



RECUBRIMIENTOS FOTOCROMÁTICOS PARA LENTES OFTÁLMICAS

Ana Cárdenas Baña.

Trabajo Fin de Grado

Facultad de Farmacia – Universidad de Sevilla.

UNIVERSIDAD DE SEVILLA.

Facultad de Farmacia.

Grado en Óptica y Optometría.



Título de Trabajo de Fin de Grado:

“Recubrimientos fotocromáticos para lentes oftálmicas”.

Ana Cárdenas Baña.

- **Lugar y fecha de presentación: Aula 3, 6 de julio de 2022.**
- **Departamento: Química Inorgánica.**

Tutora: Marcela Martínez Tejada.

Departamento de Química Inorgánica.

Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla.

Cotutor: Víctor López Flores.

Departamento de Física de la Materia Condensada.

Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla.

Revisión bibliográfica.

RESUMEN

El estudio del fotocromatismo se remonta a la época de Alejandro Magno y actualmente es de gran interés en diferentes ámbitos. El fotocromatismo es más que una lente que se aclara y oscurece, puesto que implica todas las reacciones que provocan dicho cambio, el tipo de material que cambian de estructura al ser irradiados por radiación ultravioleta (UV) y todas las cualidades que aportan a las diferentes lentes.

En este trabajo de fin de grado nos centraremos en su uso como recubrimiento para lentes oftálmicas, explicando el porqué del proceso, los diferentes materiales y diseños que permiten que este fenómeno ocurra y, además, conoceremos las marcas más conocidas de lentes fotocromáticas en el mercado y las ventajas que aportan.

Palabras clave: “photochromic effect”, “photochromism”, “photochromic coating”, “photochromic lenses”, “characterization photochromic layer”.

ÍNDICE

Resumen.

1. Introducción.
2. Objetivos.
 - 2.1. OBJETIVO GENERAL.
 - 2.2. OBJETIVOS SECUNDARIOS.
3. Metodología.
4. Resultados y discusión.
 - 4.1. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO Y PROPIEDADES DE UN RECUBRIMIENTO FOTOCROMÁTICO.
 - 4.2. MATERIALES UTILIZADOS EN LOS RECUBRIMIENTOS FOTOCROMÁTICOS.
 - 4.3. REACCIONES QUÍMICAS CON EFECTO FOTOCROMÁTICO.
 - 4.4. DISEÑO MOLECULAR PARA MEJORAR EL RENDIMIENTO.
 - 4.5. TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN DE LENTES FOTOCROMÁTICAS.
 - 4.6. MARCAS COMERCIALES DE LENTES FOTOCROMÁTICAS.
 - 4.7. CONTROL DE LA CAPA DEPOSITADA.
5. Conclusiones.
6. Bibliografía.

1. Introducción

El origen del uso de las **lentes oftálmicas** es ambiguo, pero se sabe que el padre de la Óptica Moderna es Alhazen, el cual realizó grandes avances describiendo partes del ojo y explicando los efectos de los rayos de luz en lentes y espejos. Gracias a estos descubrimientos, se crearon “piedras de lectura”, usadas como lupas, que fueron las precursoras de las gafas que hoy en día conocemos (López, 2020).

Las lentes oftálmicas pueden ser **minerales**, **orgánicas** o de **policarbonato**.

Las **minerales** suelen utilizar sílice fundido con óxido de potasio. Estos materiales proporcionan a la lente alta dureza (buena resistencia al rayado), pero aumenta su fragilidad pues se rompen fácilmente, y además son muy pesadas por su alta densidad (Navarro, 2006).

Las lentes **orgánicas** se componen de polímeros orgánicos. Son ligeras debido a su baja densidad, y además son más blandas y más propensas a rayarse que las lentes minerales, aunque presentan una gran resistencia a los impactos (Navarro, 2007). La resistencia al rayado puede evitarse recubriendo la lente con un segundo material que sea más resistente.

El **policarbonato** es un material fácilmente moldeable con calor y se endurece al enfriarlo. Presentan alta resistencia al impacto, dureza media-alta, gran rigidez y baja resistencia a la abrasión, por lo que es necesario aplicar una capa que proteja la lente de ataques químicos (Navarro, 2007).

En general cualquier tipo de lente puede ser recubierta y/o tratada para mejorar sus propiedades, para protegerlas y hacerlas más resistentes, además de aportarles estabilidad y alargar su vida de uso. Asimismo, los recubrimientos y/o tratamientos mejoran la calidad visual del usuario que las lleva (Zeiss, 2020). Entre los recubrimientos encontramos:

- **Recubrimiento antirreflejante:** reduce la luz reflejada no deseada de la superficie de la lente y elimina las imágenes residuales que puedan afectar al rendimiento visual necesario para una visión relajada y confortable (Zeiss, s.f.).
- **Recubrimientos antirayadura:** el recubrimiento se adhiere a la lente, de modo que la película, bajo una presión, aunque tienda a romperse internamente, la lente no presenta fractura y/o rayadura (Samson, 1996). Garantizan una mayor calidad visual y prolongan la durabilidad (Zeiss, 2017).

- **Recubrimiento hidrofóbico y/u oleofóbicos:** Evita impurezas como polvo, agua o grasa, para mantener las lentes más tiempo limpias. Su doble acción hidrofílica/hidrofóbica garantiza que la lente absorba la humedad mientras que las gotas de agua se repelen hacia los laterales, con lo que la lente se mantiene despejada (*interempresas, 2018*).

Pero aparte de esto, las lentes pueden ser protegidas con filtros ultravioleta (UV), filtros para luz azul, **recubrimientos fotocromáticos**, espejados, polarizados y coloración (*Zeiss, 2020*).

- **Filtro UV.** Impide que la radiación UV del sol incida directamente en el ojo, protegiendo así las estructuras oculares.
- **Filtro para luz azul.** Evita que incida luz azul en el ojo tras un uso excesivo de pantallas.
- **Recubrimiento fotocromático.** Hace que la lente se oscurezca cuando inciden sobre ella radiaciones solares y vuelva a ser clara en interiores.
- **Tratamiento espejado.** Minimiza la cantidad de luz que se refracta sobre la lente al reflejar una parte de esta, por lo que dan más protección que las lentes polarizadas. Se recomienda para practicar deportes náuticos o en nieve.
- **Tratamiento polarizado.** Solo deja pasar la luz en una dirección determinada de la matriz de la lente. Eliminan los reflejos más molestos, como los del agua, asfalto o superficies brillantes, evitando los deslumbramientos (*Zeiss, 2020*).

En este trabajo nos centraremos en los **recubrimientos fotocromáticos** para lentes oftálmicas y para empezar debemos comentar que la primera referencia al fotocromatismo se remonta a la época de Alejandro Magno (356-323 a.C.), puesto que los guerreros jefes estaban equipados con unos brazaletes cuya composición se desconoce a día de hoy, pero cambiaban de color cuando se exponían a la luz solar. Esto indicaba el momento adecuado para comenzar la lucha (*Tian, Zhang, 2016*).

Etimológicamente, la palabra fotocromatismo procede de las palabras griegas “*fotos*” y “*croma*”, que significan luz y color respectivamente. **Por lo que el fotocromatismo es la propiedad de experimentar un cambio reversible de color debido a la iluminación externa (típicamente solar)** (*Tian, Zhang, 2016*). Este cambio viene dado normalmente por una reacción fotoquímica del material.

El fotocromatismo atrajo el interés científico a mediados del siglo XIX. En 1966, Corning comercializó lentes oftálmicas fotocromáticas que se oscurecían reversiblemente con la luz del sol debido a los cristales de haluro de plata atrapados dentro de la matriz del vidrio. Desde entonces, se han fabricado millones de gafas fotocromáticas inorgánicas que incorporan compuestos similares a los haluros de plata (*Tian, Zhang, 2016*).

La protección que ofrece una lente protectora de transmisión fija es eficaz, el problema es que no son aplicables a cualquier situación. Una lente solar será demasiado oscura en interiores, mientras que una de baja intensidad, será demasiado clara para exteriores. Aquí es donde cobra sentido el uso de lentes fotocromáticas por su capacidad de variar la transmisión de la luz en función de su intensidad, adaptándose a las distintas condiciones de iluminación. Este tipo de lentes no solo filtran la luz visible, sino que también poseen las cualidades de eliminar totalmente las radiaciones UVA y UVB. El llevarlas permanentemente puede contribuir a conservar una buena visión a largo plazo (*Meslin, 2010*).

Las **aplicaciones** de los recubrimientos fotocromáticos son amplias y se pueden observar en varios campos desde la química supramolecular, el almacenamiento de datos, juguetes, prendas de vestir y aplicaciones industriales, pero uno de los más conocido y el que más interesa en este trabajo es su aplicación en **gafas de sol**. La mayor limitación en el uso de estos recubrimientos en lentes de policarbonato es que los materiales no son lo suficientemente estables como para soportar miles de horas de exposición al sol (*Render, s.f.*),

En este trabajo de fin de grado se realizará una revisión bibliográfica sobre los principios de funcionamiento y propiedades de un recubrimiento fotocromático, los materiales más usados, las reacciones químicas que se llevan a cabo, los diseños moleculares que mejoran el rendimiento, diferentes técnicas que se utilizan para depositar recubrimientos fotocromáticos en lentes oftálmicas, además de comparar diferentes tipos de materiales (minerales, orgánicos, policarbonato) que incorporan recubrimientos fotocromáticos. También presentaremos las marcas comerciales más conocidas y, por último, el control de funcionamiento básico de la capa depositada.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar una revisión bibliográfica acerca de los principios químicos, materiales y métodos de fabricación de los recubrimientos fotocromáticos para lentes oftálmicas.

2.2. OBJETIVOS SECUNDARIOS

- Explicar los principios químicos del funcionamiento del fotocromatismo.
- Mostrar los compuestos más usados para promover el fotocromatismo.
- Describir y comparar diferentes métodos de fabricación de recubrimientos fotocromáticos sobre lentes oftálmicas.
- Presentar las marcas más conocidas de lentes fotocromáticas del mercado.
- Describir el método de control básico de la capa depositada.

3. METODOLOGÍA

En este Trabajo de Fin de Grado se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica en diferentes fuentes de información:

Las bases de datos han sido de gran ayuda, además de libros, reviews y artículos digitalizados, así como la biblioteca online de la Universidad de Sevilla, que me ha permitido acceder a gran variedad de documentos. Todo esto se verá reflejado a lo largo de la revisión bibliográfica.

Las bases de datos usadas han sido *Dialnet*, *Web of Science*, *Pubmed*, *Z-library*, *Scopus*, *Google Scholar* y *Fama*. Se ha usado el lenguaje inglés principalmente, por arrojar mayor número de resultados.

