,PS500H30kGy,PS500H45kGy
 Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=4.377018E-02 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS500H10kGy	5	30.75728	PS500H30kGy, PS500H0kGy, PS500H45kGy
PS500H30kGy	5	32.49629	PS500H10kGy, PS500H45kGy
PS500H0kGy	5	32.7947	PS500H10kGy, PS500H45kGy
PS500H45kGy	5	35.09697	PS500H10kGy, PS500H30kGy, PS500H0kGy

9. Parámetro h° de muestras expuestas a intemperismo natural.

9.1 Evaluación de la dosis de irradiación vs tiempo de exposición.

0 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D0kGy,PS110D0kGy,PS145D0kGy,PS190D0kGy,PS45D0kGy,PS70D0kGy
 Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=7.568797 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS190D0kGy	5	-88.58595	PS45D0kGy, PS0D0kGy
PS145D0kGy	5	-85.20812	PS0D0kGy
PS70D0kGy	5	-83.61192	PS0D0kGy
PS110D0kGy	5	-83.57704	PS0D0kGy

PS45D0kGy	5	-81.20847	PS190D0kGy, PS0D0kGy
PS0D0kGy	5	66.1451	PS190D0kGy, PS145D0kGy, PS70D0kGy PS110D0kGy, PS45D0kGy

10 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D10kGy,PS110D10kGy,PS145D10kGy,PS190D10kGy,PS45D10kGy,PS70D10kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=4.28779 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS190D10kGy	5	-88.27565	PS70D10kGy, PS110D10kGy, PS45D10kGy PS0D10kGy
PS145D10kGy	5	-85.36812	PS0D10kGy
PS70D10kGy	5	-83.96971	PS190D10kGy, PS0D10kGy
PS110D10kGy	5	-83.45955	PS190D10kGy, PS0D10kGy
PS45D10kGy	5	-82.47127	PS190D10kGy, PS0D10kGy
PS0D10kGy	5	83.05239	PS190D10kGy, PS145D10kGy, PS70D10kGy PS110D10kGy, PS45D10kGy

30 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D30kGy,PS110D30kGy,PS145D30kGy,PS190D30kGy,PS45D30kGy,PS70D30kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=4.185538 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS190D30kGy	5	-86.58531	PS45D30kGy, PS0D30kGy
PS110D30kGy	5	-83.91903	PS0D30kGy
PS145D30kGy	5	-83.90231	PS0D30kGy
PS70D30kGy	5	-83.02932	PS0D30kGy
PS45D30kGy	5	-81.64707	PS190D30kGy, PS0D30kGy
PS0D30kGy	5	82.18679	PS190D30kGy, PS110D30kGy, PS145D30kGy PS70D30kGy, PS45D30kGy

45 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D45kGy,PS110D45kGy,PS145D45kGy,PS190D45kGy,PS45D45kGy,PS7045kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=3.355286 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS190D45kGy	5	-86.14188	PS7045kGy, PS45D45kGy, PS0D45kGy
PS145D45kGy	5	-84.83596	PS45D45kGy, PS0D45kGy
PS110D45kGy	5	-83.14961	PS0D45kGy
PS7045kGy	5	-81.96785	PS190D45kGy, PS0D45kGy
PS45D45kGy	5	-79.98648	PS190D45kGy, PS145D45kGy, PS0D45kGy
PS0D45kGy	5	76.8202	PS190D45kGy, PS145D45kGy, PS110D45kGy, PS7045kGy, PS45D45kGy

9.2 Evaluación del periodo de exposición vs dosis de irradiación.

0 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D0kGy,PS0D10kGy,PS0D30kGy,PS0D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=26.31973 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0D0kGy	5	66.1451	PS0D45kGy, PS0D30kGy, PS0D10kGy
PS0D45kGy	5	76.8202	PS0D0kGy
PS0D30kGy	5	82.18679	PS0D0kGy
PS0D10kGy	5	83.05239	PS0D0kGy

45 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS45D0kGy,PS45D10kGy,PS45D30kGy,PS45D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=0.6509708 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS45D10kGy	5	-82.47127	PS45D45kGy
PS45D30kGy	5	-81.64707	PS45D45kGy
PS45D0kGy	5	-81.20847	
PS45D45kGy	5	-79.98648	PS45D10kGy, PS45D30kGy

