

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE ÓPTICA Y OPTOMETRÍA



CARACTERIZACIÓN DE FILTROS SOLARES COMERCIALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

MEMORIA PRESENTADA POR:

Marina Ruiz de los Paños Andrade

Paula Yepes Rodríguez

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

M^a Ulagares de la Orden Hernández

Aurora Lasagabáster Latorre

Madrid, 16 de junio de 2020

Curso 2019 - 2020



Consentimiento y compromiso de entrega para evaluación de la memoria del Trabajo Fin de Grado

Madrid, a 7 de junio de 2020

D^a. Paula Yepes Rodríguez, con DNI: _____, declara que el documento de la memoria del TFG que presenta para su evaluación, a través del Campus Virtual de la asignatura de TFG, es el mismo que se ha cargado en la aplicación Turnitin para obtención del certificado de similitud y la aprobación del tutor/es.

Fdo: _____

Madrid, a 7 de junio de 2020

D^a. Marina Ruiz de los Paños Andrade, con DNI: _____, otorga su consentimiento para que D^a. Paula Yepes Rodríguez, con DNI: _____ presente en su nombre la memoria del Trabajo Fin de Grado titulado "Caracterización de Filtros Solares Comerciales", tutorizado por M^a Ulagares de la Orden Hernández y Aurora Lasagabaster Latorre.

Fdo: _____

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, queremos agradecer a M^a Ulagares de la Orden por su incansable labor como tutora de este Trabajo Fin de Grado, con el que nos ha ayudado y orientado en todo momento, así como a Aurora Lasagabáster por su implicación en la dirección de este trabajo. Además, nos gustaría destacar la magnífica labor docente de ambas profesoras en la asignatura de Materiales en Óptica Oftálmica y Lentes de Contacto, con la que han conseguido transmitirnos su entusiasmo por esta rama de la química.

En segundo lugar, agradecer también la colaboración de Sonia Melle y Óscar Calderón, del departamento de Óptica de la Facultad de Óptica y Optometría UCM, por habernos ayudado a comprender algunos conceptos relacionados con la polarización, así como por habernos cedido parte del material necesario para la parte experimental de este trabajo.

En tercer lugar, gracias a la Óptica “Virgen del Cortijo” de Madrid por haber donado las 40 parejas de lentes utilizadas para este estudio.

Por último, queremos agradecer también a nuestros familiares y amigos por habernos apoyado constantemente durante estos cuatro años de carrera, a la que ponemos fin con esta memoria.

ÍNDICE

GLOSARIO DE ABREVIATURAS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ESTADO DEL ARTE	5
2.1. MATERIALES Y RECUBRIMIENTOS	5
2.2. MÉTODOS DE COLORACIÓN	8
2.2.1. <i>Coloración de lentes orgánicas</i>	8
2.2.2. <i>Coloración de lentes minerales</i>	9
2.2.3. <i>Filtros fotocromicos</i>	9
2.3. LENTES POLARIZADAS	9
2.4. NORMATIVA OFICIAL RELATIVA A LOS FILTROS SOLARES	10
3. OBJETIVOS	12
4. PARTE EXPERIMENTAL.....	12
4.1. MATERIALES.....	12
4.2. MÉTODOS	13
4.2.1. <i>Caracterización de materiales y recubrimientos mediante espectroscopía infrarroja</i>	13
4.2.2. <i>Dureza</i>	13
4.2.3. <i>Resistencia al impacto</i>	13
4.2.4. <i>Propiedades ópticas: caracterización ultravioleta-visible</i>	14
4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	15
4.3.1. <i>Caracterización de los materiales mediante espectroscopía infrarroja</i>	15
4.3.2. <i>Propiedades mecánicas: dureza y resistencia al impacto</i>	19
4.3.3. <i>Propiedades ópticas</i>	22
5. CONCLUSIONES.....	24
6. BIBLIOGRAFÍA.....	26
ANEXO 1.....	31

GLOSARIO DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
AC	Acetato de celulosa
ANSI	Instituto Nacional Estadounidense de Estándares
AS/NZS	Estándar Australiano/Neozelandés
ATR	Reflexión total atenuada
CAB	Acetobutirato de celulosa
CIE	Comisión Internacional de L'Eclairage
CR-39	Poli(carbonato de dialildietilenglicol)
ECOO	Consejo Europeo de Óptica y Optometría
EEUU	Estados Unidos de América
EPR	Epitelio pigmentario de la retina
EN	Norma Europea
EVA	Copolímero (etileno-acetato de vinilo)
FDA	Administración de Alimentos y Medicamentos Estadounidense
FTIR	Espectrofotometría Infrarroja por Transformada de Fourier
IR	Infrarrojo
ISO	Organización Internacional de Normalización
LCD	Pantalla de cristal-líquido
MMA	Metacrilato de metilo
n	Índice de refracción
OMS	Organización Mundial de la Salud
P	Grado de polarización
PC BPA	Poli(carbonato de bisfenol A)
PET	Poli(tereftalato de etilenglicol)
PF	Factor de protección
PMMA	Poli(metacrilato de metilo)
PPG	Pittsburgh Plate Glass
PU	Poliuretano
PVA	Poli(alcohol vinílico)
RD	Recubrimiento de dureza
T	Transmisión
TAC	Triacetato de celulosa
UNE	Norma Española
UV	Ultravioleta

1. INTRODUCCIÓN

La exposición solar, constante durante nuestras vidas, tiene efectos beneficiosos para nuestra salud, como el desarrollo de la vitamina D y la regulación del ritmo circadiano del cuerpo, gracias a la producción de serotonina y melatonina; sin embargo, también tiene efectos perjudiciales relacionados con el envejecimiento de la piel, debido a la destrucción de la vitamina A cutánea, y con el aumento del riesgo de cáncer de piel^{1,2}. Así mismo, la radiación solar también puede dañar las distintas estructuras oculares, ya que absorben parte del espectro electromagnético que, como se muestra en la *Fig. 1*, está formado por rayos gamma, rayos X, ultravioleta (UV), visible, infrarrojo (IR), microondas, ondas de radio y algunas otras radiaciones³.

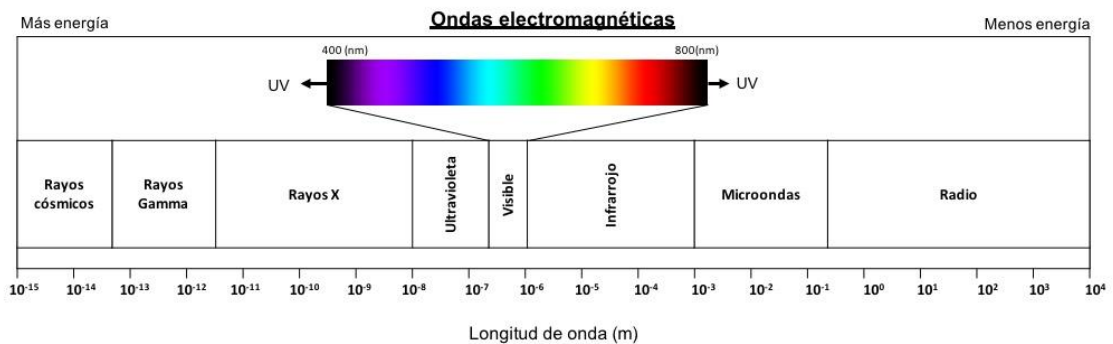


Fig. 1. Espectro electromagnético

De todo el espectro, el intervalo comprendido entre el UV y el IR es el que incluye las radiaciones que más interactúan con el ser humano^{1,4-6}. El UV, que abarca las radiaciones con longitudes de onda comprendidas entre 100 nm y 380 nm, está dividido en *UV-A* (315-380 nm), *UV-B* (280-315 nm) y *UV-C* (100-280 nm). De todos modos, hay que considerar que la radiación UV que alcanza la tierra se compone en un 95% de rayos UV-A y en un 5% de UV-B, debido a que la mayor parte de la radiación UV-B y toda la radiación UV-C es absorbida por la capa de ozono, tal y como se muestra en la *Fig. 2*^{4,5,7,8}.

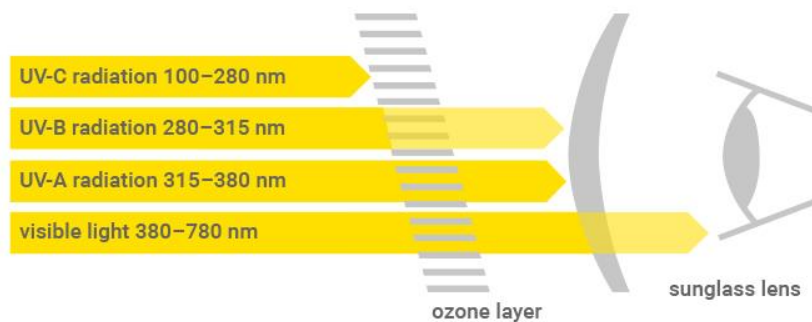


Fig. 2. Absorción de radiación en capa de ozono, lente y ojo⁹

En este punto, es muy importante tener en cuenta que los límites de la radiación UV son objeto de gran controversia desde hace muchos años. La normativa oficial al respecto, ISO 8980/3 fija dichos límites entre 100 y 380 nm¹⁰, pero expertos en oftalmología, biología y fotoquímica han puesto de manifiesto el peligro que la radiación, con longitudes de onda comprendidas entre 380 y 400 nm, supone para la salud, por lo que la Organización Mundial de la Salud (OMS), el Consejo Europeo de Optometría y Óptica (ECO), la Comisión Internacional de L'Eclairage (CIE) y otros organismos han extendido la longitud de onda del UV hasta los 400 nm, aunque, de momento, este intervalo solo se aplica en Óptica y Fotónica^{11,12}. Los laboratorios de lentes oftálmicas se oponen a este cambio, ya que poniendo el límite en 400 nm las lentes amarillean, suponiendo un problema estético tanto para fabricante como para comprador¹¹.

La **radiación visible**, así llamada por comprender la parte del espectro perceptible para el ojo humano, abarca desde los 380 o 400 nm hasta los 780 u 800 nm. Para este intervalo de longitudes de onda, el sistema ocular tiene fotorreceptores denominados conos, que son los responsables de absorber estas radiaciones. Hay tres tipos de conos, dependiendo de a qué rango del visible sean sensibles: conos L, M y S, sensibles a longitudes de onda del rojo, verde y azul, respectivamente. Al optimizar estas longitudes de onda se logra una mayor sensibilidad luminosa y una mejor percepción del color y de la claridad. La sensibilidad máxima está en 555 nm, donde absorben los tres tipos de conos a la vez^{3,4,13}. La radiación IR, que abarca de 780 nm a 1 mm, se divide en tres regiones denominadas **IR cercano o IR-A** (780-2500 nm), **IR medio o IR-B** (2500-50000 nm) e **IR lejano o IR-C** (50000-10⁶ nm)^{14,15}.

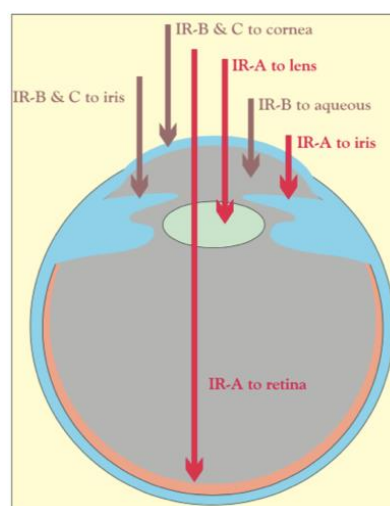


Fig. 3. Absorción del IR por el ojo¹⁵

El IR lejano normalmente es absorbido por el vapor de agua presente en la atmósfera, aunque hay fuentes no naturales, como industrias de vidrio y acero, algunas lámparas de arco y

algunos láseres, que pueden suponer un peligro significativo para la salud ocular ya que, como se muestra en la *Fig. 3*, esta radiación es absorbida por las distintas estructuras del ojo, que experimentan un aumento de la temperatura y resultan dañadas, como se detallará a continuación^{5,15}.

Una vez descritas las radiaciones del espectro electromagnético que pueden interaccionar con las estructuras oculares, hay que indicar que los daños que producen dependen de diferentes factores como la longitud de onda, la intensidad, el ángulo de incidencia, el tiempo de exposición, la altitud, la reflexión de luz en el suelo, la toma de fármacos y la anatomía del propio sujeto¹. La localización geográfica también juega un papel importante⁶, ya que el hemisferio sur en verano está más cerca del sol, haciendo que la intensidad de la radiación que llega a esta zona de la superficie terrestre sea alrededor de un 7% mayor; lo que, sumado al hecho de que en el hemisferio sur hay menos contaminación atmosférica que absorba la radiación, hace que su intensidad sea un 15% mayor que la recogida en el hemisferio norte¹⁶.