Para comenzar el trabajo, se partió de una búsqueda general del fotocromatismo, su historia, principios químicos y materiales más comunes. Una vez establecida la base general, se hizo una búsqueda más precisa acerca de los diferentes principios químicos, métodos de fabricación y comparaciones entre ellos.

Las palabras claves usadas para obtener la información que se muestra a lo largo de este TFG son “photochromic effect”, “photochromism”, “photochromic coating”, “photochromic lenses”, “characterization photochromic layer”.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO Y PROPIEDADES DE UN RECUBRIMIENTO FOTOCROMÁTICO

El fotocromatismo se define como la transformación reversible de una especie química a otra forma con fórmula molecular igual, pero con distinta estructura geométrica y diferente espectro de absorción (Irie, 2000). Este cambio puede ser provocado por radiación ultravioleta, infrarroja o visible, la cual origina cambios de estructura que a su vez causan cambios en el espectro de absorción de la molécula (Dür, Bouas-Laurent, 2003). Para describir el efecto, el modelo más simple es una reacción bidireccional entre dos especies moleculares A y B (Tian, Zhang, 2016) (Figura 1):



Figura 1. Reacción bidireccional entre dos especies moleculares. A especie incolora, B especie coloreada.

El **compuesto A** incoloro se transforma por una radiación que actúa a una longitud de onda determinada para crear una **especie coloreada B**, la cual es denominada especie fotoestacionaria. Pero dicha reacción es reversible, pudiendo volver desde B a la especie incolora A, ya sea mediante un proceso térmico o fotoquímico o simplemente cuando la especie A deja de ser afectada por la radiación que ha ocasionado su transformación (Dessauer et al., 1963).

Como hemos dicho al inicio, estos cambios suelen ser provocados por radiación UV, infrarroja o visible, por lo que es importante explicar que todas estas radiaciones se encuentran dentro del espectro electromagnético.

El **espectro electromagnético** es el conjunto de longitudes de onda de todas las radiaciones electromagnéticas. Incluye:

- **Rayos Gamma:** longitudes de onda muy corta y frecuencia alta. Son ondas de alta energía capaces de viajar a larga distancia a través del aire y son las más penetrantes.
- **Rayos X:** Tienen longitudes de onda más largas que los rayos gamma, pero menores que la radiación ultravioleta y por lo tanto su energía es mayor que la de estos últimos. Se utilizan en diversas aplicaciones científicas e industriales (*Kleiner, s.f.*).
- **Radiación ultravioleta (UV):** porción del espectro electromagnético que se encuentra entre los rayos X y la luz visible. Hay 3 tipos: UVA, UVB y UVC, estos dos últimos son absorbidos por la capa de ozono de la Tierra, por lo que casi toda la que nos llega es UVA. Esta puede ser beneficiosa en su corta exposición pues nos aporta vitamina D, pero puede originar perjuicios si nos sobreexponemos a ella, ocasionando problemas oculares y de piel, entre otros (*Centros para el control y la prevención de enfermedades, 2021*).
- **Espectro visible:** parte del espectro electromagnético que los ojos humanos son capaces de detectar. Un objeto que vemos de un color concreto no es más que un objeto que refleja solo las radiaciones con longitud de onda que vemos de ese color y absorbe todas las radiaciones con longitud de onda correspondientes a los demás colores (*Herrera, 2014*).
- **Radiación infrarroja (IR):** radiación térmica que percibimos como calor. Es la parte del espectro electromagnético que se encuentra entre la luz visible y las microondas.
- **Ondas de radio y microondas:** tienen longitudes de onda largas que varían unos pocos centímetros a miles de kilómetros de longitud. Sus principales usos son en la televisión, los teléfonos móviles y las comunicaciones por radio (*Kleiner, s.f.*).

La **radiación electromagnética** aplicada a un compuesto fotocromático en su estado basal (mínimo nivel de energía), cae en la región ultravioleta (280-400 nm) y la especie fotoestacionaria colorida absorbe la radiación en la región visible (400- 700 nm).

Podemos clasificar los diferentes sistemas fotocromáticos de acuerdo al tipo de reacción que sufre la especie fotoestacionaria (coloreada) al dejar de recibir radiación electromagnética y volver a su estado basal incoloro:

- 1) **Sistema fotoreversible**, en el cual la forma colorida **B** regresa al estado inicial **A** a través de la exposición del compuesto a una radiación electromagnética de mayor longitud de onda (suele ser en el rango visible).

- 2) **Sistema termorreversible**, en el cual la especie coloreada **B** regresa a la especie **A** por aplicación de calor.
- 3) **Sistema fototermorreversible**, aquel en el que el compuesto **B** puede ser foto y termorreversible.
- 4) **Sistema fotocromático inverso**, en el cual el estado inicial **A** tiene la capacidad de absorber a longitud de onda mayor (especie coloreada) y la forma **B** a una longitud de onda menor (especie incolora).
- 5) **Sistema multifotocromático**, en el que más de dos fracciones de la molécula pueden sufrir interconversión fotoquímica y termoquímica, es decir, dichas moléculas pueden convertirse en la otra como resultado de una actividad química (*García, 1999*).

Tras esta clasificación, debemos tener en cuenta que tanto las moléculas orgánicas e inorgánicas pueden presentar fotocromatismo. Las orgánicas basan su actividad en propiedades químicas como rompimiento homolítico o heterolítico (generando radicales o especies iónicas), isomerizaciones cis-trans, reacciones pericíclicas y cicloadiciones (2+2) y (4+2). En cambio, las inorgánicas se basan en reacciones redox (*García, 1999*).

Así para que el efecto fotocromático se origine en una lente oftálmica se necesitan que estén provistas de moléculas orgánicas o inorgánicas que cambien su respuesta frente a la luz ultravioleta (longitud de onda en el rango de 280-400nm). Esto impulsará la transformación química de dichas moléculas que oscurece la lente, y al dejar de ser irradiadas por la luz regresarían a las condiciones normales de iluminación.

De este principio general se derivan distintas consecuencias:

- Como el oscurecimiento viene dado por los rayos UV, el fotocromatismo no funciona en interiores ni oscurece las lentes (o las oscurece poco), ya que la luz interior artificial no suele contener radiación ultravioleta.
- Dado que el fotocromatismo se activa con la luz ultravioleta, las lentes fotocromáticas se oscurecerán cuando no haya luz solar visible, como cuando el cielo está nublado, ya que la luz UV atraviesa las nubes.
- Las lentes termorreversibles son generalmente más oscuras cuando están más frías, porque la intensidad de los tonos producidos por la lente depende de un equilibrio entre la cantidad de partículas activadas por la luz ultravioleta y la cantidad de partículas neutralizadas por el calor circundante (*Meslin, 2010*).

Para finalizar este apartado, vamos a hablar sobre la transmisión lumínica, los filtros de luz y algunas propiedades fotocromáticas.

Los **filtros de luz** se caracterizan por sus propiedades físicas de transmisión lumínica (factor de transmisión T, curva de transmisión y espectro UV) y también por las características fisiológicas correspondientes, como el **factor relativo de transmisión en el espectro visible** (T_v). Este factor es específico de la óptica oftálmica y resume las propiedades fisiológicas del filtro por medio de un número, el cual es el cociente entre el flujo luminoso que sale de la lente y el que entra en la misma, tal y como son percibidos por el ojo humano. Dicho de otra forma, sería como el cociente de la luz que sale de la lente entre la luz que la lente absorbe.

Las **propiedades fotocromáticas** normalmente se **representan por medio de las curvas de oscurecimiento y aclaramiento** de la lente. Estas muestran la evolución de T_v en función del tiempo en las fases de oscurecimiento y posterior aclaramiento de la lente a unos 23°C. En la *figura 2* puede apreciarse que el valor T_v desciende en la fase de oscurecimiento y aumenta en la de aclaramiento posterior. La pendiente de las curvas muestra que el oscurecimiento es significativamente más rápido que el posterior aclaramiento.

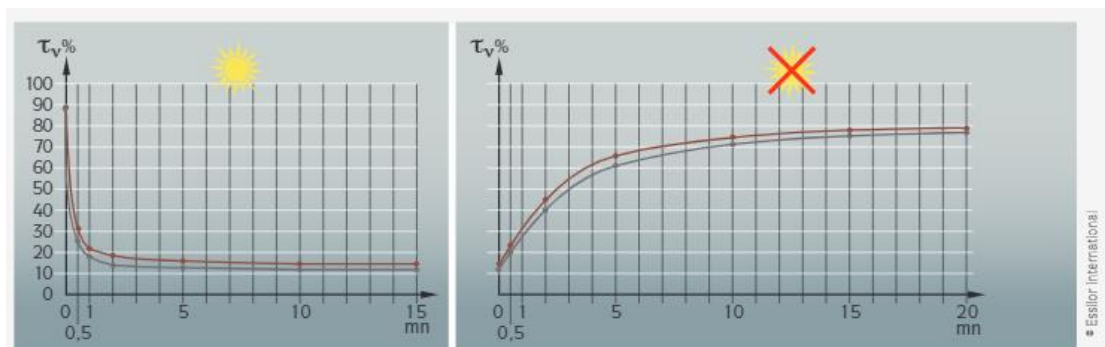


Figura 2: Cinéticas de oscurecimiento y aclaramiento. (Fuente: *Transitions Optical*, 2010).

Este factor T_v responde también a una clasificación de las lentes en **5 categorías** de transmisión lumínica, que van de 0 (cristales claros) a 4 (cristales oscuros). Los criterios de clasificación se basan en las propiedades de transmisión de la lente en el espectro visible y en las longitudes del espectro correspondientes a los rayos UVA y UVB (*Meslin, 2010*), como se muestran en la *tabla 1*. En ella, vemos que el filtro 0 lo transmite casi todo en el espectro visible y a medida que se hace más oscuro, el valor de transmisión en el espectro visible baja y transmite poco, como es el filtro 4.

En cambio, la transmisión en el espectro UVA y UVB es mayor en la categoría 4 que en la de 0, pero son valores muy pequeños y se podrían obviar.

La **categoría 0** corresponde a lentes incoloras o de tonos ligeros de uso permanente; la **categoría 1** corresponde a lentes de tonos intermedios que se sitúan entre las incoloras y las solares; y, por último, las **categorías 2, 3 y 4** se refieren a lentes solares con nivel de insolación medio, fuerte y excepcional (Meslin, 2010).

No se recomienda usar lentes con filtro igual o superior a 1 para conducir de noche ni tampoco se recomienda conducir con lentes de categoría 4 (Meslin, 2010).

Tabla 1: Clasificación de las lentes según la transmisión lumínica. (Fuente: Essilor International, 2010).