70 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS7045kGy,PS70D0kGy,PS70D10kGy,PS70D30kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=0.5191257 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS70D10kGy	5	-83.96971	PS7045kGy
PS70D0kGy	5	-83.61192	PS7045kGy
PS70D30kGy	5	-83.02932	
PS7045kGy	5	-81.96785	PS70D10kGy, PS70D0kGy

110 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS110D0kGy,PS110D10kGy,PS110D30kGy,PS110D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=0.6142906 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS110D30kGy	5	-83.91903	
PS110D0kGy	5	-83.57704	
PS110D10kGy	5	-83.45955	
PS110D45kGy	5	-83.14961	

145 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS145D0kGy,PS145D10kGy,PS145D30kGy,PS145D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=0.4339291 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS145D10kGy	5	-85.36812	PS145D30kGy
PS145D0kGy	5	-85.20812	PS145D30kGy
PS145D45kGy	5	-84.83596	
PS145D30kGy	5	-83.90231	PS145D10kGy, PS145D0kGy

190 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS190D0kGy,PS190D10kGy,PS190D30kGy,PS190D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=0.5580716 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS190D0kGy	5	-88.58595	PS190D30kGy, PS190D45kGy
PS190D10kGy	5	-88.27565	PS190D30kGy, PS190D45kGy
PS190D30kGy	5	-86.58531	PS190D0kGy, PS190D10kGy
PS190D45kGy	5	-86.14188	PS190D0kGy, PS190D10kGy

10. Parámetro h^o de muestras expuestas a intemperismo artificial.

10.1 Evaluación de la dosis de irradiación vs tiempo de exposición.

0 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H0kGy,PS100H0kGy,PS200H0kGy,PS300H0kGy,PS400H0kGy,PS500H0kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=7.03583 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS500H0kGy	5	-74.85733	PS300H0kGy, PS200H0kGy, PS100H0kGy, PS0H0kGy
PS400H0kGy	5	-71.44956	PS200H0kGy, PS100H0kGy, PS0H0kGy
PS300H0kGy	5	-68.77337	PS500H0kGy, PS100H0kGy, PS0H0kGy
PS200H0kGy	5	-65.01984	PS500H0kGy, PS400H0kGy, PS0H0kGy
PS100H0kGy	5	-60.3609	PS500H0kGy, PS400H0kGy, PS300H0kGy, PS0H0kGy
PS0H0kGy	5	66.1451	PS500H0kGy, PS400H0kGy, PS300H0kGy, PS200H0kGy, PS100H0kGy

10 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H10kGy,PS100H10kGy,PS200H10kGy,PS300H10kGy,PS400H10kGy,PS500H10kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=4.007939 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS500H10kGy	5	-74.12344	PS300H10kGy, PS200H10kGy, PS100H10kGy, PS0H10kGy
PS400H10kGy	5	-71.87917	PS200H10kGy, PS100H10kGy, PS0H10kGy
PS300H10kGy	5	-68.7696	PS500H10kGy, PS100H10kGy, PS0H10kGy
PS200H10kGy	5	-65.78444	PS500H10kGy, PS400H10kGy, PS100H10kGy, PS0H10kGy

PS100H10kGy	5	-61.44326	PS500H10kGy, PS400H10kGy, PS300H10kGy PS200H10kGy, PS0H10kGy
PS0H10kGy	5	83.05239	PS500H10kGy, PS400H10kGy, PS300H10kGy PS200H10kGy, PS100H10kGy

30 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H30kGy,PS100H30kGy,PS200H30kGy,PS300H30kGy,PS400H30kGy,PS500H30kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=3.671167 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS500H30kGy	5	-75.83357	PS400H30kGy, PS300H30kGy, PS200H30kGy PS100H30kGy, PS0H30kGy
PS400H30kGy	5	-70.17746	PS500H30kGy, PS200H30kGy, PS100H30kGy PS0H30kGy
PS300H30kGy	5	-66.9809	PS500H30kGy, PS100H30kGy, PS0H30kGy
PS200H30kGy	5	-65.18486	PS500H30kGy, PS400H30kGy, PS0H30kGy
PS100H30kGy	5	-61.96516	PS500H30kGy, PS400H30kGy, PS300H30kGy PS0H30kGy
PS0H30kGy	5	82.18679	PS500H30kGy, PS400H30kGy, PS300H30kGy PS200H30kGy, PS100H30kGy