A continuación, se detallan los *efectos que pueden producir las diferentes radiaciones* y, para una mejor visualización, se incluye la *Fig. 4*, que muestra la absorción de las radiaciones UV y visible por las estructuras oculares:

- **Radiación UV-A:** produce quemaduras térmicas en la piel, pterigium y pinguécula en la conjuntiva, catarata en el cristalino y daño macular⁸.
- **Radiación UV-B:** produce eritema cutáneo, fotoqueratitis y queratoconjuntivitis en la córnea y conjuntiva, y catarata en el cristalino⁸.
- **Radiación UV-C:** mayormente absorbida en la capa de ozono, la radiación transmitida produce eritema cutáneo, fotoqueratitis en la córnea, irritación y sequedad ocular.
- **Radiación visible:** la exposición a luz visible de alta intensidad puede provocar quemaduras cutáneas y retinianas. Dentro de la radiación visible destacamos la **luz azul o luz visible de alta energía**, comprendida entre 380 y 500 nm, que es necesaria para la percepción visual; no obstante, puede producir un daño fotoquímico que afecta a las células del epitelio pigmentario de la retina (EPR) y fotorreceptores, pudiendo desencadenar patologías retinianas, tales como degeneración macular y fototraumatismos^{5,8,17,18}. La radiación visible produce también deslumbramientos debido a la entrada de una cantidad excesiva de luz en el sistema visual, provocando una sensación incómoda o incluso incapacitante durante un breve período de tiempo; parte de este deslumbramiento es causado por la dispersión de la luz azul al atravesar el cristalino (“scattering”)^{4,19-21}.

- **Radiación IR cercano y medio:** produce cataratas, quemaduras retinianas y quemaduras cutáneas¹⁴.
- **Radiación IR lejano:** produce quemaduras retinianas^{1,4,6}.

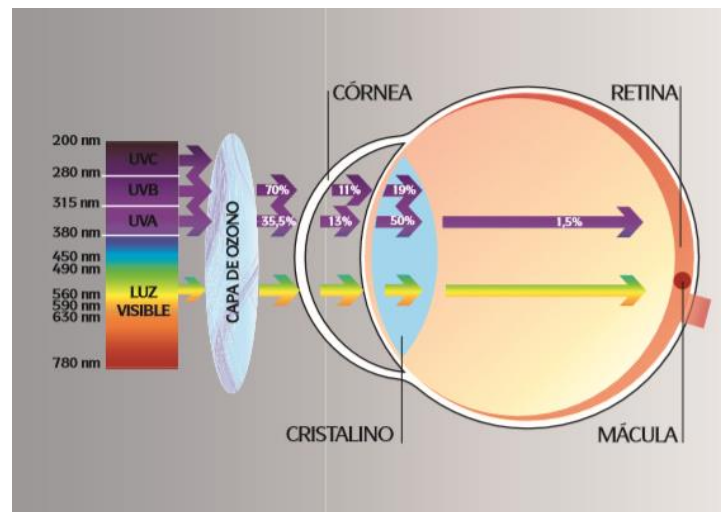


Fig. 4. Absorción de la radiación UV y visible por las estructuras oculares⁵

Además, el daño producido por la radiación solar es de tipo acumulativo y, según la OMS, se estima que el 80% de la exposición recibida durante toda la vida se produce antes de los 18 años. Por esta razón, es importante hacer hincapié en el **uso de protección ocular durante todo el año y en todas las franjas de edad**; ya que los daños en la retina se ven acentuados en niños, con medios transparentes, y en personas afáquicas^{17,21-23}.

Para reducir notablemente esta exposición se recomienda el uso de **filtros solares**, siempre adquiridos en ópticas o establecimientos homologados para garantizar la calidad de estos, ya que una lente tintada no siempre nos protege, frente a la radiación UV, por el simple hecho de ser oscura; incluso puede ser más perjudicial que la exposición a ojo desnudo, porque produce la dilatación de la pupila, dejando pasar más cantidad de radiación^{7,22,23}.

La protección de unas gafas solares no depende únicamente del factor de protección de la lente. Además, está influenciada por características de la montura, su geometría y tamaño, distancia de vértice, tamaño del puente, anchura de la varilla y protección lateral. También afectan la posición del sol, las condiciones ambientales y la reflexión en superficies planas como el suelo, nieve, arena, etc^{6,7,21,23,24}.

Debido a la importancia de una protección solar adecuada, en la parte experimental de este trabajo se van a caracterizar una serie de filtros solares comerciales. Con objeto de aclarar el tema, en el siguiente apartado se presenta un pequeño estudio teórico de algunas cuestiones relacionadas con los filtros solares, conocidos normalmente como gafas de sol.

2. ESTADO DEL ARTE

Los filtros solares son lentes, graduadas o sin graduar, cuya función es reducir la intensidad de la luz visible que llega al sistema visual y absorber la radiación UV-A y UV-B^{5,10,25}.

En este apartado se van a describir, en primer lugar, los materiales más utilizados en la fabricación de filtros solares y los recubrimientos de dureza que se aplican a algunos de estos materiales. A continuación, se presentarán los diferentes métodos de coloración, se hablará de los filtros solares polarizados y se establecerán las propiedades ópticas que debe cumplir cada tipo de filtro, así como los requisitos mecánicos mínimos establecidos en la normativa oficial al respecto.

2.1. Materiales y recubrimientos

Los materiales utilizados para la fabricación de lentes solares son, en su inmensa mayoría, polímeros orgánicos, pudiendo ser *termoplásticos*, polímeros lineales que funden de forma reversible por acción del calor, o *termoestables*, polímeros reticulados que, por acción del calor o de endurecedores apropiados, solidifican de forma irreversible y son insolubles e infusibles^{5,26}.

Entre los materiales termoplásticos más utilizados en la fabricación de filtros solares, cabe citar:

- El *poli(metacrilato de metilo)* (PMMA) (*Fig. 5, Anexo I*), es un polímero de adición, que se introdujo en el mercado óptico después de la Segunda Guerra Mundial, tanto para fabricar lentes oftálmicas como lentes de contacto e intraoculares. En la actualidad, se utiliza en la fabricación de algunos filtros solares sin graduar. Tiene un índice de refracción de 1,495, buena transmisión en el visible ($T_{\text{visible}} \geq 92\%$) y baja protección en el UV (punto de corte UV: 340 nm). En cuanto a propiedades mecánicas, tiene muy buena resistencia al impacto por su estructura lineal, pero baja resistencia al rayado^{27,28}.
- El *poli(carbonato de bisfenol A)* (PC BPA) (*Fig. 6, Anexo I*) es un polímero de condensación que se obtiene mayoritariamente al reaccionar fosgeno y bisfenol A en medio básico. En los años 70 se comenzó a utilizar para fabricar lentes oftálmicas con alto índice de refracción (1,59) y muy buena protección UV (punto de corte UV: 390 nm), aunque tiene como inconvenientes su baja transmisión en el visible ($T_{\text{visible}} = 88\%$) y su bajo número de Abbe. Tiene muy buena resistencia al impacto por su estructura lineal y por la flexibilidad de sus enlaces -O-C-O-, que compensan la rigidez de los anillos aromáticos, pero su dureza superficial es muy baja²⁹⁻³¹.

- El **Xylex** (*Fig. 7, Anexo I*) es un material formado por una mezcla física de PC BPA y de poliésteres alifáticos. En un principio se utilizaba únicamente en la fabricación de monturas, pero las buenas propiedades ópticas ($n=1,54-1,55$ y $T_{\text{visible}}=88-90\%$) de algunos grados de este material, permitieron su uso en lentes oftálmicas coloreadas. Además, combina la elevada resistencia al impacto del policarbonato con la buena resistencia química aportada por el poliéster³².
- Las **poliamidas sintéticas** son polímeros desarrollados inicialmente (1938) como fibras, de alto grado de cristalinidad, para la fabricación de tejidos resistentes. En los años 70 se desarrolló una poliamida amorfa y transparente llamada Grilamid (*Fig. 8, Anexo I*) cuya modificación, en los años 90, condujo a un material totalmente transparente y con muy buenas propiedades ópticas ($T_{\text{visible}} \geq 92\%$ e índice de refracción medio). Dicho material tiene buena resistencia al impacto por la flexibilidad de su estructura que, además, permite el diseño de gafas de sol con elevadas curvaturas³³.
- El **acetato de celulosa trisustituido** (TAC) (*Fig. 9, Anexo I*) es un éster obtenido a partir de la celulosa, que es uno de los polímeros naturales más abundantes. Así pues, se trata de un polímero semisintético de fuentes renovables, ampliamente utilizado en la fabricación de monturas, pantallas faciales y, en menor medida, de lentes solares polarizadas de las que, por su importancia y creciente uso en el campo de los filtros solares, se hablará en el apartado 2.3. Este material tiene unas propiedades ópticas adecuadas para fabricar gafas de sol ($n=1,46-1,49$ y $T_{\text{visible}} > 90\%$) y, además, cabe destacar su buena resistencia al impacto³⁴.

Respecto a los materiales termoestables, se utilizan:

- El **poli(carbonato de dialildietilenglicol)** (CR-39) (*Fig. 10, Anexo I*), es un polímero de adición sintetizado durante la Segunda Guerra Mundial por químicos de la compañía PPG, y utilizado para fabricar lentes oftálmicas desde los años 50. Se trata de un material con buenas propiedades ópticas ($n=1,5$ y $T_{\text{visible}}=92\%$) y que, debido a su estructura compacta, sin huecos y con un alto grado de reticulación, tiene una resistencia al impacto moderada y, por la misma razón, su resistencia al rayado es mejor que la de la mayoría de las lentes orgánicas^{28,31,35,36}.

Además de los materiales anteriores, que se utilizan en gafas de sol sin graduar, los filtros graduados se suelen fabricar con los materiales normalmente utilizados en lentes oftálmicas graduadas, entre ellos se va a citar el Trivex, incluido también en la parte experimental de este trabajo. El **Trivex** fue introducido en el mercado óptico en 2001 por la compañía PPG. Es un

poliuretano, con segmentos de cadena largos y flexibles, ligeramente reticulado con diaminas aromáticas voluminosas (*Fig. 11, Anexo I*). Se caracteriza por tener la densidad más baja de todos los materiales para lentes oftálmicas ($d = 1,1 \text{ g.mL}^{-1}$), sus buenas propiedades ópticas ($n = 1,53$ y $T_{\text{visible}} = 91\%$) y mecánicas; de hecho, tiene muy buena resistencia al impacto debido a su bajo grado de reticulación y a la flexibilidad de sus cadenas³⁷.

En algunos casos, muy pocos, algunas lentes solares se siguen fabricando con *vidrio mineral*. Este material se obtiene a partir de una mezcla de óxidos, siendo los vidrios de sílice los más utilizados en el campo de la Óptica Oftálmica en la que, tradicionalmente, se diferencia entre los vidrios Crown y Flint, ambos con alta calidad óptica y con una amplia variedad de modificaciones con diferentes óxidos añadidos a la sílice para optimizar el conjunto de sus propiedades^{7,38,39}. La unidad estructural en la mayoría de estos vidrios es el *anión ortosilicato* (SiO_4^{4-}) (*Fig. 12, Anexo I*), cuya disposición tetraédrica, con fuertes enlaces covalentes Si-O, forman una estructura tridimensional amorfa, compacta y rígida, incapaz de absorber la energía y proporcionando una muy baja resistencia al impacto y una elevada dureza al material⁴⁰.

En este contexto, es muy importante tener en cuenta que, mientras el vidrio mineral tiene muy buena dureza superficial, las lentes orgánicas, sobre todo las fabricadas con materiales termoplásticos, debido a su carácter lineal y al hecho de que las cadenas no están químicamente unidas entre sí, sino que interaccionan mediante fuerzas intermoleculares, tienen una baja resistencia al rayado y a la abrasión, por lo que en algunos casos es necesario aplicar tratamientos de dureza (antirrayado) para mantener su calidad óptica y, en consecuencia, prolongar su tiempo de uso^{31,41}.

Los *tratamientos antirrayado* suelen ser materiales híbridos orgánico-inorgánicos, que proporcionan la alta resistencia al rayado característica de la estructura inorgánica, mientras que la parte orgánica proporciona una adhesión adecuada a la lente para que el tratamiento sea duradero. A su vez, la parte inorgánica permite una buena adhesión de tratamientos posteriores como las multicapas antirreflejantes, que también son de naturaleza inorgánica. Estos recubrimientos de dureza se preparan mediante procesos sol-gel, a partir de precursores inorgánicos que durante el proceso dan lugar a la formación de óxidos de sílice, de titanio, de circonio o de aluminio, principalmente, y a partir de precursores orgánicos como por ejemplo metacrilato de metilo (MMA), y de agentes de acoplamiento que favorecen la compatibilidad entre los componentes orgánicos e inorgánicos^{41,42}.

La aplicación se puede realizar por inmersión (*dip coating*) o mediante centrifugado (*spin coating*) (Fig. 13, Anexo I). El proceso de **inmersión** consiste en sumergir la lente en la mezcla líquida y extraerla a una velocidad constante que, junto con la viscosidad de la mezcla, influirá en el espesor final del recubrimiento. El método de **centrifugado** se fundamenta en la aplicación de una gota de la solución líquida sobre la superficie de la lente y su posterior centrifugación, que reparte uniformemente el tratamiento y elimina lo sobrante; el espesor final de la capa depende de la viscosidad de la mezcla y de la velocidad de centrifugado^{5,41}.

El proceso de curado, necesario para la correcta solidificación y endurecimiento del recubrimiento, se puede realizar mediante radiación UV o térmicamente, dependiendo de la composición química del mismo. Una vez aplicado el tratamiento, se comprueba su eficacia mediante procedimientos como el método Taber o el barril giratorio, que permiten evaluar la resistencia a la abrasión y al rayado de la lente^{41,43,44}.

