

## 4. *Multidisciplinariedad en ciencias de la visión. Experiencias de doctorandos*

### MULTIDISCIPLINARITY IN VISION SCIENCE. PHD'S EXPERIENCES

**Alejandra Consejo**

Licenciada en Física por la Universidad de Zaragoza.

#### RESUMEN

Las ciencias de la visión es un campo de estudio multidisciplinar. Más allá de la oftalmología, la investigación del ojo humano se nutre de la física, la ingeniería, la biología, las matemáticas y la química, entre otras ramas de conocimiento. Este trabajo de desarrollo trata sobre las diferentes formas de investigación del ojo humano, y está especialmente enfocado en las experiencias de jóvenes investigadores que han realizado su tesis doctoral en el contexto de las ciencias de la visión. Se analizan las dificultades a las que se enfrenta el investigador joven al empezar una carrera investigadora en el campo de las ciencias de la visión y se discuten qué tipo de colaboraciones profesionales son las más habituales. Un total de 23 jóvenes doctores han compartido su opinión y experiencia como jóvenes investigadores de la visión y el ojo humano. Además del personal sanitario que trata diariamente con los pacientes, oftalmólogos y optometristas, en este trabajo de desarrollo también se recoge la experiencia de otros muchos (físicos, ingenieros, biólogos, matemáticos, químicos, etc.) en el estudio del ojo humano y las ciencias de la visión.

**Palabras clave:** Ciencias de la visión, investigación, ojo humano, oftalmología, optometría.

#### ABSTRACT

*Vision science is a multidisciplinary field of research. Beyond Ophthalmology, eye research is based on Physics, Engineering, Biology, Mathematics and Chemistry, among others. This dissertation discusses the different forms of research on the human eye topic, and it's especially focused on the experiences of young researchers who have carried out their doctoral thesis in the context of vision sciences. The difficulties faced by young researchers when starting a research career in the field of vision sciences are analyzed, and what type of professional collaborations are the most common is discussed. A total of 23 young PhD shared their opinion and experience as young researchers in the field of human eye and vision sciences. In addition to practitioners, Ophthalmologists and Optometrists, in*

*this dissertation the experience of many other professionals related to vision science (Physicists, Engineers, Biologists, Mathematicians, Chemists, etc.) is also shared and discussed.*

**Keywords:** vision sciences, research, human eye, ophthalmology, optometry.

#### OBJETIVOS DEL TRABAJO

Los objetivos principales del presente trabajo de desarrollo se enumeran a continuación:

- 1. Describir la multidisciplinariedad de las ciencias de la visión.** El estudio del ojo humano y las ciencias de la visión es una rama del conocimiento de un marcado carácter multidisciplinar. Más allá de la oftalmología, la optometría, la física, la ingeniería biomédica, la ingeniería óptica, la ingeniería biomecánica, las matemáticas, la farmacia, la química son algunas de las ramas del conocimiento que juegan un papel fundamental en el desarrollo y el avance de las ciencias de la visión.
- 2. Ejemplificar la multidisciplinariedad de las ciencias de la visión.** Se utilizarán un total de siete ejemplos reales y recientes, para ilustrar el marcado carácter multidisciplinar de las ciencias de la visión.
- 3. Detallar los retos pendientes en la investigación de las ciencias de la visión.** Para poder avanzar en la investigación de cualquier campo de estudio es importante analizar las deficiencias del mismo, y en particular en ciencias de la visión, es necesario conocer las necesidades clínicas que existen y que aún están pendientes de ser resueltas.
- 4. Analizar las dificultades que encuentran los investigadores jóvenes que trabajan en el campo de ciencias de la visión.** Se analizará detalladamente si estas dificultades tienen o no que ver con el carácter multidisciplinar de esta rama del conocimiento.

#### METODOLOGÍA

Para dar el contexto teórico a este trabajo de desarrollo se han utilizado diversas publicaciones científicas. La búsqueda en la literatura se ha basado a publicaciones indexadas en Google Académico en su versión internacional (<https://scholar.google.com/>) y PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>). Además, para dotar a este trabajo de desarrollo de su propio carácter original se ha contado con el apoyo de un total de 23 investigadores jóvenes de diferentes nacionalidades que han completado su tesis doctoral en los últimos años. Estos investigadores, aun viniendo de áreas del conocimiento muy diversas, tienen en común que su trabajo de investigación está dedicado al campo de las ciencias de la visión. Estos jóvenes investigadores compartieron su opinión y experiencia por medio de una encuesta o entrevista estructurada, que se puede ver en detalle en el Anexo 1 (en inglés). En este trabajo de desarrollo se recogen tanto las experiencias per-

sonales de estos investigadores como las tendencias generales observadas, presentadas en forma de gráfico de barras o gráfico circular.