45 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H45kGy,PS100H45kGy,PS200H45kGy,PS300H45kGy,PS400H45kGy,PS500H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=2.969698 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS500H45kGy	5	-76.64603	PS400H45kGy, PS300H45kGy, PS200H45kGy PS100H45kGy, PS0H45kGy
PS400H45kGy	5	-71.82567	PS500H45kGy, PS200H45kGy, PS100H45kGy PS0H45kGy
PS300H45kGy	5	-68.8505	PS500H45kGy, PS100H45kGy, PS0H45kGy
PS200H45kGy	5	-66.04717	PS500H45kGy, PS400H45kGy, PS100H45kGy PS0H45kGy
PS100H45kGy	5	-61.73055	PS500H45kGy, PS400H45kGy, PS300H45kGy PS200H45kGy, PS0H45kGy
PS0H45kGy	5	76.8202	PS500H45kGy, PS400H45kGy, PS300H45kGy PS200H45kGy, PS100H45kGy

10.2. Evaluación del periodo de exposición vs dosis de irradiación.

0 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H0kGy,PS0H10kGy,PS0H30kGy,PS0H45kGy

Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=26.31973 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0H0kGy	5	66.1451	PS0H45kGy, PS0H30kGy, PS0H10kGy
PS0H45kGy	5	76.8202	PS0H0kGy
PS0H30kGy	5	82.18679	PS0H0kGy
PS0H10kGy	5	83.05239	PS0H0kGy

100 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS100H0kGy,PS100H10kGy,PS100H30kGy,PS100H45kGy

Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=9.219903E-02 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS100H30kGy	5	-61.96516	PS100H0kGy
PS100H45kGy	5	-61.73055	PS100H0kGy
PS100H10kGy	5	-61.44326	PS100H0kGy
PS100H0kGy	5	-60.3609	PS100H30kGy, PS100H45kGy, PS100H10kGy

200 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS200H0kGy,PS200H10kGy,PS200H30kGy,PS200H45kGy

Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=3.396512E-02 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS200H45kGy	5	-66.04717	PS200H30kGy, PS200H0kGy
PS200H10kGy	5	-65.78444	PS200H30kGy, PS200H0kGy
PS200H30kGy	5	-65.18486	PS200H45kGy, PS200H10kGy
PS200H0kGy	5	-65.01984	PS200H45kGy, PS200H10kGy

300 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS300H0kGy,PS300H10kGy,PS300H30kGy,PS300H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=8.46813E-03 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS300H45kGy	5	-68.8505	PS300H30kGy
PS300H0kGy	5	-68.77337	PS300H30kGy
PS300H10kGy	5	-68.7696	PS300H30kGy
PS300H30kGy	5	-66.9809	PS300H45kGy, PS300H0kGy, PS300H10kGy

400 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS400H0kGy,PS400H10kGy,PS400H30kGy,PS400H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=3.431878E-02 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS400H10kGy	5	-71.87917	PS400H0kGy, PS400H30kGy
PS400H45kGy	5	-71.82567	PS400H0kGy, PS400H30kGy
PS400H0kGy	5	-71.44956	PS400H10kGy, PS400H45kGy, PS400H30kGy
PS400H30kGy	5	-70.17746	PS400H10kGy, PS400H45kGy, PS400H0kGy

500 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS500H0kGy,PS500H10kGy,PS500H30kGy,PS500H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=3.827113E-02 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS500H45kGy	5	-76.64603	PS500H30kGy, PS500H0kGy, PS500H10kGy
PS500H30kGy	5	-75.83357	PS500H45kGy, PS500H0kGy, PS500H10kGy
PS500H0kGy	5	-74.85733	PS500H45kGy, PS500H30kGy, PS500H10kGy
PS500H10kGy	5	-74.12344	PS500H45kGy, PS500H30kGy, PS500H0kGy