2.2. Métodos de coloración

Para que estas lentes se comporten como filtros solares deben ser coloreadas, en el caso de filtros de transmisión fija, o poseer un tratamiento fotocromático, en el caso de filtros de transmisión variable^{21,22,45}.

Las **lentes de transmisión fija** se pueden colorear en masa o superficialmente, teniendo en cuenta que el método de coloración está condicionado por la naturaleza, orgánica o inorgánica del material y, en el caso de los materiales orgánicos, por la composición química y la estructura de cada uno de ellos. En primer lugar, se van a describir las formas de coloración de las lentes orgánicas y a continuación se detallará la coloración de las lentes de vidrio mineral.

2.2.1. Coloración de lentes orgánicas

Coloración en masa: consiste en añadir colorantes antes de la polimerización en materiales termoestables o en la fusión del polímero en materiales termoplásticos. Se utiliza únicamente en lentes afocales para evitar una coloración irregular por los cambios de espesor⁵.

Coloración superficial: este método de coloración depende del tipo de material, ya que la composición química y la estructura condicionan la absorción del colorante. Entre los métodos utilizados para realizar este tipo de coloración se encuentran:

- **Coloración por impregnación superficial:** mediante la inmersión de la lente en una mezcla de colorantes orgánicos a una temperatura de unos 95° para favorecer la absorción superficial del colorante en el material, sin que este último experimente

degradación. Con este método se pueden obtener lentes con color uniforme por toda la superficie o lentes degradadas y es muy utilizado para colorear CR-39^{5,45}.

- **Coloración por impregnación de una capa de tratamiento:** se utiliza en materiales poco permeables a los colorantes, como PC BPA, a los que se les aplica, en la cara convexa, un recubrimiento fácilmente coloreable⁵.
- **Coloración por sublimación:** mediante este método se pueden colorear materiales de alto índice de refracción. Se cubren las lentes con un papel en el que se ha imprimido el colorante y se introducen en un horno de vacío a 150°C, de esta manera, el colorante se sublima y pasa a la superficie de la lente⁵.

2.2.2. Coloración de lentes minerales

Coloración en masa: la coloración se consigue añadiendo sales metálicas, con propiedades de absorción concretas, a la mezcla de óxidos antes de la fabricación del vidrio. Este método se utiliza en lentes afocales⁵.

Coloración por tratamiento superficial: se realiza en cámaras de alto vacío en las que se subliman óxidos metálicos coloreados que, posteriormente, se depositan sobre la superficie de la lente. La intensidad del color depende de la capacidad colorante de los óxidos utilizados y del grosor de la capa creada^{5,45}.

2.2.3. Filtros fotocromicos

Por otra parte, en las **lentes de transmisión variable** se aplica un tratamiento fotocromico que posee especies químicas, orgánicas en el caso de lentes orgánicas o inorgánicas en el caso de lentes de vidrio mineral, que sufren una transformación reversible inducida por la radiación UV y dan lugar a la coloración del material. Durante este proceso, la lente se oscurece por acción de la radiación UV y, en situaciones de baja intensidad luminosa, la lente vuelve a ser incolora. En la *Fig. 14, Anexo 1*, se muestra el proceso de oscurecimiento y aclarado de una lente. El compuesto fotocromico se activa por acción de la luz solar, adquiriendo color y reduciendo la transmisión en todo el intervalo visible^{3,5,21,22,45,46}.

2.3. Lentes polarizadas

Se debe destacar que, actualmente, una gran cantidad de filtros solares son polarizados. Este tipo de lentes se caracteriza por reducir los destellos molestos producidos por la **polarización parcial de la luz** al reflejarse en superficies planas y brillantes como carreteras, nieve o la superficie del mar. Esta intensa luz horizontal produce un reflejo, o ruido óptico, que reduce la visibilidad y puede potenciar situaciones peligrosas. Al añadir un **filtro polarizador** con eje de polarización en vertical, se bloquea totalmente la radiación reflejada horizontalmente,

permitiendo una visión más cómoda gracias a la reducción del deslumbramiento y a la mejora del contraste de colores que permite una mejor percepción del relieve, como se aprecia en la *Fig. 15, Anexo I*^{3,5,22,25}.

Hay numerosas patentes que describen la fabricación de lentes polarizadas mediante una gran variedad de métodos. En todas ellas se forma una **estructura multicapa** (con un mínimo de tres capas), que contiene en el centro un **filme polarizador** que, en la mayoría de los casos, es de poli(alcohol vinílico) (PVA) teñido con yodo y estirado en una dirección para conferirle el efecto polarizante. En la bibliografía, entre los materiales que se utilizan para proteger el filme polarizante se citan: TAC, PC BPA, acetobutirato de celulosa (CAB), CR-39, PMMA, poli(tereftalato de etilenglicol) (PET), poliamidas, poliuretanos, politiouretanos, etc. Una de las estructuras más utilizadas es la compuesta por dos capas de TAC que forman un “sándwich” con el filme de PVA en el centro (TAC/PVA/TAC)^{47,48}. En ocasiones, esta estructura tricapa se protege con recubrimientos de dureza híbridos orgánico-inorgánicos o con capas de polímeros más duros, como poliésteres o el copolímero etileno/acetato de vinilo (EVA), entre otros. La calidad de los filtros solares polarizados se evalúa en función de su transmisión en el UV y en el visible, y además, en función de su grado de polarización^{5,22,47-50}, que se define en el apartado 4.2.4.

2.4. Normativa oficial relativa a los filtros solares

Las lentes solares deben cumplir ciertas normas, respecto a sus propiedades ópticas y mecánicas, estipuladas para garantizar su calidad y proteger a los usuarios de lesiones y riesgos secundarios debido a su uso. Las primeras normas para filtros solares se redactaron en los años 70 en Australia (donde se promulgaron por ley debido a la mayor radiación solar a la que está expuesto este país), en Estados Unidos y en algunos países de Europa (Alemania y Francia). En la actualidad, las normas vigentes son la AS/NZS 1067:2003 y la ANSI Z80.3:2018 en Australia/Nueva Zelanda y EEUU, respectivamente. Finalmente, en Europa está en vigor la norma UNE-EN 1836:2006+A1 que, desde 1997, se ha ido modificando hasta llegar a la versión actual⁵¹⁻⁵⁴.

Según la normativa europea, los filtros solares se clasifican en **5 categorías** según el porcentaje de transmisión de radiación visible, UV-B y UV-A, como se muestra en la *Tabla 1, Anexo I*¹⁰. A cada categoría le corresponde una descripción y unas indicaciones de uso:

- La **categoría 0** se corresponde con lentes muy claras, ligeramente coloreadas con tonos claros e incluso filtros fotocromáticos en estado desactivado. Estas lentes están indicadas para su uso en interiores o con cielo nublado.

- La **categoria 1** se corresponde con lentes ligeramente coloreadas, más oscuras que las de la categoría anterior, y cuyo uso se recomienda con una luminosidad solar atenuada.
- La **categoria 2** abarca las lentes solares medianamente coloreadas. Su uso está indicado para niveles de luminosidad solar media.
- La **categoria 3** se corresponde con lentes solares oscuras, recomendadas para fuertes niveles de iluminación solar. No son aptas para conducción nocturna.
- La **categoria 4** se corresponde con lentes muy oscuras y cuyo uso está indicado para niveles de iluminación solar excepcional como, por ejemplo, la nieve, playa o montaña. Este tipo de lentes no se recomienda para uso diario y está prohibido conducir con ellas⁵.

Para filtros solares polarizados, la norma UNE-EN 1836:2006+A1 aconseja el cálculo del **grado de polarización**, definido en el punto 4.2.4¹⁰.

Además, para garantizar la seguridad en caso de golpes, la norma anterior establece que todos los filtros solares deben poseer una **resistencia al impacto mínima**. La **resistencia al impacto** o **tenacidad** es una propiedad mecánica relacionada con la capacidad del material para absorber y disipar la energía cuando sufre un golpe. Esto depende de la flexibilidad del material, espesor central de la lente, posibles tratamientos adicionales, su graduación, es decir, si son lentes positivas o negativas y la velocidad de la carga aplicada^{55,56}. La **resistencia mecánica mínima** se determina mediante el ensayo de caída de bola (*Drop Ball Test*) establecido por la FDA (Food and Drug Administration) en 1970. Este método consiste en dejar caer una bola de acero de 15,88 gramos y 15,88 mm de diámetro desde una altura de 127 cm, de tal forma que cuando la bola impacta sobre la lente, colocada con la cara convexa hacia arriba, llega con una velocidad de unos 5 m/s aproximadamente^{31,56,57}.

Como todas las lentes orgánicas poseen una resistencia mecánica mínima adecuada, si se desea hacer una comparativa entre ellas, se puede determinar la **resistencia mecánica incrementada**, que es un requisito opcional y que, según las normas UNE-EN 166:1995 y UNE-EN 168:1995, se determina mediante el ensayo de caída de una bola de 22 mm de diámetro con una masa de 43 gramos y desde una altura de 127 cm^{56,58,59}. Se considera que las lentes superan los ensayos descritos anteriormente, cuando no sufren ni deformaciones ni fracturas^{10,59}.

Finalmente, aunque en la normativa no hay requisitos relacionados con la dureza de los filtros solares, es importante su determinación para asegurar que el filtro va a aguantar las

operaciones relacionadas con el mecanizado de la lente. La *dureza intrínseca, Shore D*, se puede determinar según la norma UNE-EN ISO 868:2003 midiendo la profundidad de penetración de una aguja bajo una carga determinada en la superficie de la lente, de tal forma que cuanto menos penetre la aguja, más duro será el material, y viceversa. En la dureza influyen también el módulo de elasticidad del material y sus propiedades viscoelásticas⁶⁰.

3. OBJETIVOS

El objetivo global de este trabajo es caracterizar la composición química de una serie de filtros solares adquiridos en establecimientos de Óptica y medir las propiedades que indica la normativa oficial, UNE-EN 1836:2006+A1¹⁰, con objeto de clasificarlos en las categorías correspondientes y comprobar que cumplen los requisitos mínimos requeridos. Para ello, se han establecido los siguientes objetivos parciales:

- Análisis de la *composición química* de los recubrimientos, si los hay, y de los materiales de las lentes mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR-ATR).
- Determinación de *propiedades mecánicas* como dureza y resistencia al impacto, y su relación con la composición química y estructura de cada material.
- *Medida y análisis de los espectros UV-Visible* de las lentes para determinar:
 - La transmisión de luz en las diferentes zonas del espectro, que permite determinar la *categoría* de cada filtro solar y el *factor de protección UV*.
 - El *grado de polarización (P)* en lentes polarizadas.

4. PARTE EXPERIMENTAL

4.1. Materiales

En este estudio se han utilizado 40 parejas de lentes solares, en total 80 lentes, donadas por la Óptica “Virgen del Cortijo” de Madrid. Todas las lentes tienen color uniforme, y el 42,5% son polarizadas. Al no disponer de las características aportadas por el fabricante para cada lente, se ha determinado si son polarizadas o no, situándolas delante de una pantalla LCD, cuya luz está polarizada a 45°, y rotando la lente de tal manera que, en caso de ser una lente polarizada, cuando su eje de polarización es perpendicular al eje de la radiación polarizada de la pantalla, la lente parece oscurecerse por completo.

4.2. Métodos

4.2.1. Caracterización de materiales y recubrimientos mediante espectroscopía infrarroja
La **espectroscopía infrarroja** (IR) permite identificar los **grupos funcionales** presentes en la composición química de un material, ya que cada grupo funcional absorbe radiación IR de una determinada energía.

Los espectros infrarrojos se han realizado en un Espectrofotómetro Infrarrojo con Transformada de Fourier Nicolet iS5, con un accesorio de Reflexión Total Atenuada (ATR) MK II Golden Gate™ Diamond 45°. Los espectros se han medido entre 4000 y 500 cm^{-1} con una resolución de 4 cm^{-1} , promediando 16 barridos. Para procesar los resultados se ha utilizado el software Omnic 8 Thermo Fisher Scientific Inc.

Se ha realizado el espectro de la cara externa de cada lente para identificar el **recubrimiento superficial**, si lo hubiera. A continuación, se ha lijado la cara externa para eliminar el recubrimiento y poder caracterizar el **material de la lente**. En lentes polarizadas se ha medido también la cara interna, de la misma forma que la cara externa, para comprobar si ambos lados de la lente poseen los mismos recubrimientos y materiales.

4.2.2. Dureza

La dureza Shore D se ha medido, con un Durómetro SATRA Technology center, según indica la norma UNE-EN ISO 868⁶⁰. Se han hecho **cinco medidas en la cara externa** de cada lente para después obtener el valor promedio. Cada medida se realiza tras aplicar la carga durante 15 segundos.

4.2.3. Resistencia al impacto

Este ensayo consiste en dejar caer una bola, de diámetro y peso conocidos, a través de un tubo guía de PMMA; al final de éste, se coloca la lente solar con la cara convexa hacia arriba y centrada. El tubo utilizado tiene una longitud de 127 cm y se han utilizado tres bolas de acero, cuyas características se muestran en la *Tabla 2*.