La parte de desarrollo del presente documento se divide en dos partes bien diferenciadas: 'Investigación en ciencias de la visión' y 'La multidisciplinariedad en las ciencias de la visión: experiencias y ejemplos reales'.

### INVESTIGACIÓN SOBRE EL OJO HUMANO

El ojo humano es un órgano extraordinariamente complejo. Funciona como una cámara que capta y enfoca la luz para convertirla en una señal eléctrica que el cerebro traduce en imágenes. En esta primera sección de desarrollo se describirá brevemente la anatomía del ojo humano y el proceso de visión. Además, se presentarán las enfermedades oculares más prevalentes hoy en día, y se describirá la instrumentación oftálmica más utilizada para el diagnóstico y seguimiento de dichas enfermedades y dolencias oculares. En esta sección se incluye una reflexión sobre cuáles son los retos de investigación de los científicos que se dedican a investigar esta parte del cuerpo humano. En este contexto, se describirá qué es un doctorado y se presentarán los problemas más frecuentes a los que se enfrenta el investigador novel.

#### Descripción anatómica básica del ojo humano

El sentido de la vista se basa en el órgano que detecta la luz, el ojo. En esta sección se describirá de forma sucinta la anatomía del ojo humano. Los párpados y las pestañas protegen la parte externa del ojo y favorecen que la suciedad, el polvo e incluso la luz intensa y perjudicial no entren en su interior, tal y como indica la Figura 1. De forma general, se puede decir que el órgano de la visión está compuesto por los párpados, los globos oculares, el aparato lagrimal y los músculos oculares externos (Figura 2). El globo ocular tiene unos 25 mm de diámetro. Los músculos extraoculares mantienen al ojo en su posición (1). El globo ocular reposa en la cuenca del ojo (también conocida como 'órbita') dentro del cráneo, donde está rodeado de hueso (Figura 2).



Figura 1. Ojo humano protegido por los párpados y las pestañas (producción propia).

Podemos ver objetos en tres dimensiones gracias a la visión binocular, es decir, gracias a la participación de ambos ojos en el proceso de visión (2).

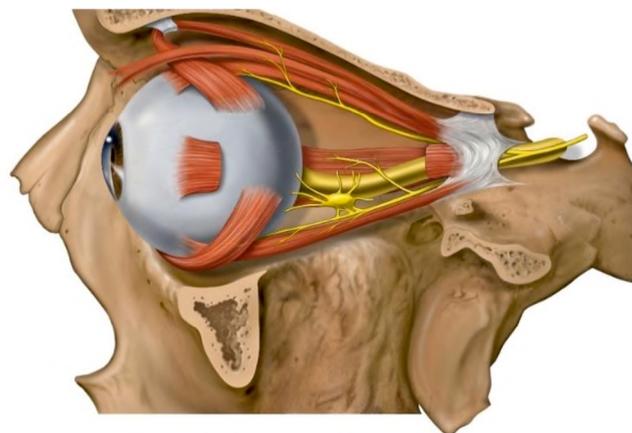


Figura 2. Globo ocular situado en la órbita, músculos extraoculares y nervio óptico (Autor: Patrick J. Lynch 2006; Fuente: [https://en.wikipedia.org/wiki/Human\\_eye#/media/File:Lateral\\_orbit\\_nerves.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Human_eye#/media/File:Lateral_orbit_nerves.jpg))

La pared del ojo está formada por tres capas:

- La capa externa: Incluye la esclerótica (una capa densa, resistente y de un característico color blanco) (3), a menudo llamada simplemente esclera, y en la zona anterior el limbo y la córnea, característica por su transparencia.
- La capa media: Incluye la coroides, que tiene cuantiosos vasos sanguíneos, y el tejido conjuntivo del cuerpo ciliar y el iris.
- La capa interna: Se conoce como 'retina'. En la retina se encuentran las células sensibles a la luz (los bastones y los conos). Externamente, la retina está en contacto con la coroides; mientras que internamente, está en contacto con el humor vítreo.

En el esquema de la Figura 3 se muestra la posición en el globo ocular de estas estructuras anatómicas.