11. Parámetro ΔE de muestras expuestas a intemperismo natural.

11.1 Evaluación de la dosis de irradiación vs tiempo de exposición.

0 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D0kGy,PS110D0kGy,PS145D0kGy,PS190D0kGy,PS45D0kGy,PS70D0kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=1.358294 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0D0kGy	5	0	PS45D0kGy, PS70D0kGy, PS110D0kGy, PS145D0kGy, PS190D0kGy
PS45D0kGy	5	11.48217	PS0D0kGy, PS70D0kGy, PS110D0kGy, PS145D0kGy, PS190D0kGy
PS70D0kGy	5	20.29644	PS0D0kGy, PS45D0kGy, PS110D0kGy, PS145D0kGy, PS190D0kGy
PS110D0kGy	5	24.77606	PS0D0kGy, PS45D0kGy, PS70D0kGy, PS145D0kGy, PS190D0kGy
PS145D0kGy	5	27.80754	PS0D0kGy, PS45D0kGy, PS70D0kGy, PS110D0kGy, PS190D0kGy
PS190D0kGy	5	31.97284	PS0D0kGy, PS45D0kGy, PS70D0kGy, PS110D0kGy, PS145D0kGy

10 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D10kGy,PS110D10kGy,PS145D10kGy,PS190D10kGy,PS45D10kGy,PS70D10kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=0.9194307 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0D10kGy	5	0.8102348	PS45D10kGy, PS70D10kGy, PS110D10kGy, PS145D10kGy, PS190D10kGy
PS45D10kGy	5	12.04809	PS0D10kGy, PS70D10kGy, PS110D10kGy, PS145D10kGy, PS190D10kGy
PS70D10kGy	5	21.01958	PS0D10kGy, PS45D10kGy, PS110D10kGy, PS145D10kGy, PS190D10kGy
PS110D10kGy	5	24.34731	PS0D10kGy, PS45D10kGy, PS70D10kGy, PS145D10kGy, PS190D10kGy
PS145D10kGy	5	28.17473	PS0D10kGy, PS45D10kGy, PS70D10kGy, PS110D10kGy, PS190D10kGy
PS190D10kGy	5	30.78856	PS0D10kGy, PS45D10kGy, PS70D10kGy, PS110D10kGy, PS145D10kGy

30 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D30kGy,PS110D30kGy,PS145D30kGy,PS190D30kGy,PS45D30kGy,PS70D30kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=2.114849 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0D30kGy	5	0.9123213	PS45D30kGy, PS70D30kGy, PS145D30kGy, PS110D30kGy, PS190D30kGy
PS45D30kGy	5	10.64405	PS0D30kGy, PS70D30kGy, PS145D30kGy, PS110D30kGy, PS190D30kGy
PS70D30kGy	5	19.47226	PS0D30kGy, PS45D30kGy, PS145D30kGy, PS110D30kGy, PS190D30kGy
PS145D30kGy	5	25.07557	PS0D30kGy, PS45D30kGy, PS70D30kGy, PS190D30kGy
PS110D30kGy	5	26.29951	PS0D30kGy, PS45D30kGy, PS70D30kGy
PS190D30kGy	5	28.83395	PS0D30kGy, PS45D30kGy, PS70D30kGy, PS145D30kGy

45 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D45kGy,PS110D45kGy,PS145D45kGy,PS190D45kGy,PS45D45kGy,PS7045kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=1.836122 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0D45kGy	5	0.9799283	PS45D45kGy, PS7045kGy, PS110D45kGy, PS145D45kGy, PS190D45kGy
PS45D45kGy	5	9.63443	PS0D45kGy, PS7045kGy, PS110D45kGy, PS145D45kGy, PS190D45kGy
PS7045kGy	5	18.51323	PS0D45kGy, PS45D45kGy, PS110D45kGy, PS145D45kGy, PS190D45kGy
PS110D45kGy	5	25.10291	PS0D45kGy, PS45D45kGy, PS7045kGy, PS190D45kGy
PS145D45kGy	5	26.85822	PS0D45kGy, PS45D45kGy, PS7045kGy
PS190D45kGy	5	28.52592	PS0D45kGy, PS45D45kGy, PS7045kGy, PS110D45kGy