<i>Tabla 2. Características de las bolas de acero utilizadas</i>			
	<i>Bola 1</i>	<i>Bola 2</i>	<i>Bola 3</i>
<i>Diámetro (mm)</i>	15,86	22,23	24,50
<i>Peso (gramos)</i>	16,30	44,79	60,91

La primera bola utilizada, de 15,86 mm de diámetro, corresponde a la **resistencia mecánica mínima** según la FDA, y la bola de 22,23 mm, a la **resistencia mecánica incrementada** según las normas UNE EN 168:1995 y UNE EN 166:1995^{31,58,59}. Con respecto a la bola de 24,50 mm, se ha utilizado para realizar una comparativa entre los materiales, ya que algunos de ellos resistían el impacto de las bolas más pequeñas.

4.2.4. Propiedades ópticas: caracterización ultravioleta-visible

Para determinar la transmisión de luz (transmitancia) en las diferentes regiones del espectro y el factor de protección UV, se ha utilizado un Espectrofotómetro UV-VIS Shimadzu 2401 PC con un accesorio de reflectancia difusa Shimadzu ISR-240^a, con una esfera integradora, y se ha seguido la Norma Europea EN ISO 13468-2:2006⁶¹.

Para obtener el porcentaje de transmisión de luz (T) en el visible, UV-B y UV-A de cada una de las lentes, se comparan las áreas de cada espectro con el área del espectro del aire que transmite el 100% de la radiación en todas las zonas del espectro UV-Visible.

Aunque la **transmitancia** de un material depende de su **espesor**, como indica la ley de Lambert-Beer⁶², en este trabajo no se ha realizado la normalización con el espesor debido a que se pretende caracterizar las lentes tal y como se comercializan. No obstante, se han medido los espesores de todos los filtros con un calibre TESA: Twin-Cal Tesa IP40 150 SQ y los resultados, en mm, se recogen en las *Tablas 4 y 5, Anexo I*.

A partir de la transmitancia, entre 200 y 380 nm, puede determinarse el **factor de protección ultravioleta (PF)** de la lente. Este factor se define como la inversa de la transmitancia en el UV (*Ecuación 1*), por lo que un valor bajo de transmitancia dará un factor de protección alto y, por tanto, un filtro solar de alta calidad²².

$$PF = 100/T(\%)$$

Ecuación 1. Factor de protección ultravioleta

Para caracterizar los filtros solares polarizados, se han utilizado dos polarizadores cedidos por el departamento de Óptica de la Facultad de Óptica y Optometría. Así, en las **lentes polarizadas** se han hecho dos espectros de cada una, colocando polarizadores a la salida del haz de luz del espectrofotómetro para que la luz que llega a las lentes sea polarizada, de tal forma que se han hecho medidas con el **eje del polarizador en horizontal y en vertical**; así, cuando el eje del polarizador es perpendicular al eje del polarizador de la lente, la transmisión debería ser mínima, y cuando los ejes del polarizador y del filtro polarizado son paralelos la transmisión es máxima.

A partir de las medidas anteriores se ha calculado el **grado de polarización (P)** según la Norma Europea UNE-EN ISO 1836:2006+A1¹⁰ que se define como (*Ecuación 2*):

$$P = \frac{\tau_{pm\acute{a}x.} - \tau_{pm\acute{i}n.}}{\tau_{pm\acute{a}x.} + \tau_{pm\acute{i}n.}}$$

Ecuación 2. Cálculo del grado de polarización¹⁰

Siendo $\tau_{pm\acute{a}x.}$ y $\tau_{pm\acute{i}n.}$ la transmisión máxima y mínima en el visible con la radiación linealmente polarizada, respectivamente¹⁰.

Este **grado de polarización (P)** será igual a 1 cuando el filtro polarizador bloquee en un 100% la radiación polarizada; en cambio, un valor del grado de polarización cercano a 0 significará que el filtro polarizador no cumple bien su función, ya que la transmisión en el plano de polarización es muy similar a la transmisión máxima y no elimina esa radiación.

4.3. Resultados y discusión

Con objeto de procesar y explicar mejor los resultados obtenidos, las 40 lentes con las que se ha trabajado se han dividido en dos grupos que incluyen los **filtros no polarizados** y los **filtros polarizados**, respectivamente (*Tablas 4 y 5, Anexo 1*).

4.3.1. Caracterización de los materiales mediante espectroscopía infrarroja

Para caracterizar la composición química de las lentes, se ha realizado un primer **espectro FTIR** de la superficie externa de las lentes que permite determinar la presencia o ausencia de **recubrimientos de dureza (RD)** o de otra capa de material y, posteriormente, se ha lijado la superficie para eliminar, en su caso, el tratamiento superficial y poder analizar el **material base** de la lente.

Los resultados han mostrado que los materiales base de los **filtros no polarizados** con los que se ha trabajado son: PC BPA (41%), CR-39 (35%), PMMA (12%), Trivex (6%) y vidrio mineral (6%). En la *Fig. 16*, se muestran los espectros de los materiales orgánicos que se han identificado. En la parte superior se muestra el espectro del **CR-39**, en el que cabe destacar las bandas atribuidas a la vibración de tensión de los enlaces C-H entre 3000-2800 cm^{-1} y a la deformación de los mismos, entre 1460-1300 cm^{-1} . La banda a 1735 cm^{-1} se asigna a la vibración de tensión del doble enlace C=O del grupo carbonato y las bandas correspondientes a los enlaces C-O-C aparecen a 1235 cm^{-1} , 1132 cm^{-1} , 1088 cm^{-1} y 1020 cm^{-1} ⁶³.

En segundo lugar, se muestra el espectro IR del **PC BPA**, que es bastante similar al de CR-39, pero destacan algunas diferencias relacionadas con su diferente composición química. En este caso, la banda de absorción correspondiente al doble enlace C=O del grupo carbonato aparece

a 1780 cm^{-1} , debido a que su entorno químico es diferente al de CR-39. Además, se observan bandas que indican la presencia de anillos aromáticos a 3050 cm^{-1} , 1610 cm^{-1} , 1510 cm^{-1} y 830 cm^{-1} . Finalmente, el intervalo de absorciones entre 1300 cm^{-1} y 1150 cm^{-1} se atribuye a la vibración de tensión de los enlaces C-O-C del grupo carbonato⁶⁴.

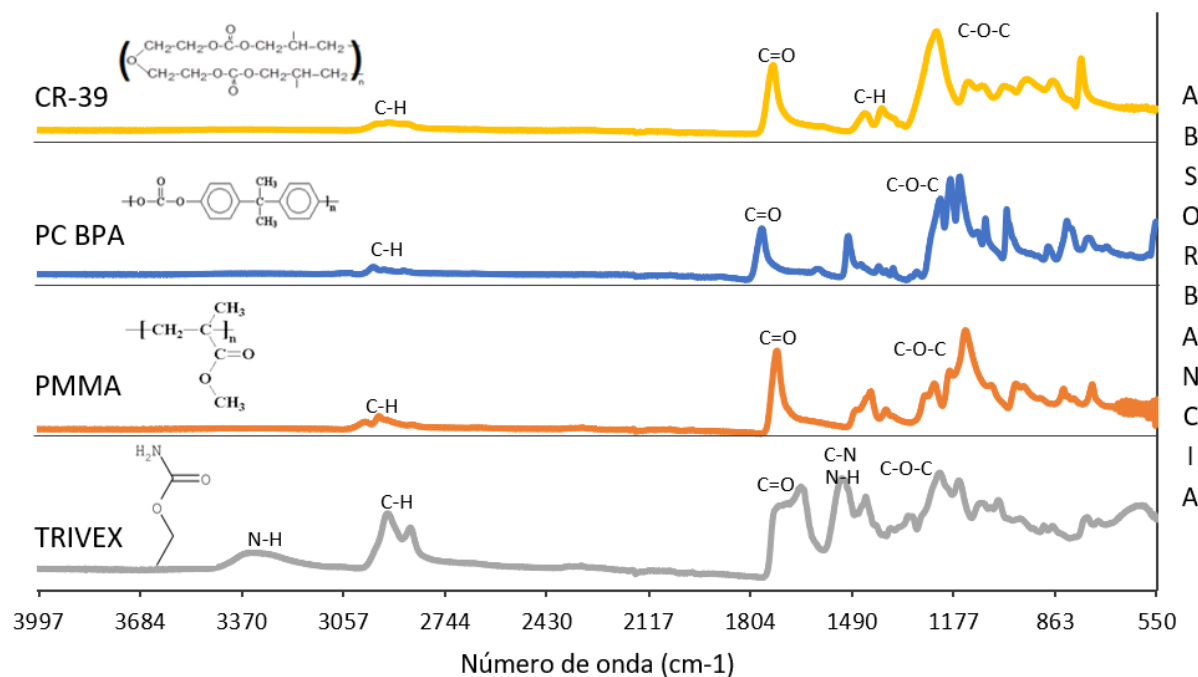


Fig. 16. Espectros FTIR-ATR de CR-39, PC BPA, PMMA y Trivex

El espectro correspondiente a las lentes de **PMMA** es bastante parecido a los dos anteriores, pero muestra diferencias que permiten reconocer al material; en este caso, el doble enlace C=O del grupo éster aparece a 1732 cm^{-1} , y las bandas entre $1149\text{--}1242\text{ cm}^{-1}$ se asignan a la vibración de tensión los enlaces C-O-C del grupo éster^{63,65}.

Finalmente, el espectro mostrado en la parte inferior de la Fig. 16 corresponde al material **Trivex** que, como se ha explicado en el apartado 2.1, es un poliuretano ligeramente reticulado con diaminas aromáticas voluminosas. Este espectro muestra bandas características a 3322 cm^{-1} (vibración de tensión del enlace N-H), 2925 y 2853 cm^{-1} (vibración de tensión asimétrica y simétrica de los enlaces C-H); además, a 1647 cm^{-1} presenta una banda con un hombro muy marcado a 1710 cm^{-1} que, según la bibliografía, se asigna a la vibración de tensión del grupo carbonilo en los poliuretanos (banda amida I). Asimismo, cabe citar la banda que aparece a 1520 cm^{-1} y que corresponde al acoplamiento de las vibraciones de tensión de los enlaces N-H y C-N (amida II). Finalmente, las bandas del intervalo $1300\text{--}1150\text{ cm}^{-1}$ se atribuyen a la vibración de tensión de los enlaces C-O-C^{66,67}.

Por último, en el grupo de *lentes no polarizadas*, también se han caracterizado lentes de *vidrio mineral*, cuyo espectro (parte superior de la Fig. 17) muestra una banda a 726 cm^{-1} y otra, muy ancha, que tiene un máximo alrededor de 900 cm^{-1} y un hombro a 1100 cm^{-1} ; todas estas bandas se asignan a diferentes modos de vibración de los enlaces Si-O de la estructura del vidrio^{68,69}.

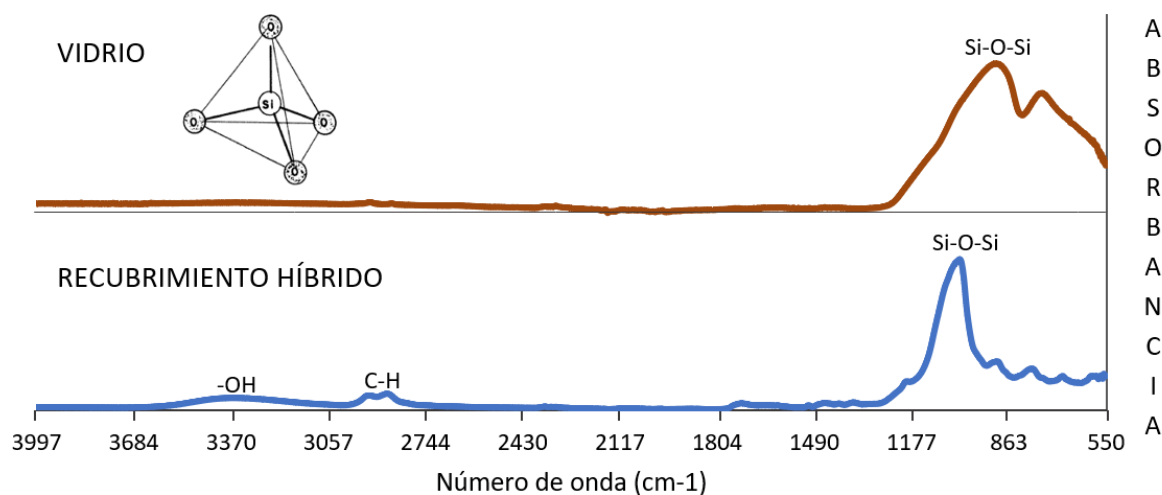


Fig. 17. Espectros FTIR-ATR de vidrio mineral y recubrimiento de dureza híbrido

En cuanto a los resultados obtenidos al analizar la superficie de los *filtros no polarizados*, se ha comprobado la existencia de recubrimiento de dureza en todas las lentes, excepto en las de vidrio mineral que, como se ha explicado en el apartado 2.1, es un material que posee una alta resistencia al rayado, y en las lentes de CR-39 en las que el recubrimiento de dureza es opcional, ya que su alto grado de reticulación aumenta la dureza del material.