Categoría del filtro	Dominio del espectro del UV		Dominio del espectro del visible	
	Valor máximo de la transmisión UVB (T_{UVB})	Valor máximo de la transmisión UVA (T_{UVA})	Transmisión en el visible T_v 380-780 nm	
	280-315 nm UVB (%)	315-380 nm UVB (%)	De (%)	A (%)
0	T_v	T_v	80	100
1	0.125 T_v		43	80
2			18	43
3	0	0.5 T_v	8	18
4			3	8

Las generaciones más avanzadas de lentes fotocromáticas orgánicas proporcionan rendimientos muy considerables. Por una parte, en estado claro presentan una curva de transmisión alta ($T_v > 90\%$) y, por otra, ofrecen niveles de tintado solar de categoría 3 en estado oscurecido ($T_v < 20\%$), siempre y cuando la temperatura ambiente sea moderada (Meslin, 2010). Estos valores pueden comprobarse en la *tabla 1*.

Las **propiedades fotocromáticas** de las lentes orgánicas **cambian con el tiempo**. La oxidación de las moléculas fotosensibles hace que el grado del efecto fotocromático tienda a disminuir. Entonces, con los años, las lentes no se oscurecen como originalmente hacían, por lo que se suelen cambiar por lentes nuevas. Estos cambios se pueden medir en el laboratorio: se seleccionan nuevas lentes de fábrica y se miden sus cinéticas de oscurecimiento y aclaramiento. Posteriormente, para establecer el tiempo de vida de una

lente, se envejecen las lentes bajo una intensa radiación UV durante 200 h y se vuelve a medir la cinética, comparándola con los valores originales (*Meslin, 2010*).

4.2. MATERIALES UTILIZADOS EN LOS RECUBRIMIENTOS FOTOCROMÁTICOS

El **material de diseño** de la lente solar varía su peso, su resistencia a los impactos, a las rayaduras y a la abrasión. Los **materiales "orgánicos"** o "plástico óptico" son los más utilizados en la confección de lentes de sol debido a sus buenas cualidades absorbentes del UV, su menor peso y su resistencia mecánica. Estos materiales se rayan con facilidad, por lo cual sus superficies tienen una capa protectora. Las **lentes minerales** son más estables (no se deforman con calor) y más duras, pero se rompen en caso de impacto por lo que son sometidas a tratamientos de endurecimiento.

En cuanto a los recubrimientos fotocromáticos, estos se consiguen introduciendo moléculas fotosensibles que reaccionan cuando se exponen a la luz ultravioleta. Las lentes fotocromáticas orgánicas están compuestas por una variedad de moléculas, cada una de las cuales absorbe una parte específica del espectro visible. Cuando estas sustancias no reaccionan al mismo tiempo, el color de la lente cambia gradualmente en un fenómeno conocido como el "efecto camaleón", una característica de la primera generación de lentes fotocromáticas orgánicas que han sido bien recibidas en las siguientes generaciones (*Meslin, 2010*).

La aparición de las lentes fotocromáticas **orgánicas** es relativamente reciente. Se hicieron populares en la década de 1990, tras el lanzamiento de las primeras lentes Transitions® (son las más conocidas, pertenecientes a Essilor), es decir, 25 años después que las lentes fotocromáticas **minerales**. El principio del fotocromatismo mineral no puede aplicarse a los materiales orgánicos porque las estructuras y tamaños de las moléculas son muy diferentes. Por lo tanto, es necesario descubrir otras formas moleculares (*Meslin, 2010*) ya que en su mayoría no presentan sensibilidad directa a la luz UV.

A continuación, se describe cómo funciona una molécula fotocromática empleada en las lentes Transitions® (*figura 3*): bajo la influencia de la luz ultravioleta, la molécula fotocromática se abre, adquiriendo temporalmente una configuración plana (tipo de geometría molecular con un átomo central en el que los demás átomos parten de él, pero se encuentran localizados en el mismo plano), una posición en la cual el desplazamiento de los electrones es mayor y provoca una fuerte absorción de la luz visible, lo que hace que la

lente se oscurezca. Cuando se detiene la excitación, la molécula vuelve a su estado inicial incoloro debido a la temperatura ambiente y los electrones vuelven a su estado inicial tras dejar de estar en presencia de luz UV (Meslin, 2010).

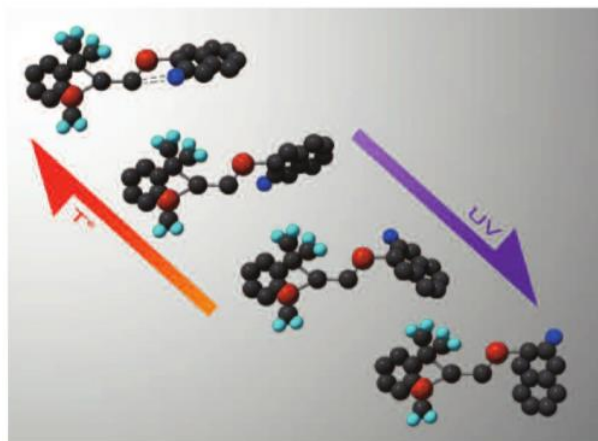


Figura 3: Principio de funcionamiento del fotocromatismo orgánico. (Fuente: Essilor International, 2010).

Las **moléculas orgánicas fotocromáticas** se comenzaron a estudiar tras observar el cambio de color que presentaban ciertos microorganismos y/o plantas que cambiaban de color de manera natural, esto gracias a la presencia de ciertas moléculas y compuestos químicos que poseen y que favorecían dicho cambio (Benavides, 1998). Desde entonces y tras observar la naturaleza, se comenzaron a estudiar los recubrimientos fotocromáticos usando moléculas semejantes para conseguir un efecto similar. De esta manera se puede decir que el efecto fotocromático de las lentes orgánicas es el resultado de la adición de compuestos o moléculas fotosensibles que, bajo la influencia de radiaciones UV, sufren cambios estructurales, modificando así sus propiedades de absorción de luz visible y por tanto cambiando de color. Se utilizan diferentes familias de moléculas que pueden experimentar distintos tipos de modificaciones estructurales: ruptura de enlaces, formación de enlaces, isomerizaciones, etc. (Meslin, 2010).

Las lentes fotocromáticas orgánicas presentan moléculas orgánicas fotocromáticas simultáneamente o combinaciones de moléculas que presenten efectos fotocromáticos. Sus efectos combinados permiten obtener, según la proporción, diferentes tonos grises o marrones. Además, son más ligeras en comparación con las lentes de vidrio. También es deseable poder modificar la reactividad y/o compatibilidad de dichos materiales fotocromáticos para que se correspondan de manera más exacta con las del sustrato o del material huésped. El desarrollo de lentes fotocromáticas orgánicas ha avanzado tanto que

actualmente se dispone de distintas versiones, por ejemplo, lentes de menor intensidad, pero de cinética más rápida con nuevos tonos (Transitions® light) que permite adaptar la oferta a las distintas tendencias o estilos de vida de los clientes (Meslin, 2010).

En general, existen dos tipos de materiales fotocromáticos orgánicos: **tipo T y tipo P**.

El **tipo T** se refiere a aquellos que podrían sufrir una decoloración térmica, como azobencenos, espiropiranos, espirooxazinas, naftopiranos, etc. y algunos materiales inorgánicos. Estos compuestos son los que nos interesan ya que son los aplicados más comúnmente en lentes oftálmicas (Tian, Zhang, 2016).

Por el contrario, el fotocromismo de **tipo P** es térmicamente irreversible, es decir, todos los procesos de coloración y decoloración son impulsados únicamente por la luz. Son aplicados en informática de próxima generación (Tian, Zhang, 2016).

Características de los materiales tipo T

- **Tasa de coloración rápida:** cambio de formas incoloras a coloreadas rápidamente. Además, la coloración debe ser lo suficientemente oscura cuando se aplica luz.
- **Vida media apropiada de la decoloración para las aplicaciones deseadas:** para el fotocromatismo tipo T, lo que importa es la vida media del termoblanqueo, es decir, la capacidad de la lente de oscurecerse y volver a aclararse. La decoloración de las lentes debe ser rápida cuando los usuarios estén fuera.
- **Alta eficiencia de interconversión:** para la coloración, cuanto más coloreada, menos productos se utilizan, por lo que es más económico. Para la decoloración, el residuo de color debe ser lo suficientemente bajo para evitar que queden tonos no deseados.
- **Buena fatiga:** Resistencia a la fotodegradación, es decir, la alteración de los materiales fotocromáticos por efecto de la luz debe ser mínima. Se busca la fotoestabilidad del material para garantizar su reutilización por más tiempo.
- **Termoestabilidad:** dos mismos fotoisómeros muestran poco cambio de fotocromatismo con variación de temperatura (Tian, Zhang, 2016).

A continuación, se listan algunos compuestos de tipo T orgánicos e inorgánicos con propiedades fotocromáticas empleados en las lentes oftálmicas:

1. **Espiropiranos:** probablemente la familia de fotocromáticos más estudiada (Crano, Guglielmetti, 1999).

Los espiropiranos son compuestos orgánicos que se usan en el campo médico y tecnológico y fueron descubiertos a principios del siglo XX (Kortekaas, Browne, 2019). Sin embargo, fue a mediados de los años veinte cuando Fischer e Hirshberg observaron sus propiedades fotocromáticas y reversibles, desde entonces, numerosos estudios sobre compuestos fotocromáticos han continuado hasta el día de hoy (Lukyanov et al., 2005).

Los espiropiranos o espirocromenos presentan dos partes heterocíclicas unidas por un átomo de carbono tetraédrico sp^3 . Su estructura general se observa en la *figura 4* y podemos ver que la molécula se divide en dos y se encuentran en planos ortogonales. La parte B de la molécula es la estructura común de todos los espiropiranos y la A la que los distingue (de los Santos-Villarreal et al., s.f).

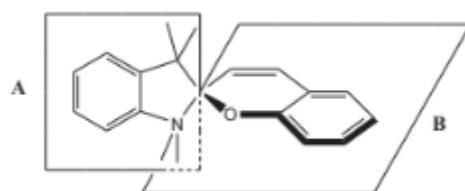


Figura 4. Estructura general de un espiropirano. (Fuente: de los Santos-Villarreal et al., s.f).

La rotura del enlace carbono-oxígeno (C-O) del espiro durante el proceso de isomerización da lugar a la “forma abierta” o “coloreada” del compuesto activo, también llamada fotomerocianina (*figura 5*). La absorción de la molécula en el estado coloreado se ubica en la región visible, manifestándose como una banda amplia en el rango de 500 a 600 nm (de los Santos-Villarreal et al., s.f).