11.2. Evaluación del periodo de exposición vs dosis de irradiación.

0 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0D0kGy,PS0D10kGy,PS0D30kGy,PS0D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=0.0145906 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0D0kGy	5	0	PS0D10kGy, PS0D30kGy, PS0D45kGy
PS0D10kGy	5	0.8102348	PS0D0kGy
PS0D30kGy	5	0.9123213	PS0D0kGy
PS0D45kGy	5	0.9799283	PS0D0kGy

45 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS45D0kGy,PS45D10kGy,PS45D30kGy,PS45D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=0.3650583 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS45D45kGy	5	9.63443	PS45D0kGy, PS45D10kGy
PS45D30kGy	5	10.64405	PS45D10kGy
PS45D0kGy	5	11.48217	PS45D45kGy
PS45D10kGy	5	12.04809	PS45D45kGy, PS45D30kGy

70 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS7045kGy,PS70D0kGy,PS70D10kGy,PS70D30kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=2.573087 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS7045kGy	5	18.51323	
PS70D30kGy	5	19.47226	
PS70D0kGy	5	20.29644	
PS70D10kGy	5	21.01958	

110 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS110D0kGy,PS110D10kGy,PS110D30kGy,PS110D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=1.539214 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS110D10kGy	5	24.34731	
PS110D0kGy	5	24.77606	
PS110D45kGy	5	25.10291	
PS110D30kGy	5	26.29951	

145 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS145D0kGy,PS145D10kGy,PS145D30kGy,PS145D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=2.692983 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS145D30kGy	5	25.07557	PS145D10kGy
PS145D45kGy	5	26.85822	
PS145D0kGy	5	27.80754	
PS145D10kGy	5	28.17473	PS145D30kGy

190 días

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS190D0kGy,PS190D10kGy,PS190D30kGy,PS190D45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=2.15811 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS190D45kGy	5	28.52592	PS190D0kGy
PS190D30kGy	5	28.83395	PS190D0kGy
PS190D10kGy	5	30.78856	
PS190D0kGy	5	31.97284	PS190D45kGy, PS190D30kGy

12. Parámetro ΔE de muestras expuestas a intemperismo artificial.

12.1 Evaluación de la dosis de irradiación vs tiempo de exposición.

0 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H0kGy,PS100H0kGy,PS200H0kGy,PS300H0kGy,PS400H0kGy,PS500H0kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=3.263116E-02 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0H0kGy	5	0	PS100H0kGy, PS200H0kGy, PS300H0kGy, PS400H0kGy, PS500H0kGy
PS100H0kGy	5	10.51739	PS0H0kGy, PS200H0kGy, PS300H0kGy, PS400H0kGy, PS500H0kGy
PS200H0kGy	5	14.77382	PS0H0kGy, PS100H0kGy, PS300H0kGy, PS400H0kGy, PS500H0kGy
PS300H0kGy	5	20.10872	PS0H0kGy, PS100H0kGy, PS200H0kGy, PS400H0kGy, PS500H0kGy
PS400H0kGy	5	25.09861	PS0H0kGy, PS100H0kGy, PS200H0kGy, PS300H0kGy, PS500H0kGy
PS500H0kGy	5	31.86551	PS0H0kGy, PS100H0kGy, PS200H0kGy, PS300H0kGy, PS400H0kGy

10 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H10kGy,PS100H10kGy,PS200H10kGy,PS300H10kGy,PS400H10kGy,PS500H10kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=3.829535E-02 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0H10kGy	5	0.8102348	PS100H10kGy, PS200H10kGy, PS300H10kGy, PS400H10kGy, PS500H10kGy
PS100H10kGy	5	11.36965	PS0H10kGy, PS200H10kGy, PS300H10kGy, PS400H10kGy, PS500H10kGy
PS200H10kGy	5	15.46151	PS0H10kGy, PS100H10kGy, PS300H10kGy, PS400H10kGy, PS500H10kGy
PS300H10kGy	5	19.9941	PS0H10kGy, PS100H10kGy, PS200H10kGy, PS400H10kGy, PS500H10kGy
PS400H10kGy	5	26.53867	PS0H10kGy, PS100H10kGy, PS200H10kGy, PS300H10kGy, PS500H10kGy
PS500H10kGy	5	29.82966	PS0H10kGy, PS100H10kGy, PS200H10kGy, PS300H10kGy, PS400H10kGy