El espectro del *recubrimiento de dureza*, identificado en los filtros no polarizados (parte inferior de la Fig. 17), presenta las bandas de absorción características del enlace Si-O-Si alrededor de 1000 cm^{-1} y bandas entre $2900\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$ y entre $3500\text{-}3100\text{ cm}^{-1}$ correspondientes a la vibración de tensión de los enlaces C-H y -OH, respectivamente. Este resultado hace pensar que se trata de un recubrimiento híbrido orgánico-inorgánico como los descritos en el apartado 2.1^{41,42}.

En los *filtros polarizados*, una vez lijada la superficie, se ha comprobado que los materiales con los que están fabricados son *TAC* (95%) y *vidrio mineral* (5%). Además, en estas lentes se ha analizado también la cara interna, ya que al ser una estructura multicapa, se pueden encontrar varias combinaciones de materiales como se ha explicado en el apartado 2.3.

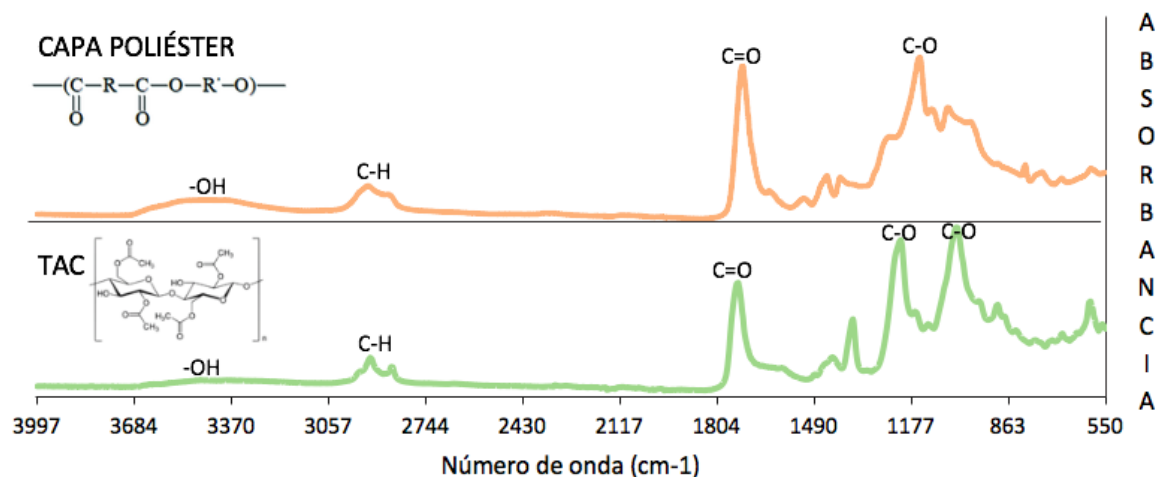


Fig. 18. Espectros FTIR-ATR de TAC y recubrimiento poliéster

El espectro del **TAC**, representado en la parte inferior de la Fig. 18, se caracteriza por presentar bandas que se corresponden con la vibración de los grupos -OH, C-H y C=O entre 3500-3100 cm^{-1} , entre 2900-2800 cm^{-1} y a 1740 cm^{-1} , respectivamente. También aparecen bandas a 1220 cm^{-1} y 1035 cm^{-1} , asignadas a la vibración de los enlaces sencillos C-O-C⁷⁰.

Por otra parte, los espectros realizados en las dos caras (externa e interna) de las lentes sin lijar muestran que un 9% de los filtros llevan un **RD híbrido** como el identificado anteriormente en los filtros no polarizados. Sin embargo, los espectros del 91% de las **lentes polarizadas** sin lijar muestran la presencia de un material orgánico, diferente al TAC, en las caras exterior e interior. En la parte superior de la Fig. 18 se observa el espectro de este material en el que se observa una banda característica de grupos éster a 1735 cm^{-1} . Este espectro se ha introducido en la base de datos “Hummel Polymer Sample Library” que lo ha identificado como un **poliéster insaturado** con una probabilidad del 71%. Este resultado hace pensar en la presencia de una capa de poliéster insaturado en ambas caras de la lente, que aportaría una mayor dureza al material, ya que cabe la posibilidad de que los dobles enlaces den lugar a cierto grado de reticulación. Así pues, estas lentes tendrían una estructura de cuatro capas que rodean al filme polarizante⁵⁰.

Respecto a la **lente polarizada** de vidrio mineral, su espectro FTIR presenta las mismas bandas de absorción, correspondientes a los modos de vibración de los enlaces Si-O, que el espectro de la lente de vidrio no polarizada, por lo que no se muestra aquí.

Finalmente, como se ha indicado en el apartado 2.3, el **filme polarizante** es, en la mayoría de los casos, **PVA teñido con yodo**, pero no ha sido posible realizar su espectro porque nuestro método de medida no permite acceder a él. Para caracterizar más detalladamente la

composición química y estructura de estos *filtros polarizados*, estaba previsto utilizar espectroscopía Raman con microscopio confocal, que permite analizar “in situ” cada una de las capas, pero la situación actual de estado de alarma provocada por COVID-19 no lo ha permitido.

4.3.2. Propiedades mecánicas: dureza y resistencia al impacto

En primer lugar, se ha analizado la *dureza intrínseca (Shore D)*, que influye en la fabricación de las lentes ya que cuanto mayor sea su valor, mejor será la trabajabilidad del material. Además, esta propiedad está estrechamente ligada con la calidad óptica de las lentes, ya que cuanto más elevado es su valor, mayor suele ser la resistencia al rayado y a la abrasión de las superficies⁴¹.

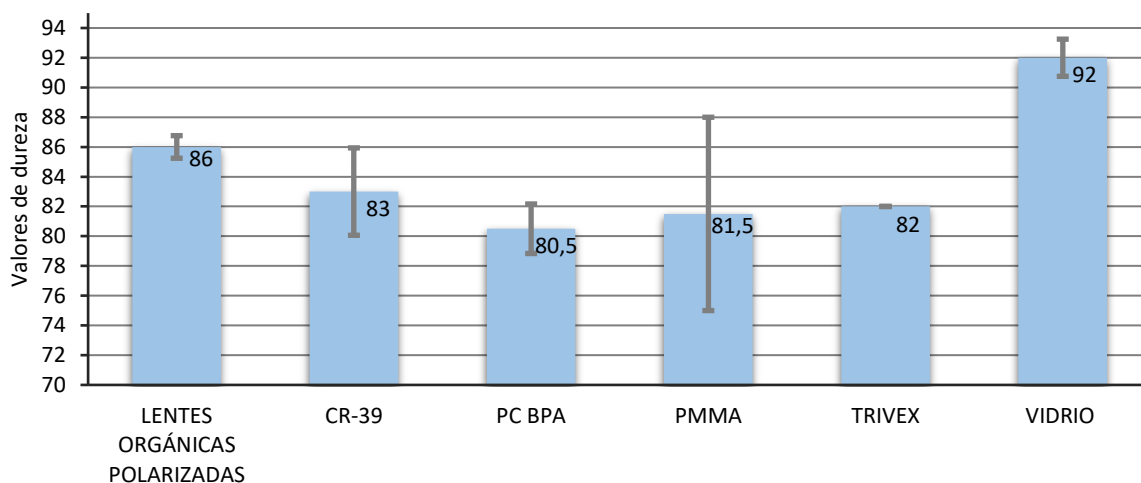


Fig. 19. Valores promedios de la dureza Shore D de los filtros solares

En la Fig. 19, se muestra el diagrama de barras con los valores promedio de la *dureza Shore D* de todos los filtros solares. Como cabía esperar, el mayor valor corresponde al *vidrio mineral*, lo que se explica por el elevado número y la fortaleza de los enlaces Si-O de su estructura tridimensional^{39,40}. En cambio, los filtros fabricados con materiales plásticos tienen una dureza inferior a la del vidrio mineral. En este grupo, se observa que los mayores valores promedios de dureza corresponden a las lentes polarizadas y a las fabricadas con CR-39. Estos resultados son fáciles de explicar en el caso del *CR-39* ya que, como se ha explicado en el apartado 2.1, es un polímero con alto grado de reticulación, que aumenta la resistencia a la penetración^{71,72}.

En el caso de las *lentes polarizadas*, hay que tener en cuenta que, según los resultados obtenidos mediante espectroscopía FTIR, la mayor parte de ellas tiene una estructura multicapa con un poliéster insaturado en el exterior, *TAC* en las capas internas y *PVA* en el

centro; por lo tanto, se puede pensar que, además de la estructura laminada, el poliéster insaturado del exterior, que puede tener cierto grado de reticulación, es el responsable del valor de la dureza⁵⁰.

En relación con el material *Trivex*, tiene una dureza ligeramente inferior a la del CR-39, lo que está de acuerdo con la composición química y estructura del material, descritas en el apartado 2.1, ya que se trata de un polímero ligeramente reticulado, con cadenas largas y flexibles que pueden disminuir ligeramente el valor de su dureza³⁷. Por último, los materiales con menor dureza son el *PMMA* (con error muy elevado en las medidas) y el *PC BPA*, lo que concuerda con el carácter lineal de su estructura³⁴.

En cuanto a los resultados obtenidos al medir la *resistencia al impacto*, en la *Tabla 3* se detallan los ensayos realizados y el porcentaje de lentes de cada material que los han superado.

<i>Tabla 3. Resultados de resistencia al impacto</i>					
	Nº	Espesor central medio (mm)	Pasan bola 16 mm (%) E=0,20 J	Pasan bola 22 mm (%) E=0,56 J	Pasan bola 24,5 mm (%) E=0,76 J
Lentes polarizadas orgánicas	22	0,95	100%	100%	100%
CR-39	6	1,90	83%	50%	17%
PC BPA	7	2,00	100%	100%	100%
PMMA	2	1,90	50%	0%	-
TRIVEX	1	2,20	100%	100%	100%
VIDRIO	2	1,90	50%	0%	-

En primer lugar, hay que destacar que la mayoría de los filtros orgánicos y el de vidrio mineral polarizado poseen la *resistencia mecánica mínima* exigida en la normativa para filtros solares^{10,57}. Además, con objeto de comparar la resistencia al impacto de todos los materiales utilizados en este trabajo, se ha realizado el mismo ensayo con bolas de 22 mm (*resistencia mecánica incrementada*) y 24,5 mm de diámetro.

El 100% de los filtros polarizados orgánicos (a pesar de su bajo espesor) y de los fabricados con PC BPA y Trivex resisten todos los ensayos. En el caso de las *lentes orgánicas polarizadas*, hay que tener en cuenta factores como su estructura multicapa, que amortigua el

impacto, y la presencia de polímeros lineales, como el **TAC**, con buena movilidad molecular que contribuyen a disipar la energía del impacto⁷¹.

Por otra parte, el **PC BPA** es conocido por ser el material con mayor resistencia al impacto ya que su estructura lineal, con fuerzas intermoleculares de tipo dipolar débiles, y la flexibilidad de los enlaces -C-O- compensan la rigidez de los anillos aromáticos, permitiendo movimientos moleculares para absorber y disipar la energía del impacto⁷³.

Finalmente, el **Trivex**, como se ha mencionado anteriormente, tiene una muy elevada resistencia al impacto, debido a su bajo grado de reticulación y a la presencia de segmentos de cadenas largos y flexibles, que son capaces de disipar la energía del impacto⁷⁴.

En cuanto al **PMMA**, es un material que tiene buena resistencia al impacto, incluso 7 veces mejor que el vidrio⁷⁵, debido a su estructura lineal. Pero, en este ensayo, se ha observado una resistencia al impacto del PMMA equivalente a la del vidrio. Esto puede deberse al número limitado de muestras ensayadas, a posibles defectos y tensiones en la fabricación de estos materiales o incluso al envejecimiento, que provoca roturas en los enlaces disminuyendo el peso molecular y haciendo que las cadenas se recombinen aumentando el grado de reticulación y, por ello, disminuyendo la resistencia al impacto.

Por otra parte, llama la atención el hecho de que sólo un 83% de los filtros de **CR-39** posee resistencia mecánica mínima, pero hay que tener en cuenta que se han ensayado pocas lentes y que cualquier defecto de alguna de ellas puede falsear los resultados. El 50% de las lentes de este material supera el ensayo de resistencia mecánica incrementada y el 17% supera la caída de bola de 24,5 mm. Estos resultados son coherentes con su estructura altamente reticulada, que dificulta la movilidad molecular y por tanto disminuye la resistencia al impacto^{71,76}.

Por último, hay que destacar que el filtro de **vidrio mineral no polarizado** no cumple el requisito de resistencia mecánica mínima y se rompe con la bola de 16 mm. Este resultado está de acuerdo con lo esperado, ya que se trata de un material frágil, debido a que su estructura covalente tridimensional es rígida y, por tanto, no permite la movilidad molecular o la flexión de enlaces para disipar la energía, por lo que, se rompe en fragmentos muy pequeños y astillados. Sin embargo, la lente de **vidrio mineral polarizado** supera el ensayo de caída de bola de 16 mm, lo que se puede justificar si se tiene en cuenta que las lentes polarizadas de vidrio mineral constan, en general, de dos capas de vidrio, unidas mediante una lámina de **filme polarizante** plástico (PVA); esta estructura hace que aumente la resistencia al impacto por la flexibilidad de la lámina plástica que actúa como un amortiguador y, porque

una o las dos capas de vidrio suelen estar securizadas. Además, en caso de rotura, los fragmentos peligrosos del vidrio quedan adheridos al filme polarizador, por lo que se reduce el riesgo de lesiones físicas^{7,8,77}.