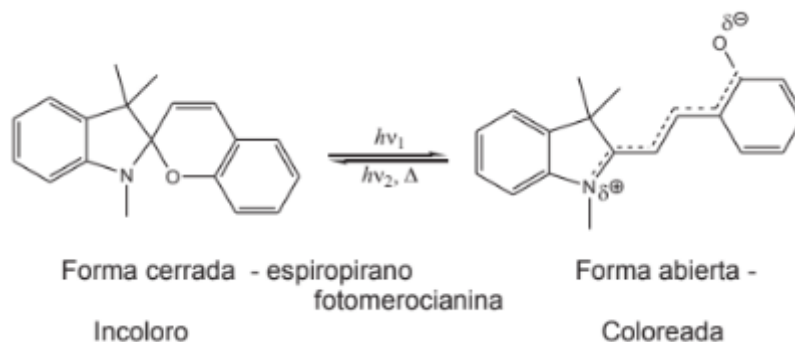


Figura 5. Fotocromatismo del espiropirano. (Fuente: de los Santos-Villarreal et al., s.f).

2. **Espirooxazinas:** es una familia de compuestos que ha demostrado ser bastante útil debido a su resistencia a la **fotodegradación** o fatiga (Crano, Guglielmetti, 1999). Esa fotodegradación es debida a la exposición constante a la luz UV, por lo que se buscan moléculas cada vez más resistentes a los cambios ocasionados por el continuo uso.

Las espirooxazinas son prototipos de sistemas fotocromáticos. Están compuestas por dos fragmentos heterocíclicos casi planos (indolina (figura 6) y oxazina (figura 7)) separados por un carbono tetraédrico (carbono espiro) que impide la unión entre los dos sistemas. Cuando este tipo de isómeros espiro (SP) incoloros reciben luz ultravioleta, se convierten en el isómero mero o merocianina (MC) (figura 8), que presenta fuerte coloración (Castro, 2015).

Una solución etanólica de estos compuestos es incolora, pero a medida que se incrementa la concentración, empieza a colorearse hasta que alcanza un **azul intenso**.

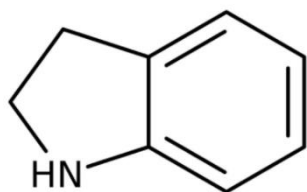


Figura 6: Indolina. (Fuente: Fisher Scientific, s.f).

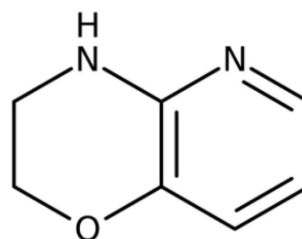


Figura 7: Oxazina. (Fuente: Fisher Scientific, s.f).

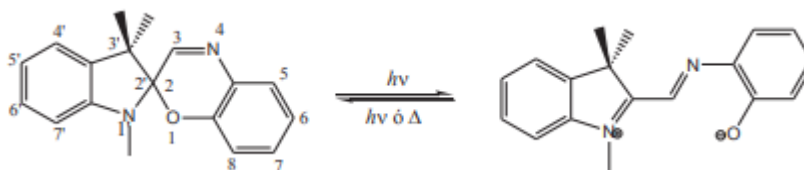


Figura 8. Reacción de isomerización de espirooxazinas (Fuente: de los Santos-Villarreal et al., s.f.).

3. **Benzo y naftopiranos (cromenos):** también de interés por su resistencia a la fatiga (Crano, Guglielmetti, 1999), ya que al igual que las espirooxazinas, la exposición continuada a la luz UV disminuye sus propiedades.

El **benzopirano** es un compuesto orgánico formado por un benceno unido con un anillo de pirano heterocíclico, el cual se compone de 5 átomos de carbono, uno de oxígeno y dos dobles enlaces, como se muestra en la *figura 9* (Fisher scientific, s.f.).

El equilibrio fotocromático entre las formas cerrada y abierta de los 2H- benzopiranos y 2H-benzooxazinas se representan en la *figura 11*.

El **naftopirano** presenta la estructura mostrada en la *figura 10*, en la que las letras “a” a “n” representan los lados de los anillos de naftopirano, y los números representan los números de los átomos de los anillos de naftopirano. Cuando incide radiación solar ultravioleta da lugar a un color **marrón** o **gris** (Oficina española de patentes y marcas, 2016).

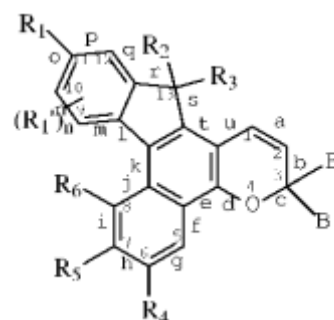
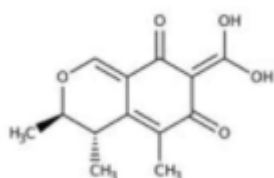


Figura 9: Benzopirano. (Fuente: Fisher scientific, s.f).

Figura 10: Naftopirano. (Fuente: Oficina española de patentes y marcas, 2004).

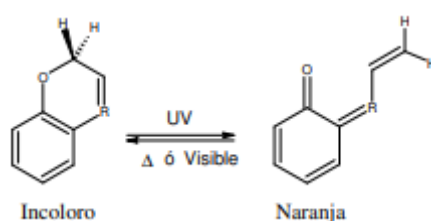


Figura 11. Fotocromatismo del benzopirano. (Fuente: Celani et al.,1997).

En el caso de los naftopiranos, podemos observar su cambio en la forma molecular tras incidirle radiación UV en la *figura 12*:

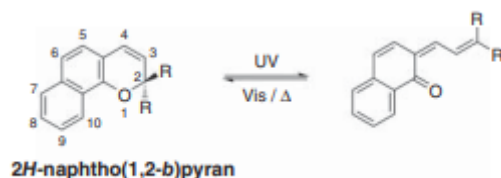


Figura 12. Fotocromatismo de un naftopirano. (Fuente: Tian, Zhang, 2016).

- 4. Fúlgidos y fulgimidos:** Son compuestos fotocromáticos que cuentan con un gran número de interesantes propiedades tales como elevada estabilidad térmica del estado inicial y el coloreado y una buena resistencia a la fatiga (Metelitsa et al., 1994).

La forma coloreada de los compuestos fotocromáticos fúlgidos se produce por medio de un mecanismo electrocíclico que implica la transformación de una forma de anillo abierto incoloro a una forma de anillo cerrado coloreado, mostrado en la *figura 13* (Kumar et al., 2010).

Los grupos carbonilos, junto con los dobles enlaces, son los responsables del color de los fulgidos. Suelen estar compuestos de cristales de color **amarillo** o **naranja**, y al ser irradiados con luz ultravioleta se vuelven **naranjas**, **rojos** o **azules** (de los Santos-Villarreal et al., s.f.).

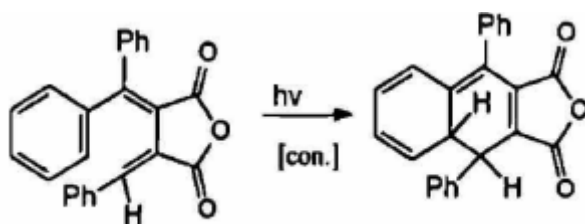


Figura 13. Mecanismo de fotociclación (1-6) de los fulgidos. (Fuente: García, 1999).

- 5. Diariletenos con anillos heterocíclicos:** Entre los diferentes fotocompuestos que se han sintetizado, los diariletenos presentan una estructura química que consiste en dos grupos aromáticos unidos por un doble enlace alternado. Son compuestos fotocromáticos fotoreversibles y poseen una alta estabilidad termodinámica, características que los coloca entre unos de los compuestos de mayor interés comercial (de los Santos-Villarreal et al., s.f.).

En la *figura 14* podemos observar el cierre de ciclo de un diariletano. La forma abierta cuenta con dos isómeros, el cis (Z) y el trans (E) (figura 15). Los isómeros en su forma abierta son por lo general incoloros, y en su forma cerrada presentan color (*de los Santos et al., s.f.*).

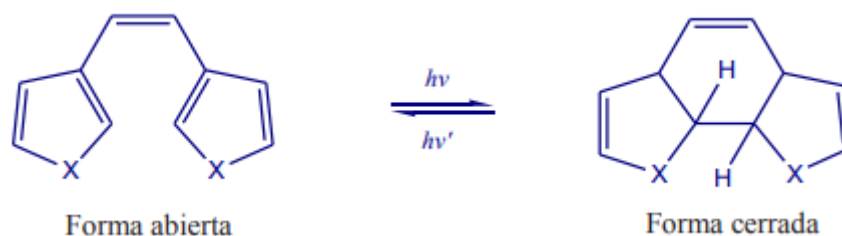


Figura 14. Cierre de ciclo de un diariletano (*Fuente: de los Santos-Villarreal, s.f.*).

6. Compuestos fotocromáticos inorgánicos: No solo se emplean compuestos orgánicos como moléculas fotocromáticas, también se han descrito compuestos inorgánicos que contengan plata. Corning introdujo el fotocromatismo mineral en 1965 con las primeras lentes Photogray. El principio fotocromático de estas lentes se basa en la incorporación de cristales de haluro de plata a un material mineral, que reacciona en presencia de la luz ultravioleta oscureciéndola.

El mecanismo atómico básico de este tipo de fotocromatismo es el intercambio de electrones entre un átomo de plata y uno de cloro, presentes en forma de cloruro de plata. En ausencia de luz, el enlace plata-cloro es iónico y el átomo de plata permanece transparente, por lo que la lente se mantiene en estado claro; pero bajo la radiación ultravioleta, el electrón inestable abandona el ion cloro para unirse al de plata, que precipita en forma metálica y detiene la luz, por lo que la lente pasa a estado oscuro. Cuando la radiación cesa o disminuye, el electrón adicional abandona el átomo de plata y regresa al de cloro, adquiriendo la lente nuevamente su aspecto claro inicial (*Meslin, 2010*).

Como hemos dicho, sobre el año 1965, se introdujo el fotocromatismo mineral, pero a día de hoy las lentes suelen ser en su mayoría orgánicas, y esto es debido a que las lentes minerales tienen un cierto tono residual amarillo y tardan más tiempo en oscurecerse y aclararse de nuevo. Además de que se rompen fácilmente y pesan más. La única ventaja que presentan es que se rayan menos (*García, s.f.*)

4.3. REACCIONES QUÍMICAS CON EFECTO FOTOCROMÁTICO

Existen muchas familias de moléculas orgánicas e inorgánicas que pueden experimentar cambios reversibles de color, basando su comportamiento en diferentes tipos de reacciones químicas. A continuación, se muestran algunas reacciones químicas que se pueden dar en compuestos fotocromáticos usados en lentes oftálmicas en donde el cambio de color se favorece, bien sea por rompimiento y/o formación de enlaces en presencia de luz UV.