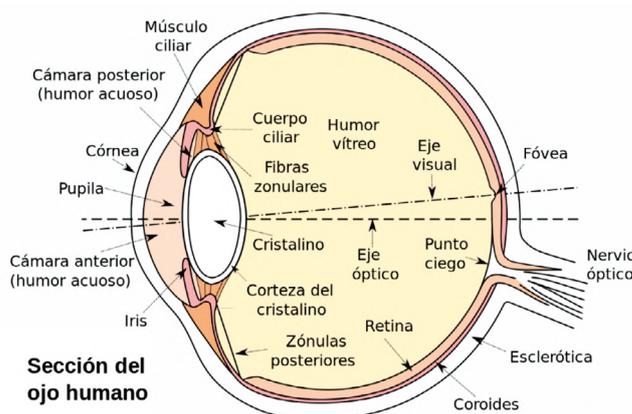


Figura 3. Sección del ojo humano (Dominio público. Fuente: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eyesection-es.svg>)

#### El proceso de visión

Cuando la luz entra en el ojo debe atravesar la película lagrimal. La película lagrimal hace la misma función que un espejo. Si hay un cuerpo extraño en la película lagrimal o si el ojo está seco, la visión será borrosa. (4) Además, la película lagrimal funciona como una lente, refractando la luz incidente. De hecho, la película lagrimal es la primera

superficie refractora del ojo. En este contexto, una superficie refractora es aquella que modifica la dirección de la luz entrante con el objetivo de que la luz se enfoque en la retina, lo que será necesario para producir una imagen nítida. (5,6) Después de atravesar la película lagrimal, la siguiente estructura ocular que atraviesa la luz al entrar en el ojo es la córnea. La córnea refracta la luz incidente más que ninguna otra estructura del ojo, más incluso que el cristalino. Si la superficie corneal no es regular, debido algún defecto o enfermedad, entonces la luz no entra correctamente al ojo, impidiendo una visión óptima.

Una vez dentro del ojo, la luz atraviesa la cámara anterior, que está rellena del humor acuoso. El humor acuoso es normalmente un líquido claro que tiene cierto poder refractivo en sí mismo. Si la claridad del humor acuoso se ve comprometida, lo mismo ocurrirá con la visión. A continuación, la luz atraviesa el iris. El iris es un diafragma pigmentado que separa la parte (o segmento) anterior de la parte (o segmento) posterior del ojo. Después de atravesar la pupila, la luz llega al cristalino. La forma del cristalino está controlada por el músculo ciliar y las fibras de la zónula. Este proceso de control de la forma del cristalino se denomina 'acomodación'. Es fundamental para poder ver con nitidez objetos cercanos. Conforme el ojo envejece, el proceso de acomodación comienza a fallar y por eso son necesarias gafas de cerca para poder leer o hacer trabajo de cerca, es lo que se llama presbicia o vista cansada (7). Una vez que la luz atraviesa el cristalino, la superficie refractora más importante después de la córnea, la luz llega al humor vítreo. Al igual que el humor acuoso, tiene cierto poder refractivo en sí mismo y en condiciones normales es transparente. Sin embargo, si hay sangre o células inflamatorias que se filtran en el vítreo la visión se verá afectada. Lo mismo ocurre si ciertos desechos llegan al vítreo, producen lo que se denomina 'moscas volantes', a menudo descrito por los pacientes que los sufren como telarañas que dificultan la visión (8). Finalmente, la luz llega a la retina. La retina es un tejido sensible a la luz. Como se ha indicado anteriormente, está situada en la superficie interior del ojo. Se podría hacer un símil con un lienzo donde se proyectan imágenes o con una película fotográfica. La luz que llega a la retina produce una serie de fenómenos tanto químicos como eléctricos que se traducen en impulsos nerviosos que finalmente son enviados al cerebro por medio del nervio óptico. La estructura de la retina es compleja. De hecho, las únicas células sensibles a la luz de forma directa son precisamente los conos y los bastones. Se estima que en el ser humano la retina contiene 6.5 millones de conos y 120 millones de bastones.

En el caso ideal, la luz que entra en el ojo proveniente de un objeto lejano (a más de 6 metros de distancia) se refractará en la córnea y posteriormente en el cristalino para enfocarse en la mácula, la parte más sensible de la retina, es decir, responsable de la visión fina de los detalles. Esto ocurrirá en el ojo emétrope, es decir, aquel que no necesita corrección con gafa o lentillas (lentes de contacto). Lo contrario es la ametropía, es decir, padecer algún defecto refractivo (miopía, hipermetropía o astigmatismo) que debemos corregir con gafas, lentes de contacto o incluso cirugía, para una visión óptima. Hoy en día, la ametropía es más habitual que la emetropía (9).