30 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H30kGy,PS100H30kGy,PS200H30kGy,PS300H30kGy,PS400H30kGy,PS500H30kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=3.833776E-02 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0H30kGy	5	0.9123213	PS100H30kGy, PS200H30kGy, PS300H30kGy, PS400H30kGy, PS500H30kGy
PS100H30kGy	5	11.59973	PS0H30kGy, PS200H30kGy, PS300H30kGy, PS400H30kGy, PS500H30kGy
PS200H30kGy	5	14.86206	PS0H30kGy, PS100H30kGy, PS300H30kGy, PS400H30kGy, PS500H30kGy
PS300H30kGy	5	17.33371	PS0H30kGy, PS100H30kGy, PS200H30kGy, PS400H30kGy, PS500H30kGy
PS400H30kGy	5	22.64674	PS0H30kGy, PS100H30kGy, PS200H30kGy, PS300H30kGy, PS500H30kGy
PS500H30kGy	5	31.71383	PS0H30kGy, PS100H30kGy, PS200H30kGy, PS300H30kGy, PS400H30kGy

45 kGy

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H45kGy,PS100H45kGy,PS200H45kGy,PS300H45kGy,PS400H45kGy,PS500H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=24 MSE=1.936935E-02 Critical Value=4.3727

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0H45kGy	5	0.9799283	PS100H45kGy, PS200H45kGy, PS300H45kGy, PS400H45kGy, PS500H45kGy
PS100H45kGy	5	11.43428	PS0H45kGy, PS200H45kGy, PS300H45kGy, PS400H45kGy, PS500H45kGy
PS200H45kGy	5	16.4631	PS0H45kGy, PS100H45kGy, PS300H45kGy, PS400H45kGy, PS500H45kGy
PS300H45kGy	5	20.64079	PS0H45kGy, PS100H45kGy, PS200H45kGy, PS400H45kGy, PS500H45kGy
PS400H45kGy	5	26.69982	PS0H45kGy, PS100H45kGy, PS200H45kGy, PS300H45kGy, PS500H45kGy
PS500H45kGy	5	34.25556	PS0H45kGy, PS100H45kGy, PS200H45kGy, PS300H45kGy, PS400H45kGy

12.2 Evaluación del periodo de exposición vs dosis de irradiación.

0 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS0H0kGy,PS0H10kGy,PS0H30kGy,PS0H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=0.0145906 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS0H0kGy	5	0	PS0H10kGy, PS0H30kGy, PS0H45kGy
PS0H10kGy	5	0.8102348	PS0H0kGy
PS0H30kGy	5	0.9123213	PS0H0kGy
PS0H45kGy	5	0.9799283	PS0H0kGy

100 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS100H0kGy,PS100H10kGy,PS100H30kGy,PS100H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=1.254094E-02 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS100H0kGy	5	10.51739	PS100H10kGy, PS100H45kGy, PS100H30kGy
PS100H10kGy	5	11.36965	PS100H0kGy, PS100H30kGy
PS100H45kGy	5	11.43428	PS100H0kGy
PS100H30kGy	5	11.59973	PS100H0kGy, PS100H10kGy

200 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS200H0kGy,PS200H10kGy,PS200H30kGy,PS200H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=2.180715E-02 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS200H0kGy	5	14.77382	PS200H10kGy, PS200H45kGy
PS200H30kGy	5	14.86206	PS200H10kGy, PS200H45kGy
PS200H10kGy	5	15.46151	PS200H0kGy, PS200H30kGy, PS200H45kGy
PS200H45kGy	5	16.4631	PS200H0kGy, PS200H30kGy, PS200H10kGy

300 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS300H0kGy,PS300H10kGy,PS300H30kGy,PS300H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=1.668559E-02 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS300H30kGy	5	17.33371	PS300H10kGy, PS300H0kGy, PS300H45kGy
PS300H10kGy	5	19.9941	PS300H30kGy, PS300H45kGy
PS300H0kGy	5	20.10872	PS300H30kGy, PS300H45kGy
PS300H45kGy	5	20.64079	PS300H30kGy, PS300H10kGy, PS300H0kGy