- **Sistemas fotocromáticos basados en rompimientos homolíticos y heterolíticos de enlaces sigma, generando radicales libres o especies iónicas:** un rompimiento homolítico u homólisis es una ruptura de un enlace químico en el que cada átomo participante del enlace conserva un electrón del par que constituía la unión y da lugar a dos radicales (*IUPAC, 1997*).

La ruptura homolítica de la unión carbono-nitrógeno (C – N) entre los dos anillos de imidazol (*figura 15*) que participan en este grupo de compuesto puede inducirse mediante calentamiento, irradiación de luz o presión, lo que da como resultado la formación de dos radicales: radical trifenilimidazol de TPIR (coloreado) y trifenilimidazol de TPID (incoloro).

TPIR tiene una gran banda de absorción en la luz visible, mientras que TPID absorbe solo a la luz ultravioleta y, por lo tanto, es incoloro (*Tian, Zhang, 2016*).

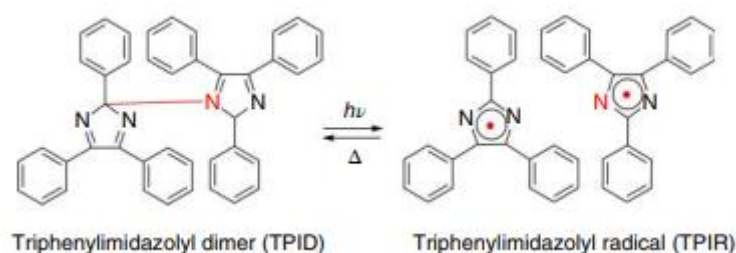


Figura 15. Fotocromatismo del imidazol entre el radical TPIR y TPID. (Fuente: Tian, Zhang, 2016).

En cambio, un rompimiento heterolítico o heterólisis es la ruptura de un enlace químico de una molécula neutral que genera un catión y un anión (*IUPAC, 1997*). Un ejemplo sería el caso de las espirooxazinas, de las que ya hablamos en el *apartado 4.2*, en donde tras esta ruptura la molécula cambia y experimenta el cambio de color esperado.

- **Sistemas fotocromáticos basados en isomerización cis-trans de compuestos con dobles enlaces y grupos cromóforos:** la isomerización es un proceso fotocromático en el que el cambio de color es percibido solo cuando hay cambios en la región visible del espectro al cambiar la estructura de la molécula (*Saltiel, 1980*).

Los grupos cromóforos son los grupos funcionales de la molécula responsables de la absorción. Principalmente son dobles y triples enlaces carbono-carbono, sistemas aromáticos, grupo carbonilo, imino (C=N), diazo (N=N), nitro y enlaces C-Y (Y es un átomo con pares libres) (*Fernández, s.f.*).

La isomerización cis-trans de olefinas implica una rotación de 180° en el doble enlace carbono-carbono (C=C). La reacción suele desencadenarse mediante procesos térmicos o en presencia de catalizadores (*Saltiel, 1980*). Podemos ver esta transformación en la *figura 16*.

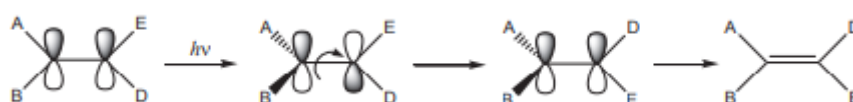


Figura 16. Isomerización cis-trans de olefinas. (Fuente: Universidad Autónoma de Coahuila).

Algunos ejemplos de compuestos fotocromáticos con isomería cis-trans son los siguientes:

- **Compuestos azo:** son un grupo de moléculas fácilmente isomerizados. La transformación geométrica de unidades de azobenceno causa cambios estructurales que le proporcionan propiedades fotocromáticas muy definidas. Podemos ver un ejemplo de esto en *la figura 17*, estos cambios pueden ser mantenidos por una radiación continua con luz UV, pasando a su color original al ser irradiados con luz visible (*García, 1999*).

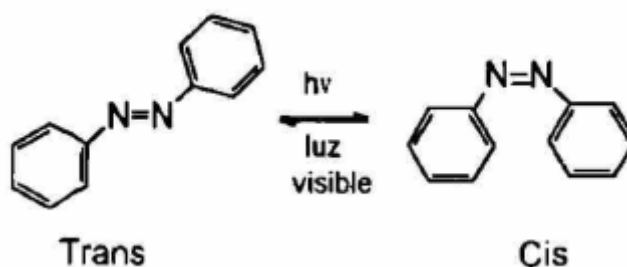


Figura 17. Isomerización de compuestos azo. (Fuente: García, 1999).

- **Difenilpolienos:** Como resultado de la isomerización de los difenilpolienos se puede obtener una mezcla de isómeros cis-trans acompañados de otros subproductos, como los obtenidos de la ciclación del isómero cis. Un ejemplo es el proceso de fotoisomerización de la rodopsina (*figura 18*), del 11 -cis retinal (1), al isómero trans prelumirodopsina (2), este es un proceso muy importante en la visión y es llevada a cabo en la retina (*Morrison, Deibel, 1989*).

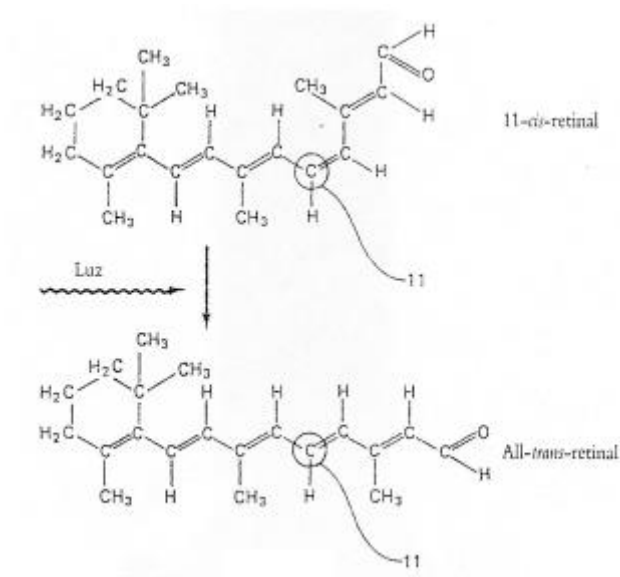


Figura 18: Ejemplo de sistema fotocromático basado en la isomería cis -trans. (Fuente: UCM, 2018).

- **Sistemas fotocromáticos basados en reacciones pericíclicas:** una reacción pericíclica se refiere al flujo continuo de electrones con enlaces π en el estado de transición cíclica (TS). La rotura y la unión se producen de forma conjunta sin la formación de un intermedio.

Las reacciones pericíclicas se inician por calor o por luz. Estas reacciones son estereoespecíficas. La estereoquímica del producto depende de la estereoquímica del reactivo. Por tanto, la reacción iniciada por los procesos de luz y calor producirá resultados con estereoquímica opuesta (*Cienciahoj, 2021*). Un ejemplo de una reacción pericíclica es el siguiente (*figura 19*):

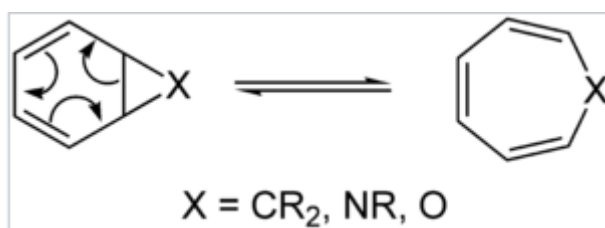


Figura 19: Ejemplo de una reacción pericíclica: transposición norcardieno-ciclohexatrieno. (Fuente: Jürgen Martens).

- **Sistemas fotocromáticos basados en cicloadiciones:** una cicloadición es una reacción pericíclica en la que dos enlaces π se pierden y se forman dos enlaces σ (IUPAC, 1997).

Las reacciones de cicloadición [2+2] de dobles enlaces carbono-carbono se llevan a cabo mediante un proceso intra o intermolecular por medio de radiación ultravioleta (Woodward, Hoffman, 1965). Un ejemplo de esta reacción se observa en la figura 20.

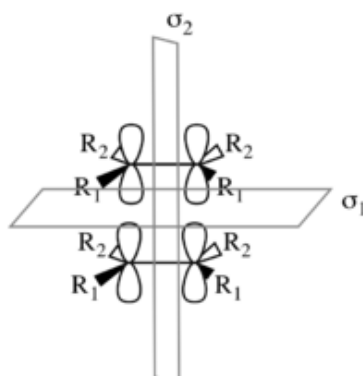


Figura 20: Elementos de simetría de la cicloadición [2+2]. (Fuente: Ivogt, 2019).

- **Sistemas fotocromáticos basados en reacciones electrocíclicas:** una reacción electrocíclica es un tipo de cicloadición intramolecular reversible en donde ocurre la formación de un enlace sigma entre un sistema π completamente conjugado ya sea neutro o iónico.

Estas reacciones se llevan a cabo mediante reajustes que experimentan las moléculas al incidir radiación sobre ellas, produciendo interacciones entre los orbitales π que forman los dobles enlaces de los compuestos. La reacción puede ocurrir de forma térmica o fotoquímica.

Si la reacción se lleva a cabo mediante el proceso térmico, los productos formados pueden interconvertirse a sus materias primas en un rango de los 100 a los 400 °C, por lo que la reacción se considera irreversible térmicamente. En cambio, si transcurre fotoquímicamente, la inversión al producto incoloro puede darse de forma térmica o por acción de una radiación del rango visible (*García, 1999*).

- **Sistemas fotocromáticos a base de 1,2-diarilietenos:** ya hablamos de este compuesto en el *apartado 4.2*, explicando además su isomerización, por lo que solo añadiré que la reacción se lleva a cabo como un proceso térmico o fotoquímico en ausencia de catalizadores. Cuando se incide radiación ultravioleta (UV) sobre la molécula, esta pasa de un estado basal de menor energía a un estado excitado de mayor energía en donde se lleva a cabo la rotación (180°) del enlace (*García, 1999*).

4.4. DISEÑO MOLECULAR PARA MEJORAR EL RENDIMIENTO

El **diseño** de las lentes fotocromáticas orgánicas consiste en un monómero plástico ligero hecho para ser compatible con los pigmentos fotocromáticos. Los fabricantes de lentes utilizan monómeros que los funden y polimerizan en lentes sin recubrimiento. Estas lentes en bruto son luego transformadas utilizando un proceso que fija las moléculas fotocromáticas a la superficie de la lente (hasta una profundidad de 150 a 200 µm) para hacerlas parte integral de su estructura y así evitar que se pierdan con las rayaduras o se desvanezcan. Para una mayor durabilidad, la última etapa del proceso aplica un recubrimiento resistente a rayaduras. También se puede aplicar un recubrimiento antirreflectante que va a aumentar la transmisión de luz a través de la lente y ofrecer así una mayor claridad. Este recubrimiento se puede aplicar a cualquier tipo de lente a la vez que se asegura la uniformidad total del color en toda la lente sin importar la prescripción (*Suárez, Cadena, 2011*).