## **Desórdenes y enfermedades oculares más frecuentes**

Los desórdenes y enfermedades que perturban la visión pueden estar causados por diferentes motivos, y tener más o menos impacto en la vida y la salud general del paciente. A pesar de que hay muchos profesionales que trabajan en el tema de la calidad de la visión, en el entorno clínico, siempre será el especialista médico, el oftalmólogo, la persona encargada de determinar qué tipo de patología o dolencia ocular padece el paciente y fijar el tratamiento óptimo para tratar dicha afección.

Según su origen, los desórdenes y enfermedades oculares pueden ser:

- De origen infeccioso: Son aquellos desórdenes oculares causados por un virus, bacteria o incluso hongos. Un ejemplo común en esta categoría es una conjuntivitis (10).
- De origen genético: Son enfermedades oculares que tienen su origen en la propia genética del paciente, en su naturaleza intrínseca (11-14).
- Asociadas a la edad: Son los desórdenes y enfermedades oculares cuyo origen se debe a la degeneración asociada al envejecimiento de algunos de los tejidos que componen el ojo, como, por ejemplo, la presbicia (15,16).

En el campo de la oftalmología y las ciencias de la visión suele ocurrir que la etiología, el origen, de la dolencia a tratar es multifactorial. Es decir, que raramente es evidente la causa original de una determinada enfermedad, es más habitual que sea una combinación de factores, como hábitos de vida, genética, edad del paciente, ... Esto dificulta el pronto diagnóstico de determinadas dolencias oculares y, como se explicará más adelante, constituye uno de los principales focos de investigación en el campo de ciencias de la visión.

En lo siguiente se va a proceder a describir una a una, aunque sin entrar en demasiado detalle, las dolencias y enfermedades oculares más frecuentes. Haciendo especial hincapié en aquellas que son objeto de estudio frecuente de los oftalmólogos e investigadores dedicados a ciencias de la visión.

## **Errores refractivos**

El error de refracción es un problema para enfocar la luz de forma adecuada en la retina, en el fondo del ojo, como consecuencia de la forma del ojo. Los tipos más habituales de errores de refracción son la miopía, la hipermetropía, el astigmatismo y la presbicia (9). De forma general, los errores refractivos provocan emborronamiento en la visión, aunque con diferentes matices. Por ejemplo, la persona miope tendrá dificultad para distinguir nítidamente objetos lejanos. Mientras que la persona hipermetrope o presbita tendrá dificultad para distinguir objetos cercanos con claridad. Por otra parte, el astigmata verá los objetos como estirados o borrosos. Además de la visión borrosa, existen otros síntomas que afectan a las personas que sufren de errores refractivos, como visión doble, dolores de

cabeza o fatiga visual. Es importante tener en cuenta que la presbicia está relacionada con la edad de la persona que la padece, es una clase de error refractivo especial, y por eso se hablará de él en la siguiente sección.

La **miopía**, en la mayoría de los casos, se produce por una excesiva longitud del globo ocular. Al contrario, en la **hipermetropía** el globo ocular es demasiado corto. En el **astigmatismo** sucede que la córnea no tiene una forma lo suficientemente regular. Por otra parte, la presbicia al envejecimiento del cristalino, de manera que a éste le resulta imposible cambiar de forma lo suficiente para poder enfocar objetos cercanos. Algunos errores de refracción tienen un marcado componente genético, por ejemplo, tener padres miopes favorece que el individuo también sufra de miopía. El diagnóstico de los diferentes errores refractivos se realiza mediante un examen ocular rutinario.

De forma general, los errores de refracción se corrigen portando gafas o lentes de contacto. La cirugía es otra solución, ésta de carácter definitivo, para corregir defectos refractivos. Las gafas son consideradas el método de corrección más sencillo y seguro. Una de las ventajas de las lentes de contacto (lentillas) es que proporcionan un campo de visión más amplio; pero a la vez se las asocia con cierto riesgo de infección; así como el desarrollo de la enfermedad de ojo seco (17,18). Cuando decimos que la cirugía refractiva es de carácter definitivo es porque modifica la forma de la córnea de forma permanente.