4.3.3. Propiedades ópticas

Finalmente, y con objeto de caracterizar los filtros solares, atendiendo a los requisitos ópticos establecidos en la norma UNE EN 1836:2006+A1¹⁰, se han realizado los espectros UV-Visible de todas las lentes y, a partir de ellos, se han obtenido los valores de la transmisión en el UV-B, UV-A y en el visible. Además, se ha calculado el **factor de protección UV** y, en el caso de los filtros polarizados, también se ha calculado el **grado de polarización**.

Empezando por las **lentes no polarizadas**, y atendiendo a su transmisión UV-Visible, todas ellas, excepto la lente 4, ofrecen una **buena protección UV**, ya que absorben totalmente esta parte de la radiación, como puede verse en la Fig. 20.

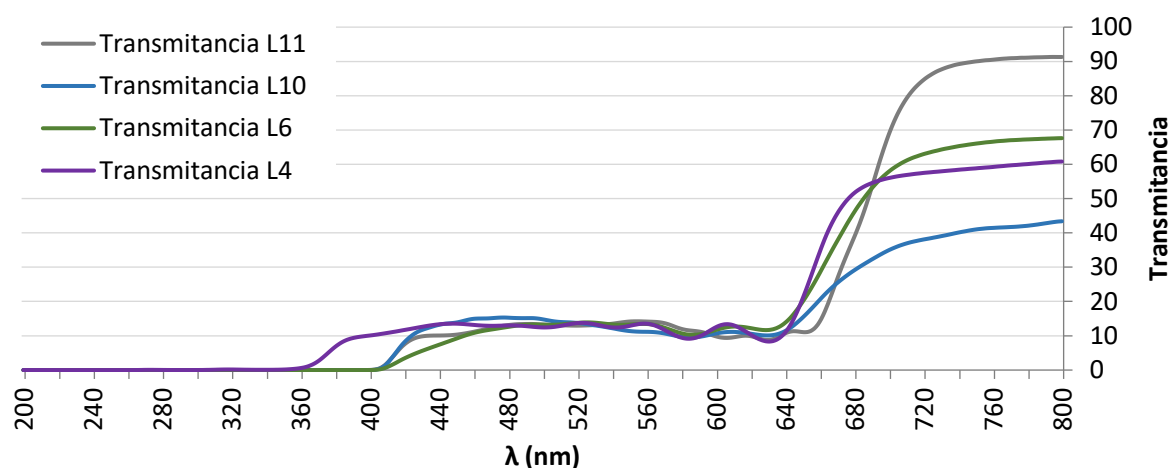


Fig. 20. Espectros UV-Visible de lentes no polarizadas

Se ha calculado el **factor de protección UV (PF)** (ecuación 1), partiendo de los datos de la transmisión entre 200 y 380 nm (Tabla 4, Anexo 1). Los resultados permiten concluir que todas las lentes, excepto la 4, tienen un factor de protección UV alto, superior a 50, por lo que protegen las estructuras oculares frente a la radiación UV. En cuanto a la lente 4, es la única que tiene un factor de protección menor (PF= 1,7), esto se debe a que, como puede verse en la Fig. 20, deja pasar una pequeña cantidad de radiación UV entre 360 y 400 nm.

A continuación, las lentes, tanto polarizadas como no polarizadas, han sido clasificadas en las *categorías de filtros solares*, según la norma UNE-EN ISO 1836:2006+A1¹⁰, en base a su transmitancia en el visible (*Tablas 4 y 5, Anexo 1*) y en UV-B y UV-A ($\leq 1\%$ en todos los casos).

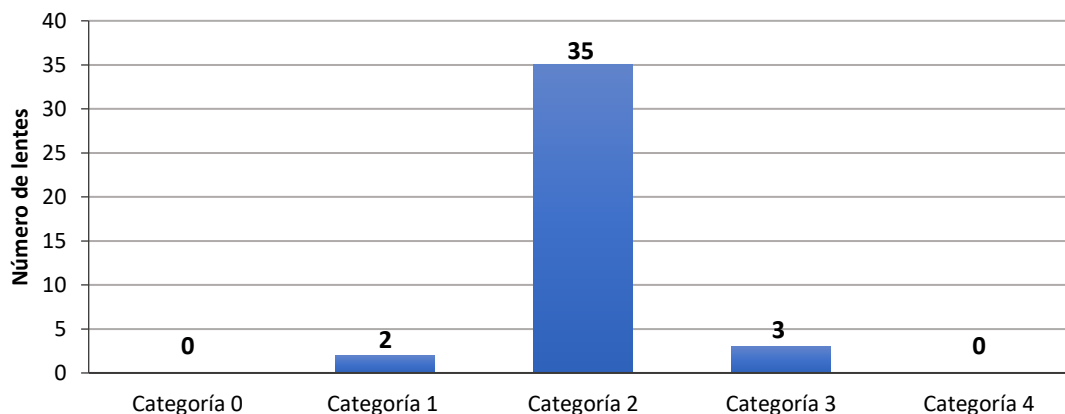


Fig. 21. Clasificación de las lentes en categoría de filtros solares

En la Fig. 21 se presenta un diagrama de barras con los resultados correspondientes. Se observa que la mayoría de las lentes (el 87,5%) pertenecen a la *categoría 2*, es decir, están indicadas para niveles de luminosidad media, el 7,5% de las lentes son de *categoría 3*, mientras que el 5% son lentes indicadas para luminosidad solar atenuada, es decir, se incluyen en la *categoría 1*¹⁰.

Además, en las lentes polarizadas, se ha determinado el *grado de polarización (P)* utilizando la *ecuación 2*; para ello se han medido dos espectros para cada filtro (Fig. 22), uno correspondiente a la *transmitancia máxima* y el otro a la *transmitancia mínima*, colocando el eje del polarizador paralelo o perpendicular al eje del polarizador de la lente, respectivamente, como se ha explicado en el apartado 4.2.4.

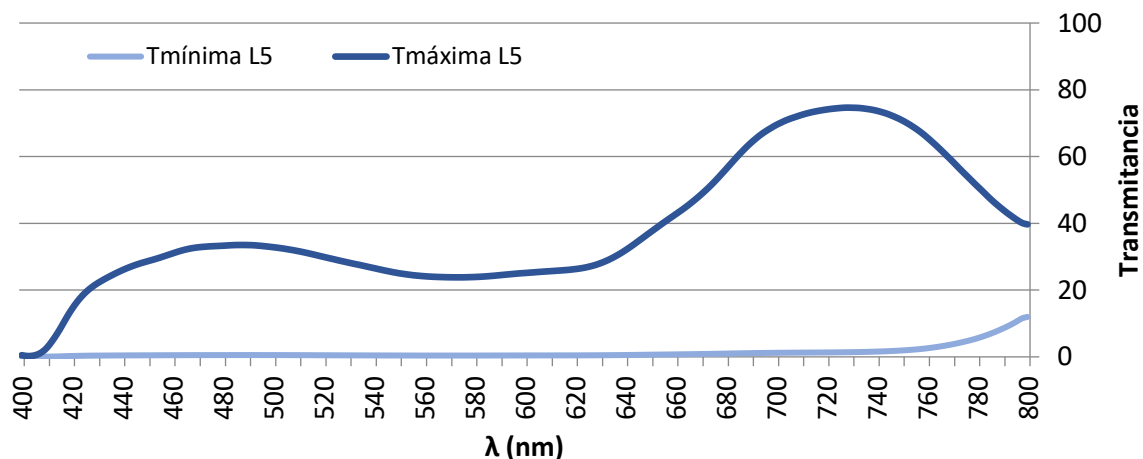


Fig. 22. Espectros UV-Visible de la $T_{m\acute{a}xima}$ y $T_{m\acute{i}nima}$ de lentes polarizadas

Los resultados del *grado de polarización (P)* se muestran en la *Fig. 23*, donde se observa que todas las lentes, excepto tres, tienen el grado de polarización entre 0,90 y 1,0. Esto significa que absorben la mayor parte de la radiación parcialmente polarizada que pueda incidir sobre las lentes, mejorando el contraste y la visión del usuario en ambientes en los que pueda haber luz polarizada, además de atenuar la luz visible y evitar el deslumbramiento.

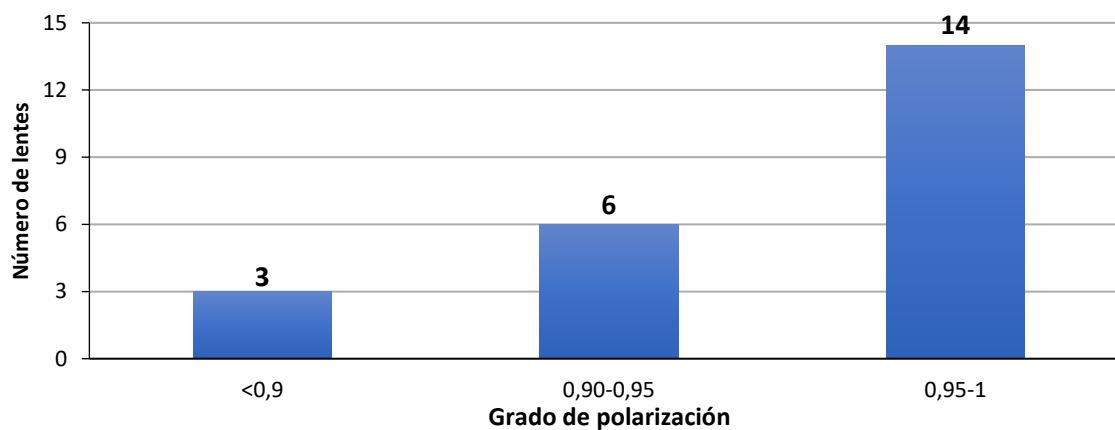


Fig. 23. Clasificación según el grado de polarización de las lentes

5. CONCLUSIONES

A continuación, se exponen las principales conclusiones deducidas de este trabajo:

- A partir de la revisión bibliográfica realizada, se deduce la urgente necesidad de unificar el *límite UV-Visible en 400 nm* en todas las Normativas y Organismos nacionales e internacionales con el fin de conseguir una mejor protección, en este caso de los órganos oculares, frente a toda la radiación UV. Asimismo, se debe *potenciar el uso de lentes de protección solar* para todas las franjas de edad, especialmente en niños, y durante todo el año.
- En este estudio, se ha determinado que predomina el uso de *materiales orgánicos* en la fabricación de filtros solares sobre los materiales minerales (relación 1:20). En filtros solares orgánicos el material más utilizado es el PC BPA, seguido del CR-39.
- Un porcentaje importante (57,5%) de las lentes son *polarizadas*. Todas las lentes orgánicas polarizadas estudiadas contienen dos capas de TAC y, de estas, el 91% llevan otras dos capas de un *poliéster insaturado*, constituyendo una estructura multicapa que les confiere unas propiedades mecánicas óptimas.
- Las lentes fabricadas con PC BPA, PMMA y Trivex, y el 9% de las lentes polarizadas orgánicas, llevan un *recubrimiento de dureza híbrido orgánico-inorgánico*. En lentes de CR-39 y de vidrio mineral no se ha identificado ningún tratamiento de dureza; en el caso

del vidrio no es necesario por su elevada dureza intrínseca y, en el caso de CR-39, es opcional, debido a que su estructura altamente reticulada le aporta una moderada resistencia al rayado.

- Las lentes con mayor **dureza intrínseca** son las de vidrio mineral, debido a los enlaces Si-O de su estructura; seguidas de las lentes polarizadas orgánicas, a causa de su estructura multicapa y a la presencia de un poliéster insaturado que puede presentar cierto grado de reticulación, confiriéndole mayor dureza.
- La mayoría de los filtros estudiados cumplen el requisito mínimo de **resistencia al impacto**, ya que superan el ensayo de caída de bola de 16 mm de diámetro. Las lentes con mejor resistencia al impacto son las fabricadas con PC BPA y Trivex y las lentes polarizadas orgánicas, ya que las estructuras de estos materiales permiten movimientos moleculares que disipan la energía del impacto. Estas lentes resisten a todos los ensayos de resistencia mecánica incrementada, por lo que son las más seguras.
- Las **lentes de vidrio polarizadas** son más seguras, en caso de impacto, que las de vidrio sin polarizar, ya que, en caso de fractura, los fragmentos de vidrio quedan adheridos al filme polarizante y no salen despedidos, suponiendo un menor riesgo para las estructuras oculares.
- Todas las lentes, excepto una, tienen un **factor de protección frente al UV de 50+**, por lo que eliminan la radiación UV en su totalidad. El 87,5% de las lentes se clasifican como filtros de **categoría 2**, indicadas para situaciones de luminosidad solar media.
- Todas las lentes polarizadas, excepto tres, tienen un **grado de polarización de entre 0,9 y 1**, por lo que eliminan casi en su totalidad la radiación parcialmente polarizada que pueda incidir en ellas, mejorando de forma notable la visión de los usuarios en ambientes exteriores.