Las **características ideales** que debe presentar un compuesto para ser clasificado como fotocromático son las siguientes:

- Que presenten cambios rápido de color al estar en contacto con luz UV o calor.
- Que sean fáciles de adquirir y que puedan ser sintetizados en grandes cantidades.
- Que puedan ser manejados en condiciones ambientales normales.
- Que posean alta sensibilidad y resolución.
- Que cuenten con alta estabilidad por largos períodos de tiempo (10 años).

- Que puedan ser reutilizados por aproximadamente 10^6 ciclos de reversibilidad. Esto es la resistencia que presenta a la fatiga
- Que posean un buen rendimiento cuántico, es decir, que un mayor número de moléculas puedan ser excitadas con la menor cantidad de radiación posible (*García, 1999*).

A lo largo de las numerosas generaciones de lentes que se han ido sucediendo, las lentes fotocromáticas han experimentado mejoras considerables. Procederemos a evaluar sus condiciones, las cuales buscan alcanzar un desempeño óptimo de la lente fotocromática.

- **Tan transparente como una lente incolora en estado inactivo:** en estado claro, las lentes fotocromáticas muestran una transmisión de aproximadamente un 90% que llega al 95% si incorporan un tratamiento antirreflejante, son más transparentes incluso que las lentes incoloras. Cabe destacar que el recubrimiento antirreflejante, además de mejorar su transparencia, favorece el fenómeno fotocromático ya que aumenta la intensidad de luz que penetra en la lente
- **Tan oscuro como una lente solar en estado activo:** cuando se ha oscurecido, la transmisión de la lente desciende hasta el 12 o 15% tras una activación a 23°C. Alcanza el mismo nivel que un filtro de categoría 3. Las lentes fotocromáticas pueden competir con las solares, si bien el tono gris se oscurece ligeramente más que el marrón.
- **Cinética de oscurecimiento muy rápida:** al cabo de 30 segundos de la activación, la transmisión de la lente desciende aproximadamente a un 30%. Después de 1 minuto, al 20% y, después de 2 minutos, al 15%, lo cual demuestra la eficacia del fenómeno fotocromático.
- **Cinética mejorada de aclaramiento posterior:** el tiempo necesario para que la lente vuelva a aclararse siempre supera el del oscurecimiento. Este es el punto débil del fotocromatismo, aunque actualmente se ha mejorado reduciendo de forma considerable pues en 30 s la transmisión asciende del 12-15% al 25% de media, y en 2 min, al 45%. En cambio, el aclaramiento tarda entre 7-9 min en llegar al 70%, dependiendo de si son marrones o grises respectivamente. Mientras que para que la lente vuelva al estado claro se necesitan entre 20-25 min (*Meslin, 2010*).

Pero además de estas características, las lentes oftálmicas con recubrimiento fotocromático suelen ir acompañadas de otros recubrimientos, como ya mencionamos en el primer apartado de este trabajo.

4.5. TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN DE LENTES FOTOCROMÁTICAS

Existen cuatro tecnologías de fabricación para la producción de lentes fotocromáticas orgánicas:

- **EN MASA:** el compuesto fotocromático hace parte directamente de la lente, es decir, cuando se forma la lente, uno de sus componentes es el compuesto fotocromático (*Tian, Zhang, 2016*).

- **LAMINACIÓN:** Durante la preparación de la lente, directamente se añaden las moléculas fotocromáticas (*Tian, Zhang, 2016*). Es la más usada con los materiales orgánicos y de policarbonato. El tratamiento que contiene las moléculas fotocromáticas se deposita sobre la superficie anterior de la lente por contacto con el material (se impregna manualmente en los tejidos que se colocan secuencialmente sobre el molde) y antes de los tratamientos antirrayado y antirreflejante, con un grosor total de entre 15-20 μm . La tecnología usada para la aplicación de este tratamiento se parece a la empleada para aplicar los tratamientos endurecidos, el cual se basa en un proceso denominado “*bombardeo de la lente*”: en una campana de alto vacío, con *partículas de cuarzo* que se adhieren al cristal, de forma que se consigue que esta se vuelva hasta 20 veces más dura, evitando arañazos y dificultando el deterioro superficial de la lente (*Pradana, 2019*). El tratamiento aporta al cristal su función fotocromática, con la aplicación posterior de los tratamientos de resistencia al rayado y antirreflejantes necesarios (*Meslin, 2010*).

- **RECUBRIMIENTO:** los compuestos fotocromáticos se depositan en la cara frontal y/o posterior de la lente usando un método de recubrimiento adecuado. Previamente estos compuestos están dispersos en disolución junto con una resina y se depositan en la lente usando varias técnicas como el recubrimiento por inmersión (**dip-coating**) o por centrifugación (**spin-coating**) (*Tian, Zhang, 2016*).

El **recubrimiento por inmersión o dip coating** es un proceso bastante sencillo donde la lente que se va a recubrir, se sumerge en una disolución que contiene principalmente el compuesto fotocromático (*Precision dip coating, 2021*). Puede dividirse en 5 etapas:

- **Etapa 1 → Inmersión:** la lente limpia se sumerge en la disolución del recubrimiento a una velocidad constante.
- **Etapa 2 → Inicio:** la lente permanece en la disolución por un tiempo determinado, hasta que comienza a retirarse.
- **Etapa 3 → Deposición:** mientras se extrae la lente, se ha depositado sobre la lente una película delgada de recubrimiento.
- **Etapa 4 → Drenaje:** en este paso el exceso de líquido de la superficie de la lente se drena, quedando una capa aún más fina.
- **Etapa 5 → Evaporación:** el disolvente se evapora de la superficie de la lente formando una película delgada y dura (*Sahoo et al., 2018*).

Este proceso se puede repetir varias veces hasta alcanzar el espesor de capa deseado, cuidando siempre los pasos para evitar desprendimiento y/o cuarteo de la capa. Los factores que determinan el grosor de la capa son: la tensión superficial, la viscosidad de la disolución, y la rapidez a la que el sustrato se retira de la disolución. A mayor velocidad de extracción, menor espesor (*Sahoo et al., 2018*).

Podemos ilustrar todo el proceso del dip-coating en la siguiente figura (*figura 21*):

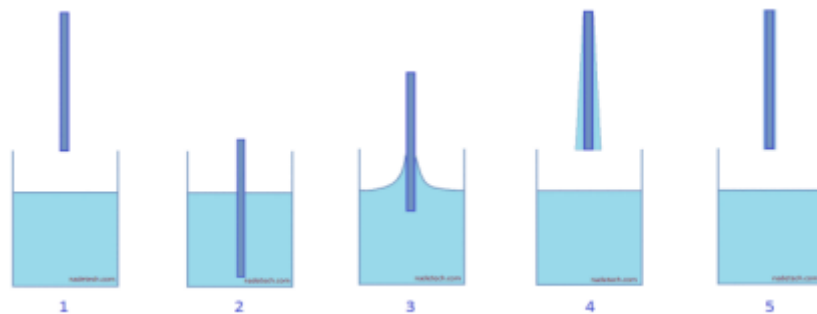


Figura 21: Etapas del proceso de dip-coating. (Fuente: Nadetech Innovations, 2017).

El **recubrimiento por centrifugación o spin-coating** consiste en colocar en el centro de la lente una disolución y hacerla girar a alta velocidad. Puede dividirse en 3 etapas:

- **Deposición:** se deposita en el centro de la lente una pequeña cantidad de la disolución con la que se desea recubrir.
- **Centrifugado:** la lente se hace girar rápidamente. La disolución se esparce por toda la superficie de esta de manera homogénea.

- **Secado:** mediante calor o radiación UV, se elimina el disolvente de la superficie de la lente creando una fina capa sólida (Sahoo et al., 2018).

Podemos ilustrar todas las etapas del proceso en la siguiente figura (figura 22):

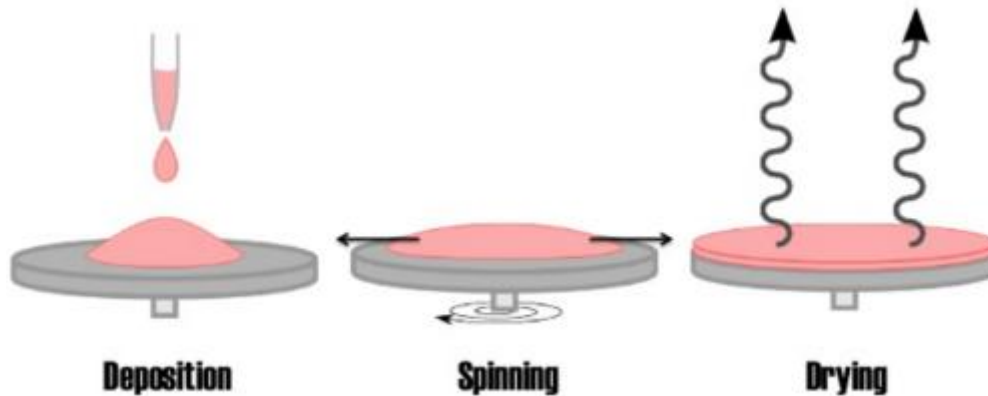


Figura 22: Etapas del proceso de spin-coating. (Fuente: FindLight, 2017).

Las ventajas que presenta el **dip coating** frente al **spin-coating** es que el espesor de la capa es fácilmente ajustable, ya que la lente se puede recubrir con una monocapa del material de recubrimiento o con multicapas siendo necesario para ello varias inmersiones en la disolución coloidal del recubrimiento (Sahoo et al., 2018).

El **spin-coating** presenta los inconvenientes de que no se pueden recubrir ambas caras de la lente simultáneamente y que es lento para realizar recubrimientos multicapa con distintas funciones (Sahoo et al., 2018).

- **IMBIBICIÓN:** se forma una capa fotocromática de aproximadamente 0,2 mm de espesor en la superficie de la lente al permitir que el tinte se difunda en la matriz del polímero (Tian, Zhang, 2016). Es la más empleada en la fabricación de lentes de índice de refracción 1.5. El procedimiento se realiza a partir de lentes semiacabadas previamente fabricadas con un material cuya composición química se ha adaptado a las necesidades de la fotocromatización. Sobre la cara anterior de las lentes semiacabadas se deposita por spin-coating el recubrimiento fotocromático. (Meslin, 2010).