Se estima que entre uno y dos mil millones de personas en el mundo padecen errores de refracción. La incidencia cambia entre diferentes regiones, se estima que el 25% de los europeos y el 80% de los asiáticos están afectados por diferentes efectos refractivos. La miopía es el error refractivo más habitual (9). Por otra parte, la hipermetropía afecta mayoritariamente a niños pequeños y a ancianos. Globalmente se estima que el número de individuos con errores refractivos no corregidos alcanza los 660 millones (10 por cada 100 personas), datos de 2013. De estas personas, a unos 9.5 millones se les considera ciegos debido precisamente al error de refracción. En consecuencia, y especialmente en los países en vías de desarrollo, los errores refractivos son una de las causas más comunes de pérdida de visión junto con otras afecciones como cataratas, degeneración macular y deficiencia de vitamina A.

### Presbicia o vista cansada

La presbicia, o más popularmente conocida como vista cansada, es una parte normal del proceso de envejecimiento, les ocurre a todas las personas. La presbicia es debida a cambios relacionados con la edad en el cristalino (en concreto, pérdida de la elasticidad e incremento de la dureza de éste) y en el músculo ciliar del ojo. Estas alteraciones inevitables en el cristalino y el músculo ciliar hacen imposible que el ojo pueda enfocar correctamente al mirar objetos cercanos (al leer, por ejemplo). Como se ha comentado anteriormente, es un tipo de error refractivo junto con miopía, hipermetropía y astigmatismo. El diagnóstico se realiza mediante un examen ocular rutinario.

La presbicia se puede corregir con gafas, lentes de contacto, lentes intraoculares multifocales (19,20) o cirugía LASIK (en

este contexto llamada presbyLASIK). El tratamiento más habitual para corregir la presbicia es portar gafas. Existen diferentes tipos de gafa para corregir el defecto de la presbicia, en su versión más simple éstas corrigen la visión cercana, pero también pueden ser bifocales, trifocales o lentes progresivas, que corrigen la visión de cerca y de lejos, en función de hacia donde se oriente la mirada.

Las personas mayores de 40 años corren el riesgo de desarrollar presbicia y todas las personas al llegar a una determinada edad se ven afectadas por la presbicia en mayor o menor medida. Se estima que un 25% de las personas (1.4 billones en todo el mundo) están afectadas actualmente por la presbicia.

### Queratocono

El queratocono es un trastorno ocular que resulta en un adelgazamiento progresivo de la córnea. La palabra viene del griego *´kéras´* que quiere decir córnea y del latín *´cõnus´* que quiere decir cono. Esto puede resultar en visión borrosa, visión doble, astigmatismo irregular y sensibilidad a la luz. En general, todos estos efectos indeseados conducen a una mala calidad de vida. Normalmente ambos ojos se ven afectados, aunque no necesariamente a la vez ni en el mismo grado. En casos más severos, aparece una cicatriz dentro de la córnea, que dificulta enormemente la visión del paciente que lo padece.

Si bien se desconoce el origen de la enfermedad, la teoría más aceptada es que ocurre debido a una combinación de factores genéticos, ambientales y hormonales. Como factores ambientales destacan el frotarse los ojos y determinadas alergias. El mecanismo subyacente del queratocono supone cambios en la córnea a una forma progresiva de cono. El primer diagnóstico, el más básico, se hace normalmente mediante un examen de la córnea con una lámpara de hendidura. Este primer examen, en caso de duda, habitualmente se completa con una topografía corneal. Una topografía corneal es una prueba no invasiva que crea un mapa de la forma de la córnea afectada, permitiendo al oftalmólogo interpretar cómo de dañada está la córnea del paciente (21).

El queratocono tiene un carácter progresivo (22). Conforme la enfermedad empeora, es habitual que se requieran lentes de contacto especiales para poder corregir o mejorar la visión del paciente afectado (23). A menudo se trata con una intervención quirúrgica, para frenar el desarrollo de la enfermedad, llamada de crosslinking. En muchos casos la enfermedad se frena o estabiliza después de algunos años sin problemas severos de visión. Sin embargo, en ciertos pacientes afectados se produce cicatrización de la córnea y un trasplante de córnea es necesario.

Se estima que aproximadamente 1 de cada 2000 personas están afectadas por queratocono. Se registra una mayor incidencia del inicio de la enfermedad desde la infancia tardía a la edad adulta temprana. Se ha observado que, aunque ocurre en todas las poblaciones, el queratocono tiene a ser más frecuente en ciertos grupos étnicos, como los de origen asiático.