400 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: PS400H0kGy,PS400H10kGy,PS400H30kGy,PS400H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=7.952698E-02 Critical Value=4.0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
PS400H30kGy	5	22.64674	PS400H0kGy, PS400H10kGy, PS400H45kGy
PS400H0kGy	5	25.09861	PS400H30kGy, PS400H10kGy, PS400H45kGy
PS400H10kGy	5	26.53867	PS400H30kGy, PS400H0kGy
PS400H45kGy	5	26.69982	PS400H30kGy, PS400H0kGy

500 horas

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

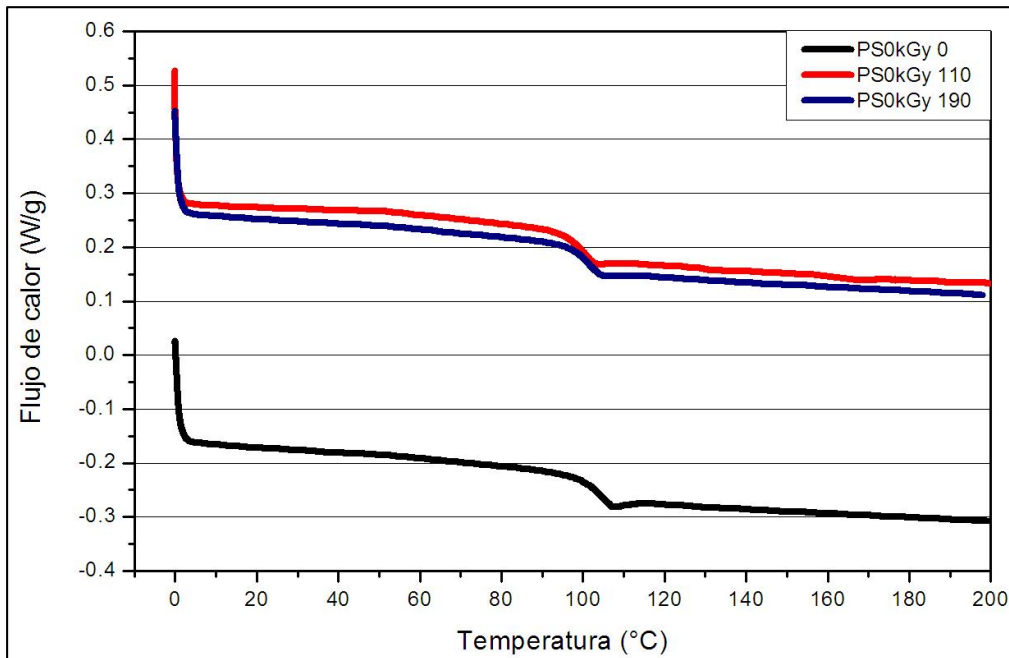
Response: PS500H0kGy,PS500H10kGy,PS500H30kGy,PS500H45kGy
Term A:

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=16 MSE=4.779918E-02 Critical Value=4.0461