Todos estos procedimientos de fotocromatización se llevan a cabo en serie en instalaciones especiales, siempre antes del retallado de la lente. A las lentes ya tratadas se aplica un revestimiento protector de resistencia al arañazo, que sería la capa final que estaría en

contacto directo con el medio ambiente. Con los materiales orgánicos fotocromáticos son posibles todas las geometrías de lentes, ya sean monofocales o progresivas, y en toda la gama de materiales de índice de refracción (Meslin, 2010).

4.6. MARCAS COMERCIALES DE LENTES FOTOCROMÁTICAS

En este trabajo nos hemos centrado sobre todo en la marca más conocida de lentes fotocromáticas, la cual es *Transitions*. Son las lentes más oscuras del mercado, con una gran rapidez en la transición oscuro-claro y presentan dentro de la gama muchas opciones que se adaptan a cada usuario. Por ejemplo “XTRActive” está especialmente diseñada para usuarios que son sensibles a la luz en interiores y desean una lente que posean un ligero tinte en interiores para mantener una comodidad visual. (Brillens, s.f).



Como podemos observar en la *figura 23*, las lentes transitions presentan una tonalidad muy oscura.

Figura 23. Lentes transitions. (Fuente: V2MSHOP, s.f.).

Como podemos observar en la *figura 24*, las lentes XTRActive poseen un cierto tono residual en interiores, muy útil para personas muy sensibles a la luz.

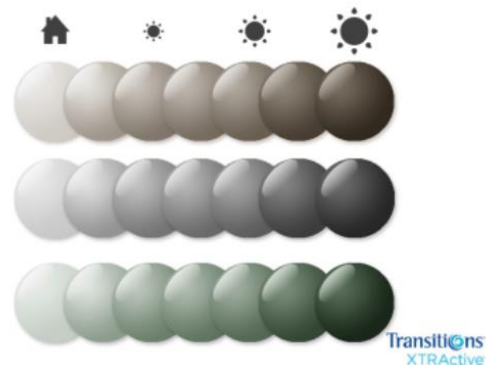


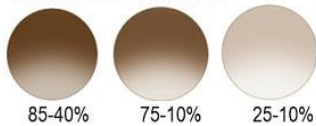
Figura 24. Lentes XTRActive. (Fuente: Linazasoro, 2020).

Otra marca conocida es *PhotoFusion* de Carl Zeiss (*figura 25*) que, aunque no presenta un tono tan oscuro como *Transitions*, están disponibles en un tono gris neutro para una visión precisa del color en todas las condiciones de iluminación. (*Brillens, s.f.*)

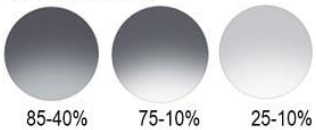


Figura 25. *Photofusion* de Zeiss. (Fuente: *luyandoopticos, s.f.*)

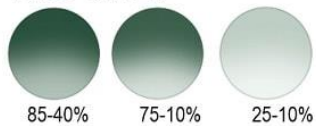
CHESTNUT BROWN



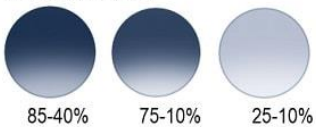
SMOKY GREY



PILOT GREEN



STEEL BLUE



También se encuentran las lentes *ColorMatic* de Rodenstock, disponibles en tonos fotocromáticos grises, marrones y verdes (*Brillens, s.f.*). Como podemos ver en la *figura 26*, presentan gran variedad de porcentajes de tonalidades, adaptándose a todo tipo de usuarios.

Figura 26. *ColorMatic* de Rodenstock. (Fuente: *rodenstock, s.f.*)

Por último, hablaremos de las lentes *LifeRx* (figura 27), hechas de policarbonato y disponibles en tintes fotocromáticos en una variedad de diseños de lentes. Tardan menos de 1 min en oscurecerse al aire libre y se aclaran en interior más rápido que otras lentes fotocromáticas (*Brillens, s.f.*).



Figura 27. LifeRX. (Fuente: *visión ease, s.f.*)

Existen otras marcas más genéricas que son menos costosas y ofrecen un buen tono gris, aunque con transición más lenta (*Brillens, s.f.*).

4.7. CONTROL DE LA CAPA DEPOSITADA

En el *apartado 4.1*, hemos explicado los principios de funcionamiento y propiedades de un recubrimiento fotocromático, y es importante destacar que la técnica utilizada para explicar esos conceptos se realiza mediante **espectroscopía Ultravioleta-Visible**.

Esta técnica permite estudiar la transparencia ante la luz ultravioleta y visible de una película delgada. Hay que tener en cuenta que para que se produzca una interacción en la materia, la radiación electromagnética incidente debe tener una longitud de onda menor o igual que la extensión del cuerpo irradiado (*Química, 2010*).

El **fundamento** de la espectroscopía se basa en la capacidad de ciertas moléculas para absorber radiaciones del espectro UV-Visible, teniendo en cuenta las longitudes de onda que la molécula es capaz de absorber, además de la eficiencia con la que lo hace, la cual depende de la estructura atómica y de las condiciones del medio. (*Nieves et al., s.f.*)

Su **funcionamiento** se basa en la luz de la lámpara especial que posee, que es guiada por medio de un conector que selecciona y separa la luz de la longitud de onda, para luego pasar por una muestra. En otras palabras, se trata de iluminar una muestra con luz blanca, para luego calcular cuánto es la cantidad de luz que se refleja a través de una serie de intervalos de longitudes de onda (*materiales de laboratorio, s.f.*).

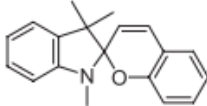
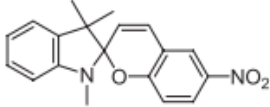
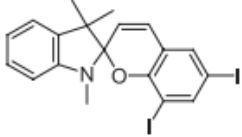
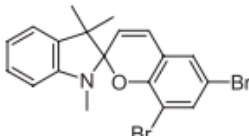
Como ejemplo para demostrar la eficiencia de los compuestos fotocromáticos se evaluará la estabilidad de la **fotomerocianina** (forma abierta coloreada), y su reversión a su forma cerrada (incolores) en la reacción de isomerización, ya presentada en el *apartado 4.2*.

La evaluación se realizó a una concentración de 10^{-5} M de los compuestos sintetizados por espectroscopía UV en dimetilsulfóxido (DMSO) como disolvente. La determinación del valor de la longitud de onda máxima de absorción (λ_{\max}) se realiza en su estado basal incoloro y en su estado excitado (García et al., 2004).

El estado coloreado de un compuesto en solución llega después de iluminar con luz UV celdas de cuarzo que contienen el material que interesa estudiar durante 2 min a temperatura ambiente. Los resultados se encuentran registrados en la *tabla 2*. Se puede observar que los **compuestos 1, 3 y 4** no presentan mucha diferencia en la longitud de onda máxima, tanto antes como después de ser irradiados. Ambos valores se encuentran en la región ultravioleta del espectro (262-296 nm), corroborando estos resultados con la ausencia de color en la solución, aunque hayan sido expuestas a radiación ultravioleta. (García et al., 2004)

En cambio, después de la irradiación ultravioleta, el **compuesto 2**, el cual presenta un grupo nitro en la posición 6, presenta una nueva banda de absorción a una longitud de onda con un máximo a 580 nm, lo cual origina una coloración morada. El grupo nitro es el que permite desplazar la banda de absorción hacia la región visible del espectro electromagnético y es un cambio reversible. (García et al., 2004)

Tabla 2. Determinación de λ_{\max} de los derivados espirobenzopiránicos 1-4 mediante espectroscopia UV. (Fuente: García et al., 2004).

Compuesto	Nombre	λ_{\max} (nm) antes de irradiar.	λ_{\max} (nm) después de irradiar.
1		296	296
		262	262
2		434	346
		346	274
		274	580
3		280	280
			262
4		280	296
			280
			262

La utilidad de estos compuestos es variable, siendo favorecidos aquellos cuyas longitudes de máxima absorción se desplazan hacia el rojo, los cuales serán los que presenten mejores propiedades fotocromáticas (*García et al., 2004*).

5. CONCLUSIONES

Tras realizar una revisión bibliográfica sobre los recubrimientos fotocromáticos para lentes oftálmicas se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- 1) Existe una gran variedad de materiales que presentan buenas características para la aplicación de recubrimientos fotocromáticos, tanto en lentes orgánicas como inorgánicas, siendo más eficaces las diseñadas con materiales orgánicas por no presentar sensibilidad directa a la luz UV.
- 2) Existen diversos métodos para la deposición del recubrimiento fotocromático. Todos presentan ventajas e inconvenientes y el uso de uno u otro depende del fabricante y los equipos de los que disponga. Aunque hay que destacar el dip-coating debido a su facilidad, bajo coste y alta disponibilidad.
- 3) El uso de lentes oftálmicas con recubrimiento fotocromático es un acierto debido a que se adapta a diferentes tipos de usuarios, permite tener dos gafas en una y, por ende, también es más barato. Aunque también puede tener inconvenientes por el tiempo de adaptación entre interior/exterior y el tono residual.
- 4) Existen numerosas técnicas para caracterizar las propiedades de los recubrimientos fotocromáticos, pero este trabajo solo se ha centrado en la espectroscopía UV-Vis, el cual es un método que permite obtener propiedades ópticas.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Abril N., Bárcena J. A, Fernández E., Galván A., Jorrín J., Peinado J., et al. Espectrofometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas. [Consultado en mayo 2022] Disponible en: https://www.academia.edu/8476623/8_Espectrofometr%C3%ADa_Espectros_de_absorci%C3%B3n_y_cuantificaci%C3%B3n_colorim%C3%A9trica_de_biomol%C3%A9culas

2. Avagliano D, Sánchez-Murcia PA, González L. DNA-binding mechanism of spiropyran photoswitches: the role of electrostatics. *Phys Chem Chem Phys*. 2019; 21(17): 8614–8.
3. Benavides. Modificación en los Ambientes Espectrales de Crecimiento y su Efecto Sobre el Comportamiento Fisiológico y Productividad de *Lactuca Sativa L.* y *Spinacia oleracea L.* Monterrey: Universidad Autónoma de Nuevo León; 1998. 1080087098.
4. Benzopiranos. [Consultado en abril 2022] Disponible en: <https://www.fishersci.es/es/es/browse/80013831/Benzopiranos>.
5. Brillens. Marcas de lentes fotocromáticas. [Consultado en mayo 2022] Disponible en: <https://brillens.com.ar/lentes-fotocromaticas/>
6. Celani, P.; Bernardi, F.; Olivucci, M.; Robb, M. Conical Intersection Mechanism for Photochemical Ring Opening in Benzospiropyran Compounds. 1997; 119: 10815-10820.
7. Centro Nacional de Salud Ambiental. Radiación UV. 2021. [Consultado en mayo 2022] Disponible en: <https://www.cdc.gov/spanish/nceh/especiales/radiacionuv/index.html>
8. Cienciahoy. ¿Qué son las reacciones pericíclicas? 2021. [Consultado en febrero 2022] Disponible en: <https://cienciahoy.net/que-son-las-reacciones-periciclicas/>
9. Crano JC, Guglielmetti RJ. *Organic Photochromic and Thermochromic Compounds: Main Photochromic Families*. Nueva York, Estados Unidos de América: Kluwer Academic/Plenum; 2010.
10. de Patentes Y Marcas OE. Naftopiranos fotocromicos condensados con indeno, naftoles y artículos fotocromicos. 2018. [Consultado en abril 2022] Disponible en: <https://patentados.com/2018/naftopiranos-fotocromicos-condensados.1>
11. del Mar Reguero M. Estudio teórico de mecanismos de fotocromismo, fotomagnetismo y luminiscencia en compuestos orgánicos. Universitat Rovira i Virgili (Tarragona); 2015.
12. Dessauer, J.P. *Photochemistry: Advances in Photochemistry*. interscience, New York. 1963; 143: 1317- 1318.