6. BIBLIOGRAFÍA

- 1 Yoshinaga PD. The Eye and Electromagnetic Radiation. 2013.<http://www.who.int/uv/publications/en/Intersunguide.pdf> (Accesed: 25th March 2020).
- 2 Mead, M N. Beneficios de la Luz Solar: Un Punto Brillante para la Salud Humana. *Cienc Trab* 2009; **11**: 7–14.
- 3 Guisasola L. Lentes de protección a las radiaciones. In: *Tecnología óptica. Lentes oftálmicas, diseño y adaptación*. Ediciones UPC, 2001, pp 231–239.
- 4 Cappuccitti R. Sunwear and the science of light. *Optom Times* 2016; **March**: 32–35.
- 5 Meslin D. Compendio de Óptica Oftálmica. Materiales y Tratamientos. Essilor Acad. Eur. 2010.<http://www.essiloracademy.eu/sites/default/files/publications/Materials-and-Treatments-Spanish/files/basic-html/page5.html> (Accesed: 20th September 2002).
- 6 Sliney DH. Sunglasses: their effectiveness. *Laser Noncoherent Light Ocul Eff Epidemiol Prev Treat III* 2003; **4953**: 164–176.
- 7 Tuchinda C, Srivannaboon S, Lim HW. Photoprotection by window glass, automobile glass, and sunglasses. *J Am Acad Dermatol* 2006; **54**: 845–854.
- 8 Shaban M, Almutawa F. Photoprotection by Glass. In: Wang SQ, Lim HW (eds). *Principles and Practice of Photoprotection*. Springer International Publishing, 2016, pp 429–437.
- 9 Safe in the sun: UV-protection and filter categories for sunglasses. <https://www.misterspex.co.uk/sunglasses-guide/uv-protection-and-filter-categories> (Accesed: 15th April 2020).
- 10 UNE-EN 1836:2006+A1. Protección individual del ojo. Gafas de sol y filtros de protección contra la radiación solar para uso general y filtros para la observación directa del sol. 2008.
- 11 Rabbetts R, Sliney D. Technical Report: Solar Ultraviolet Protection from Sunglasses. *Optom Vis Sci* 2019; **96**: 523–530.
- 12 Behar-Cohen F, Baillet G, de Agyuavives T, Garcia PO, Krutmann J, Peña-García P *et al*. Ultraviolet damage to the eye revisited: Eye-sun protection factor (E-SPF®), a new ultraviolet protection label for eyewear. *Clin Ophthalmol* 2014; **8**: 87–104.
- 13 Puell MC. ‘Sensibilidad luminosa espectral del sistema visual’. Facultad de Óptica y Optometría, UCM. Madrid, 2018.
- 14 Kourkoumelis N, Tzaphlidou M. Eye Safety Related to Near Infrared Radiation Exposure to Biometric Devices. *Sci World J* 2011; **11**: 520–528.
- 15 Janjan NA. Radiation effects on the eye. *Clin Plast Surg* 1993; **20**: 535–549.
- 16 Masili M, Duarte FO, White CC, Ventura L. Degradation of sunglasses filters after long-term irradiation within solar simulator. *Eng Fail Anal* 2019; **103**: 505–516.
- 17 Bouvier L. Proteger los ojos de los niños cada día con Crizal Prevencia® versión junior. *Points Vue* 2014; **71**: 70–76.
- 18 Soederberg PG, Michael R, Ayala M, Wu J, Loeffgren S, Merriam J *et al*. The optimum sunglass filter? In: *Ophthalmic Technologies IX*. 1999, p 71.

- 19 Smick K, Villette T, Boulton ME, Brainard GC, Jones W, Karpecki P *et al.* Riesgo de la luz azul: nuevos hallazgos y nuevos enfoques para preservar la salud ocular. *Points Vue* 2013; **Marzo**: 1–7.
- 20 Herrero Sinovas A. *Optimización de la visión ante el deslumbramiento. Trabajo Fin de Grado. Facultad de Ciencias, Universidad de Valladolid.* 2019.
- 21 Kraust JA, Monica ML, Campbell RC, Vinger PF, Key JE, Kendall K. When patients ask about sunglasses, what do you tell them and on what do you base your recommendations? *Ann Ophthalmol* 2000; **32**: 8–10.
- 22 Suárez CCH. Determinación de la fotoprotección de lentes de sol fotocromáticos, polarizados y de policarbonato. *Av en Energías Renov y Medio Ambient* 2011; **15**: 147–155.
- 23 Backes C, Religi A, Moccozet L, Behar-Cohen F, Vuilleumier L, Bulliard JL *et al.* Sun exposure to the eyes: predicted UV protection effectiveness of various sunglasses. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 2019; **29**: 753–764.
- 24 Mariano Gomes LM, Ventura L, Masili M, Marques da Silva F, Andriotti Momesso G. Solar exposure of sunglasses: aging test display. In: *Proc. SPIE 10474, Ophthalmic Technologies XXXVIII.* 2018, p 59.
- 25 Sliney DH. Photoprotection of the eye - UV radiation and sunglasses. *J Photochem Photobiol B Biol* 2001; **64**: 166–175.
- 26 Beltrán Rico M, Marcilla Gomis A. Tipos de plásticos, aditivación y mezclado. In: *Tecnología de Polímeros.* Publicaciones Universidad de Alicante, 2011, pp 57–84.
- 27 Pawar E. A Review Article on Acrylic PMMA. *IOSR J Mech Civ Eng* 2016; **13**: 1–4.
- 28 Akio Ito K, Shunsuke Matsuda O, Yoshinobu Murakami K. United States Patent No.:4,536,267. Plastic lens of neopentyl glycol dimethacrylate copolymerized with methoxy diethylene glycol methacrylate or diethylene glycol dimethacrylate. 1985.
- 29 De Brouwer H, Van Den Bogerd J, Hoover J. Color stability of polycarbonate for optical applications. *Eur Polym J* 2015; **71**: 558–566.
- 30 Brunelle DJ. Advances in Polycarbonates: An Overview. In: Brunelle, D.J and Korn MR (ed). *Advances in Polycarbonates.* ACS Symposium Series, 2005, pp 1–5.
- 31 Martínez JA. Lentes de protección frente a agentes externos. In: *Tecnología óptica. Lentes oftálmicas, diseño y adaptación.* Ediciones UPC, 2001, pp 241–251.
- 32 XYLEX of G.E. Plastics, thanks to its excellent properties, is successfully applied in optics and food packaging. *Plast. World.* 2004. www.plasticworldgr.com (Accessed: 14th March 2020).
- 33 Hala R. Transparent Polyamides. New Engineering plastics for lenses. *Opt World* 2003; **32**: 6–8.
- 34 Brydson JA. *Plastics Materials.* 7th ed. Elsevier, 2017.
- 35 Materiales de Lentes Oftálmicos. <http://www.opticalomar.com/files/Materiales-de-lentes-oftalmicos> (Accessed: 20th September 2003).
- 36 Brueni JL. *More Than Meets The Eye: The Stories Behind the Development of Plastic Lenses.* CR-39 celebrating 50 years. 1997 <http://www.ppgoptical.com/getmedia/47e39594-6472-48e7-8e2c->

- 8f48015284c8/CR39_50years_booklet.pdf.
- 37 Gilles R, Primel O, Leanirith Y. United States Patent Application Pub. No.: US 7,393,880 B2. Radically polymerizable composition resulting in shock resistant organic lenses. 2008.
 - 38 Fernández Rodríguez MM. *Propiedades Ópticas de Vidrios y Recubrimientos Expuestos al Ambiente Espacial: Efectos de la Radiación Gamma. Tesis Doctoral. UAM. Departamento de Física de Materiales; Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)*. 2015.
 - 39 Flores Barreda E, Ochoa Luna R. Control de calidad de sílice para la industria del vidrio. *Rev Química* 1990; **IV**: 123–134.
 - 40 Callister WD. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Editorial Reverté S.A., 2012.
 - 41 de la Orden Hernández MU, Moreno Jiménez F, Pargada Iglesias L, Martínez Urreaga J, Matías Arranz MC. Recubrimientos híbridos antirrayado (I): Naturaleza y obtención. *Ver y oír* 2000; **Marzo**: 113–120.
 - 42 Gilberts J, Tinnemans AHA, Hogerheide MP, Koster TPM. UV curable hard transparent hybrid coating materials on polycarbonate prepared by the sol-gel method. *J Sol-Gel Sci Technol* 1998; **11**: 153–159.
 - 43 Musto P, Abbate M, Lavorgna M, Ragosta G, Scarinzi G. Microstructural features, diffusion and molecular relaxations in polyimide/silica hybrids. *Polymer (Guildf)* 2006; **47**: 6172–6186.
 - 44 de la Orden Hernández MU, Lasagabaster Latorre A, Molina Santos M, Martínez Urreaga J, Arranz MCM. Recubrimientos híbridos antirrayado (II): Adhesión a la lente y medida de la resistencia a la abrasión. *Ver y oír* 2000; **Abril**: 199–205.
 - 45 Artigas Verde JM. ‘Lentes de Protección Ocular’. Tema V. Óptica Oftálmica II. Facultat de Física. Universitat de València. 2019<https://www.uv.es/artigas/oftalm.htm>.
 - 46 de los Santos-Villarreal G, Medellín-Banda DI, Elizalde-Herrera LE, Ávalos Belmonte F. Compuestos fotocromáticos: moléculas inteligentes y con buena memoria. 2012<http://optica-libano.webnode.es/products/lentes-fotocromaticos-transitions-o-sunsensors/> (Accesed: 29th March 2020).
 - 47 Roche JN, Biteau T, Herod S, Setz. United States Patent Application Pub. No.: US 2018/0052267 A1. Polarized lenses obtained by the lamination of a polarized film. 2018.
 - 48 Yasunobu Nakagoshi K. United States Patent Application Pub. No.: US 6,807,006 B2. Method of manufacturing polarized spectacle lens. 2004.
 - 49 Yasunobu Nakagoshi K. United States Patent Application Pub. No.: US 2003/0184863 A1. Method of manufacturing polarized spectacle lens. 2003.
 - 50 Toru Miura N, Norihiko Akutsu S. United States Patent Application Pub. No.: US 2017/0058089 A1. Plastic polarized lens and process for producing same. 2017.
 - 51 Dain SJ, Ngo TPT, Cheng BB, Hu A, Teh AGB, Tseng J *et al*. Sunglasses, the European directive and the European standard. *Ophthalmic Physiol Opt* 2010; **30**: 253–256.
 - 52 Dain SJ. Sunglasses and sunglass standards. *Clin Exp Optom* 2003; **86**: 77–90.

- 53 Magri R, Masili M, Duarte FO, Ventura L. Building a resistance to ignition testing device for sunglasses and analysing data: A continuing study for sunglasses standards. *Biomed Eng Online* 2017; **16**: 1–10.
- 54 UNE-EN ISO 12312-1:2013/A1:2015 Protección de los ojos y cara. Gafas de sol y equipos asociados. Parte 1: Gafas de sol para uso general. 2013.
- 55 Hoskin AK, Philip S, Dain SJ, Mackey DA. Spectacle-related eye injuries, spectacle-impact performance and eye protection. *Clin Exp Optom* 2015; **98**: 203–209.
- 56 Reyes Domínguez JF. Resistencia a los impactos: una mirada óptica. *Cienc Tecnol para la Salud Vis y Ocul* 2013; **11**: 113.
- 57 FDA. Use of impact-resistant lenses in eyeglasses and sunglasses. Electron. code Fed. Regul. Part 801- Subpart H-Special Requir. Specif. Devices 801.410. 2019. <http://www.accessdata.fda.gov/%0Ascripts/cdrh/cfdocs/cfCFR/CFRSearch.cfm?fr=801.410%0A> (Accesed: 6th May 2020).
- 58 UNE-EN 168:1996. Protección individual de los ojos. Métodos de ensayos no ópticos. 1996.
- 59 UNE-EN 166:1996. Protección individual de los ojos. Requisitos. 1996.
- 60 UNE-EN ISO 868:2003. Plásticos y ebonita. Determinación de la dureza de indentación por medio de un durómetro (dureza Shore). 2003.
- 61 UNE-EN ISO 13468-2:1999. Plásticos. Determinación de la transmitancia luminosa total de materiales transparentes. Parte 2: Instrumento de doble haz. 2006.
- 62 Arenas Sosa I, López Sánchez JL. ‘Tema Espectrofotometría de Absorción’. Maestría en Ciencias Químicas. Instituto de Biotecnología. Universidad Nacional Autónoma de México. 2004. http://www.ibt.unam.mx/computo/pdfs/met/espectrometria_de_absorcion.pdf.
- 63 Lounis-Mokrani Z, Fromm M, Barillon R, Chambaudet A, Allab M. Characterization of chemical and optical modifications induced by 22.5 MeV proton beams in CR-39 detectors. *Radiat Meas* 2003; **36**: 615–620.
- 64 Jang BN, Wilkie CA. The Thermal Degradation of Bisphenol A Polycarbonate in Air. *Thermochim Acta* 2005; **426**: 73–84.
- 65 Yang Y, Dan Y. Preparation of PMMA/SiO₂ composite particles via emulsion polymerization. *Colloid Polym Sci* 2003; **281**: 794–799.
- 66 Rosu D, Rosu L, Cascaval CN. IR-change and yellowing of polyurethane as a result of UV irradiation. *Polym Degrad Stab* 2009; **94**: 591–596.
- 67 Asefnejad A, Khorasani MT, Behnamghader A, Farsadzadeh B, Bonakdar S. Manufacturing of biodegradable polyurethane scaffolds based on polycaprolactone using a phase separation method: physical properties and in vitro assay. *Int J Nanomedicine* 2011; **6**: 2375–2384.
- 68 Pérez-Villar S, Tamayo A, Mazo MA, Rubio F, Rubio J. Aplicación de las espectroscopias IR/ATR y Raman al estudio de la superficie de vidrios sometidos a molturación. *Bol la Soc Española Cerámica y Vidr* 2008; **47**: 89–94.
- 69 Serra J, González P, Liste S, Serra C, Chiussi S, León B *et al.* FTIR and XPS studies of bioactive silica based glasses. *J Non Cryst Solids* 2003; **332**: 20–27.