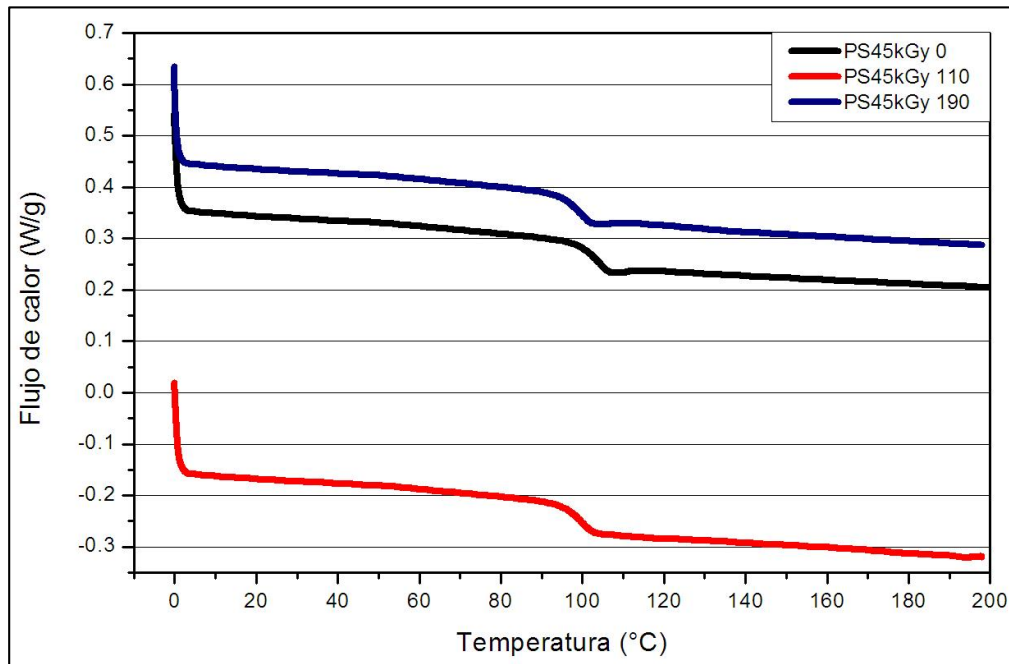
Group	Count	Mean	Different From Groups
PS500H10kGy	5	29.82966	PS500H30kGy, PS500H0kGy, PS500H45kGy
PS500H30kGy	5	31.71383	PS500H10kGy, PS500H45kGy
PS500H0kGy	5	31.86551	PS500H10kGy, PS500H45kGy
PS500H45kGy	5	34.25556	PS500H10kGy, PS500H30kGy, PS500H0kGy

Termogramas de DSC

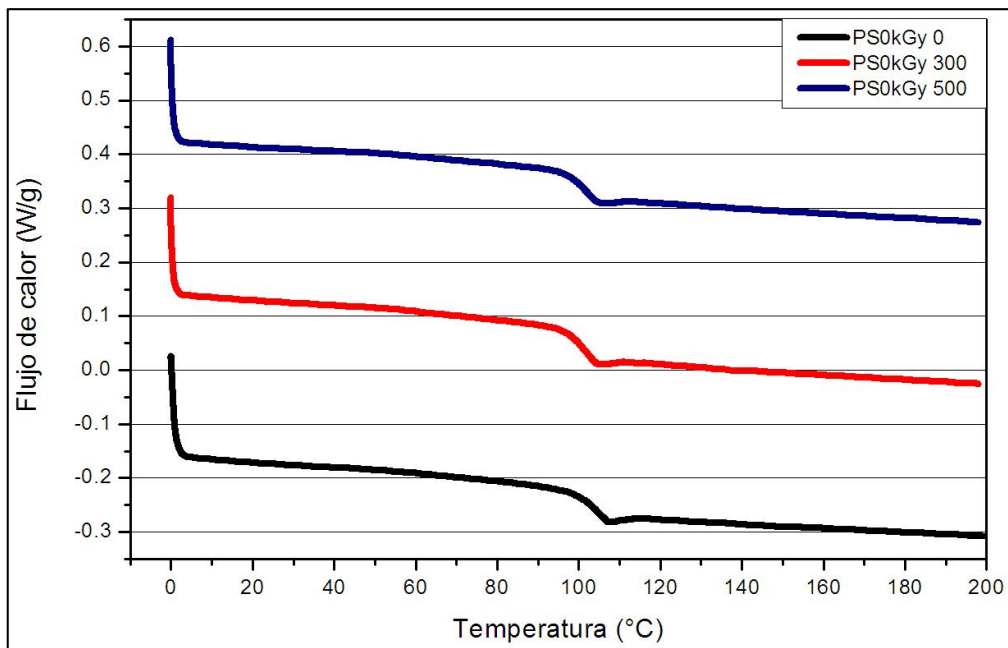
13. Termograma para las muestras de PS con dosis de 0 kGy y expuestas a intemperismo natural por 0, 110 y 190 días.



14. Termograma para las muestras de PS con dosis de 45 kGy y expuestas a intemperismo natural por 0, 110 y 190 días.



15. Termograma para las muestras de PS con dosis de 0 kGy y expuestas a intemperismo artificial por 0, 300 y 500 horas.



16. Termograma para las muestras de PS con dosis de 45 kGy y expuestas a intemperismo artificial por 0, 300 y 500 horas.