13. Dispositivos Fotónicos/Ópticos. [Consultado en marzo 2022] Disponible en: <http://gtq.imb-cnm.csic.es/es/lineas-investigacion/dispositivos-fotonicos/opticos>.
14. Dür.H. Photochromism. 1º Ed. Elsevier: 1990.
15. Fernández G. Espectroscopía visible- Ultravioleta. [Consultado en mayo 2022] Disponible en: <https://www.quimicaorganica.org/espectroscopia-visible-ultravioleta/735-grupos-cromoforos-y-auxocromos.html#:~:text=Los%20grupos%20crom%C3%B3foros%20son%20los,un%20%C3%A1tomo%20con%20pares%20libres>).
16. FindLight. AR Coating Techniques: Thin Film Deposition Methods. 2017. [Consultado en mayo 2022]. Disponible en: <https://www.findlight.net/blog/2017/12/15/arcoating-techniques/>
17. Fisherscientific. 3,4-Dihidro-2H-pirido[3,2-b] [1,4] oxazina, 97 %, Thermo Scientific. [Consultado en marzo 2022] Disponible en: <https://www.fishersci.es/shop/products/3-4-dihydro-2h-pyrido-3-2-b-1-4-oxazine-97-thermo-scientific/10052514>
18. Fisherscientific. Indolina, 98 %, Thermo Scientific. [Consultado en marzo 2022] Disponible en: <https://www.fishersci.es/shop/products/indoline-98-thermo-scientific/p-3736730>
19. García, Aída E.; Elizalde, Luis E.; Guillén, Lourdes; Santos, Gladys de los; Medellín, Diana I. Síntesis y evaluación fotocromática de compuestos espirobenzopiránicosJ. Mex. Chem. Soc. 2004; 48 (4): 269-274.
20. García AE. Síntesis de derivados de 1,2 diariletanos y su aplicación como compuestos fotocromáticos. Facultad de Ciencias químicas, 1999.
21. Herrera, A. ¿Qué es la luz? ¿Qué es el color? El espectro visible. 2014 [Consultado en mayo 2022] Disponible en: <https://ahenav.com/2014/03/28/que-es-la-luz-que-es-el-color-el-espectro-visible/>

22. Hmong. Espiropirano. [Consultado en abril 2022] Disponible en: <https://hmong.es/wiki/Spiropyran>
23. Interempresas. Ya está disponible en Europa el recubrimiento de lente antivaho Hydroshield de Honeywell. 2018. [Consultado en mayo 2022] Disponible en: <https://www.interempresas.net/Proteccion-laboral/Articulos/209543-Ya-esta-disponible-en-Europa-el-recubrimiento-de-lente-antivaho-Hydroshield-de-Honeywell.html>
24. Irie M. Photochromism: Memories and switches-introduction. Chem rev (Kyushu University). 2000; 100(5): 1685–1716.
25. Itoh K, Okamoto T, Wakita S, Niikura H, Murabayashi M. Thin films of peroxopolytungstic acids: applications to optical waveguide components. Applied Organometallic Chemistry 1991; 5(4): 295–301.
26. IUPAC. Compendio de terminología química, 2ª ed. Oxford (1997).
27. Ivogt. Elementos de simetría de la cicloadición [2+2]. 2012. [Consultado en abril 2022]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2plus2_symmelements.png
28. Kleiner L.E. Espectro electromagnético. [Consultado en mayo 2022] Disponible en: https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/es/lamparas-bajo-consumo/glosario/def/espectro-electromagnetico.htm
29. Linazaroso I. Transitions Xtractive: las lentes con extra de confort. 2020. [Consultado en mayo 2022]. Disponible en: <https://linazaroso-optika.eus/transitions-xtractive-las-lentes-con-extra-comfort/>
30. López, A. Un invento revolucionario en la Edad Media: las gafas. National Geographic. 2020. [Consultado en marzo 2022] Disponible en: https://historia.nationalgeographic.com.es/a/invento-revolucionario-edad-media-gafas_11545

31. Lukyanov BS, Lukyanova MB. Spiropyran: Synthesis, properties, and application. *Chem Heterocycl Compd* 2005; 41: 281–311.
32. Luyandoopticos. Photofusion. [Consultado en mayo 2022] Disponible en: <https://www.luyandoopticos.com/marcas/marcas-sanitarias/zeiss/attachment/photofusion/>
33. Martens J. Estructura química del mecanismo de reordenamiento del cicloheptatrieno-norcaradieno. 2008. [Consultado en abril 2022]. Disponible en: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/51/Cycloheptatriene-Norcaradiene_Rearrangement.png
34. Materiales de laboratorio. Espectrofotómetro. [Consultado en mayo 2022]. Disponible en: <https://materialeslaboratorio.com/espectrofotometro/>
35. Meslin D. *Materiales y tratamientos*. Paris: Essilor Academy Europe; 2010.
36. Metelitsa A. V.; Knyazhansky M. I.; Lyashik O. T.; *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1994; 246: 59
37. Morrison H., Deibel R.M. *Photochem.* 1986; 43: 663.
38. Nadetech Innovations. Dip coating process – Nadetech Innovations. 2017. [Consultado en mayo 2022]. Disponible en: <https://nadetech.wordpress.com/2017/05/18/dipcoating/>
39. Navarro, A. *Materiales ópticos inorgánicos: propiedades de vidrios y metales para óptica*. 5ª ed. España; 2006
40. Navarro, A. *Materiales ópticos orgánicos: monturas y lentes*. 1ª ed. España; 2007.
41. Negri RM, Prysztajn HE. An experiment on photochromism and kinetics for the undergraduate laboratory. *Journal of Chemical Education* 2001; 78 (5), 645.
42. Pradana, D. *Tratamientos de las lentes oftálmicas*. 2019. [Consultado en mayo 2022] Disponible en: <https://opticagasset.com/gafas/tratamientos-lentes-oftalmicas/>

43. Precision dip. Dip Coating vs. Spin Coating: When To Use Which Method. 2021. [Consultado en abril 2022]. Disponible en: <https://www.precisiondipcoating.com/dip-coating-vs-spin-coating-when-to-use-which-method>
44. Prucommercialre. ¿Qué es fotocromatismo? 2015. [Consultado en abril 2022] Disponible en: <https://www.prucommercialre.com/que-es-fotocromismo/>
45. Química, D. de I. Espectroscopia Ultravioleta - Visible. Universidad Carlos III de Madrid. 2010;1–9.
46. Rivera-Fuentes P, Wrobel AT, Zastrow ML, Khan M, Georgiou J, Luyben TT, Roder JC et al. A far-red emitting probe for unambiguous detection of mobile zinc in acidic vesicles and deep tissue. *Chem Sci*. 2015; 6(3): 1944–8.
47. Rodenstock. Gafas de sol Rodenstock: con o sin graduación. [Consultado en mayo 2022] Disponible en: <https://www.rodenstock.com/cl/es/gafas-de-sol.html>
48. Saltiel J., Agostino J.D., Dennis E, Metts L., Neuberger K.R., Wrigton M. et al. The cis-trans isomerization of olefins, in o.c.chapman organic, *Photochemistry*; 1963; 3.
49. Samson, F. Ophthalmic lens coatings. 1996; 81: 79–86.
50. Suárez H, Cadena C. Determinacion de la fotoproteccion de lentes de sol fotocromáticos, polarizados y de policarbonato. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 2011; 15.
51. Suárez P. (Naftopiranos; Naftopiranos hidrogenados. 2007. [Consultado en marzo 2022] Disponible en: <https://patentados.com/cip-2021/naftopiranos-naftopiranos-hidrogenados/>
52. Suárez P. Derivados fotocromicos de benzo(f)cromeno h-anillados. 2010. [Consultado en abril 2022] Disponible en: <https://patentados.com/2010/derivados-fotocromicos-de-benzo-f>

53. Suárez P. ESPIRO-DIHIDROFENANTROPIRANOS FOTOCROMICOS. 2010. [Consultado en marzo 2022]. Disponible en: <https://patentados.com/2010/espiro-dihidrofenantropiranos>
54. Tian H., Zhang J. Photochromic materials: Preparation, properties and applications. 1ª Ed. Alemania: Wiley-vhc; 2016.
55. V2MSHOP. Cristales fotocromáticos. [Consultado en mayo 2022] Disponible en: https://www.v2mshop.com/?category_id=1160570
56. Visione ase. ¿Cuáles con las lentes que responden a la luz? [Consultado en mayo 2022] Disponible en: <http://esp.vision-ease.com/home/consumidores/liferx.aspx>
57. Wikipedia. Benzopirano. 2021. [Consultado en marzo 2022] Disponible en: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Benzopirano&oldid=133833533>
58. Woodward R. B, Hoffman R., J.Am.Chem.Soc; 1965; 87: 395-397
59. Zeiss. Espejos y recubrimientos. [Consultado en mayo 2022] Disponible en: <https://www.zeiss.es/vision-care/sunlens/productos/espejos-y-recubrimientos.html>
60. Zeiss. Tratamiento para lentes. 2020. [Consultado en abril 2022] Disponible en: <https://cutt.ly/VyFyPLz>.
61. Zeiss. Tratamiento para lentes: antideslumbrante, de alta resistencia al rayado tratamientos para facilitar la limpieza como CleanCoat, etc. 2017. [Consultado en mayo 2022] Disponible en: <https://www.zeiss.es/vision-care/mejor-vision/salud-y-prevencion/tratamiento-para-lentes-antideslumbrante-de-alta-resistencia-al-rayado-tratamientos-para-facilitar-la-limpieza-como-cleancoat-etc-.html>