- 70 Murphy D, de Pinho MN. An ATR-FTIR study of water in cellulose acetate membranes prepared by phase inversion. *J Memb Sci* 1995; **106**: 245–257.
- 71 Martínez A, Artús P, Dürsteler López JC, Arencon D. Comportamiento a la fractura de materiales para lentes oftálmicas. *XXV Encuentro del Grup Español Fract* 2008; **2**: 269–274.
- 72 Caum J, Lupón M. Fabricación de lentes oftálmicas. In: *Tecnología óptica. Lentes oftálmicas, diseño y adaptación*. Ediciones UPC, 2001, pp 21–38.
- 73 Chou BR, Gupta A, Hovis JK. The effect of multiple antireflective coatings and center thickness on resistance of polycarbonate spectacle lenses to penetration by pointed missiles. *Optom Vis Sci* 2005; **82**: 964–969.
- 74 Chou BR, Hovis JK. Effect of multiple antireflection coatings on impact resistance of Hoya Phoenix spectacle lenses. *Clin Exp Optom* 2006; **89**: 86–89.
- 75 Ojados Sánchez G. *Resistencia al desgaste y a la abrasión de polímeros técnicos y nanocomposites. Proyecto Fin de Período Formativo de Doctorado. Universidad Politécnica de Cartagena*. 2013.
- 76 Chou BR, Yuen GSC, Dain SJ. Ballistic impact resistance of selected organic ophthalmic lenses. *Clin Exp Optom* 2011; **94**: 568–574.
- 77 Tucker JF. United States Patent Pub. No.: 6,102, 539. Sunglass lens laminate. 2000.
- 78 Colores de la lente. <https://bike.shimano.com/es-ES/technologies/apparel-accessories/eyewear/lens-colors.html> (Accesed: 11th April 2020).

ANEXO 1

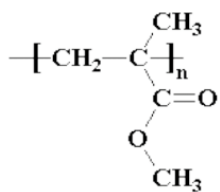


Fig. 5. Estructura del PMMA

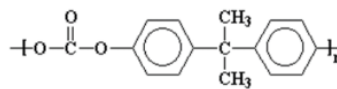


Fig. 6. Estructura del PC BPA

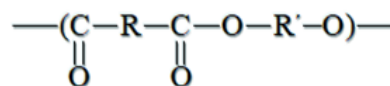
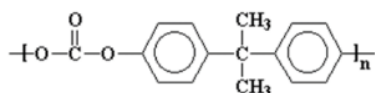


Fig. 7. Xylex = unidad fundamental del PC BPA + unidad fundamental de un poliéster

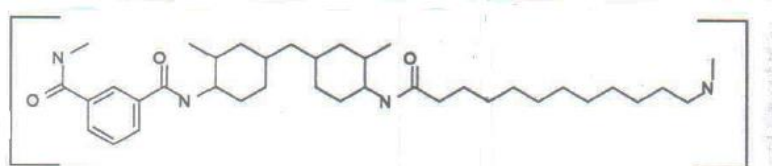


Fig. 8. Ejemplo de poliamida transparente³³

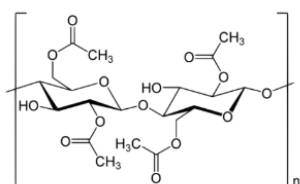


Fig. 9. Estructura del AC

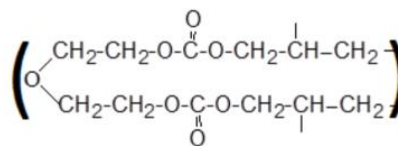


Fig. 10. Estructura del CR-39

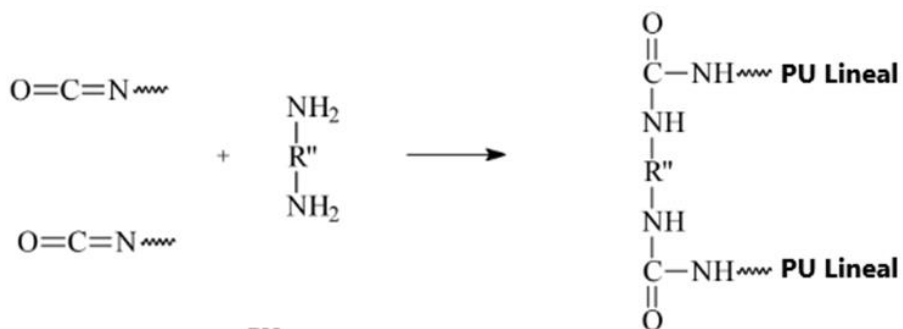


Fig. 11. Esquema de la reticulación del Trivex

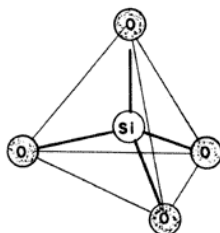


Fig. 12. Unidad estructural de la sílice

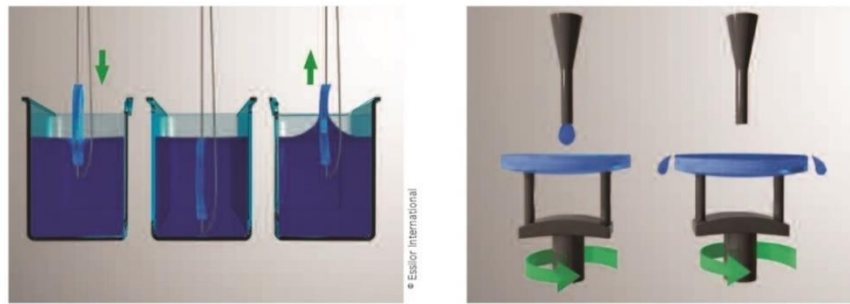


Fig. 13. Métodos de aplicación de tratamiento superficial (de izquierda a derecha: inmersión y centrifugado)⁵

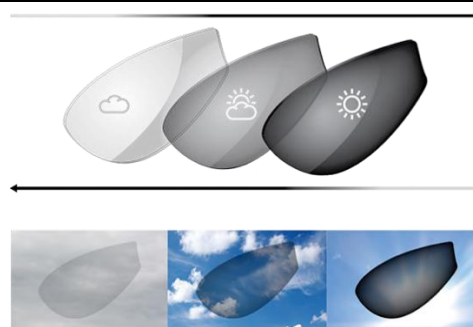


Fig. 14. Activación de tratamiento fotocromico al exponerlo a luz solar⁷⁸

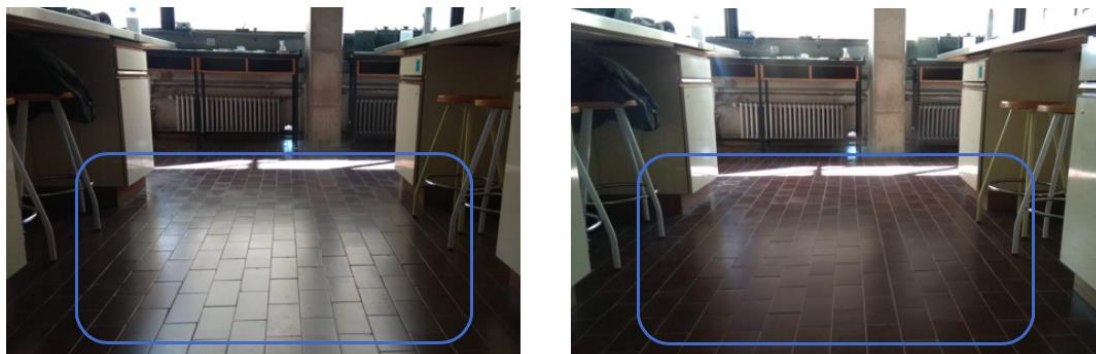


Fig. 15. Comparación de filtro solar no polarizado (izquierda) y filtro solar polarizado (derecha)

Tabla 1. Clasificación de filtros de protección solar

Categoría del filtro	T _{UV-B} (%) 280-315 nm	T _{UV-A} (%) 315-380 nm	T _V (%) 380-780 nm
0	0,1·T _V 8,0-10,0	T _V 80-100	80-100
1	0,1·T _V 4,3-8,0	T _V 43-80	43-80
2	0,1·T _V 1,8-4,3	T _V 18-43	18-43
3	0,1·T _V 0,8-1,8	0,5·T _V 4-9	8-18
4	0,1·T _V 0,3-0,8	0,5·T _V 1,5-4,0	3-8

Tabla 4. Características de las lentes no polarizadas

Lentes no polarizadas	Material sustrato	RD	Espesor (mm)	Dureza (Shore D)	Resistencia al impacto	T (200-380nm) (%)	FP UV	T visible (%)	Categoría del filtro
1	PC BPA	SI	1,8	82,5	Pasa bola de 24,5 mm	1,4	50+	17,5	3
4	PMMA	SI	1,8	88	No pasa ninguna bola	59,4	1,7	25,3	2
6	PMMA	SI	2,05	75	Pasa bola de 16 mm	0	50+	24,7	2
10	PC BPA	SI	1,95	82	Pasa bola de 24,5 mm	0	50+	18,4	2
11	CR-39	NO	1,8	83	Pasa bola de 16 mm	0	50+	28,2	2
17	CR-39	NO	1,6	82,5	No pasa ninguna bola	0	50+	27,6	2
19	PC BPA	SI	2,05	78	Pasa bola de 24,5 mm	0	50+	22,5	2
23	CR-39	NO	1,9	82,5	Pasa bola de 24,5 mm	0	50+	27,8	2
27	CR-39	NO	1,9	87,5	Pasa bola de 22 mm	0	50+	31,3	2
28	CR-39	NO	2,1	85,5	Pasa bola de 22 mm	0	50+	33,9	2
32	PC BPA	SI	2,05	81,5	Pasa bola de 24,5 mm	0	50+	23,1	2
34	TRIVEX	SI	2,2	82	Pasa bola de 24,5 mm	0	50+	33,2	2
36	VIDRIO	NO	1,8	93	No pasa ninguna bola	1,5	50+	13,6	3
39	PC BPA	SI	2,05	78,5	Pasa bola de 16 mm	0,9	50+	29,4	2
40	CR-39	NO	2,2	78	Pasa bola de 16 mm	1	50+	38,6	2
41	PC BPA	SI	2	80,5	Pasa bola de 24,5 mm	0,8	50+	17,6	3
42	PC BPA	SI	2	82	Pasa bola de 24,5 mm	0,6	50+	28	2

Tabla 5. Características de las lentes polarizadas

Lentes polarizadas	Material que rodea al filme	Capa externa	Espesor (mm)	Dureza (Shore D)	Resistencia al impacto	T _{máx} Vis (%)	T _{mín} Vis (%)	Grado de polarización	Categoría del filtro
2	TAC	Poliéster	1	87	Pasan bola de 24,5 mm	33,5	1	0,94	2
3	TAC	Poliéster	1	87		39,1	0,8	0,96	2
5	TAC	Poliéster	1,05	86		40,2	0,8	0,96	2
7	TAC	Poliéster	1	86,5		41,7	0,5	0,97	2
8	TAC	RD híbrido	0,95	85,5		37,9	1	0,95	2
9	TAC	Poliéster	1	86		41,1	1,5	0,93	2
12	TAC	Poliéster	1	86,5		42,7	1,3	0,94	2
13	TAC	Poliéster	1	86		35,9	1,1	0,94	2
14	TAC	Poliéster	1,05	86,5		41,3	0,3	0,99	2
15	TAC	Poliéster	0,75	86		35,5	0,8	0,95	2
16	TAC	Poliéster	1	85,5		39,1	1,2	0,94	2
18	TAC	Poliéster	0,85	85,5		43,4	2,8	0,88	1
20	TAC	Poliéster	1	85,5		38,5	0,5	0,98	2
21	TAC	Poliéster	1	86,5		35,5	0,7	0,96	2
22	TAC	Poliéster	0,75	87,5		40,1	0,8	0,96	2
24	TAC	Poliéster	1,05	86		37	0,3	0,99	2
25	TAC	Poliéster	0,75	87		31,6	1,9	0,89	2
26	TAC	Poliéster	1	86,5		34,2	0,9	0,95	2
29	TAC	Poliéster	0,95	87		39,9	2,2	0,9	2
30	TAC	RD híbrido	0,95	84,5		36,6	0,6	0,97	2
31	TAC	Poliéster	1	86,5	41	0,8	0,96	2	
33	TAC	Poliéster	0,95	84,5	39,7	0,7	0,96	2	
35	VIDRIO	No	2	90,5	Pasa bola de 16 mm	70,3	4,8	0,87	1