## Ojo seco

El síndrome del ojo seco (DES, de sus siglas en inglés *Dry Eye Syndrome*), también llamado queratoconjuntivitis seca (KCS), es el desorden ocular de tener ojos secos. De hecho, las palabras *queratoconjuntivitis seca* significan *sequedad de la córnea y la conjuntiva* en latín. Más allá de la sensación de ojo seco, las personas que padecen esta dolencia experimentan otros síntomas como enrojecimiento, irritación, ojos que se fatigan fácilmente y secreción. En algunos casos también puede darse visión borrosa. Los síntomas varían desde leves y ocasionales hasta severos y continuos. En los casos más graves, no tratados, puede ocurrir la cicatrización de la córnea.

El ojo seco se produce cuando las lágrimas se evaporan demasiado rápido o bien, cuando el ojo no es capaz de producir suficiente lágrima (5). Un ojo puede volverse seco por varios motivos como el uso de lentes de contacto, la disfunción de la glándula de Meibomio, cirugía LASIK, deficiencia de vitamina A, síndrome de Sjögren o ciertos medicamentos como antihistamínicos, medicamentos para la presión arterial, antidepresivos o terapia de reemplazo hormonal. La conjuntivitis crónica también puede ser el origen del ojo seco. El diagnóstico de ojo seco se basa principalmente en los síntomas relatados por el paciente afectado. Aunque se pueden usar pruebas diagnósticas más objetivas, como el test de Schirmer que se utiliza para determinar la gravedad de la afección. En 2007 en el congreso Dry Eye Workshop se publicaron las pautas de diagnóstico de ojo seco.

El tratamiento más usual son las lágrimas artificiales (gotas). Dejar o modificar la toma de ciertos medicamentos suele ayudar. El síndrome del ojo seco puede imposibilitar el uso de lentes de contacto en algunos casos (17).

Padecer de ojo seco es común. Se estima que entre el 5 y el 34% de las personas se ven afectadas, hasta cierto punto. Afecta especialmente a las mujeres. Se estima que hasta un 70% de personas mayores están afectadas por ojo seco.

## Cataratas

A una opacificación del cristalino del ojo que se traduce en empeoramiento de la visión se le llama catarata (24). Las cataratas de forma habitual se desarrollan paulatinamente y pueden afectar a uno o a ambos ojos. Los síntomas son variados, pueden incluir visión borrosa o doble, halos alrededor de la luz, colores apagados, molestias con las luces brillantes e incluso dificultades para ver de noche. De forma práctica, esto habitualmente resulta en dificultades para leer, conducir o reconocer rostros. Se estima que la mitad de los casos de ceguera en el mundo y el 33% de la discapacidad visual se deben a las cataratas no tratadas.

Las cataratas se deben más generalmente al envejecimiento, pero también pueden darse por otras causas, como un traumatismo o exposición excesiva a la radiación, a veces están presentes desde el nacimiento, y otras aparecen como consecuencia de una cirugía ocular por otros problemas derivados. Entre los factores de riesgo se encuentran el uso prolongado de corticosteroides, padecer de diabetes, fumar, prolongada exposición a la luz solar y la ingesta habitual de alcohol. El mecanismo subyacente por el que se

genera una catarata, implica la acumulación de grupos de proteína o pigmento amarillo-marrón en el cristalino, lo que produce una reducción en la transmisión de luz a la retina. El diagnóstico se realiza mediante un examen ocular rutinario.

La cirugía para sustituir el cristalino turbio y reemplazarlo con un cristalino artificial es el único tratamiento eficaz probado y extendido (25). La cirugía de cataratas no está extendida o incluso disponible en muchos países, lo que supone que aproximadamente 20 millones de personas estén ciegas debido a las cataratas. Las cataratas se vuelven más comunes con la edad.

## Glaucoma

Como glaucoma más que una dolencia sola, se considera a un grupo de enfermedades oculares que causan pérdida de la visión por un daño producido en el nervio óptico. Es una enfermedad crónica neurodegenerativa del nervio óptico. El glaucoma se genera en la mayoría de los casos por un aumento de la presión intraocular, lo cual provoca a la larga pérdida de la visión (26). Existen muchas clases diferentes de glaucoma, pero el más habitual es el glaucoma de ángulo abierto. Si algo caracteriza al glaucoma de ángulo abierto es la ausencia de dolor y que se desarrolla paulatinamente en el tiempo. Los primeros síntomas, como pérdida de la visión periférica, suelen aparecer ya en un estadio avanzado de la enfermedad. A la pérdida de la visión periférica le sigue la pérdida de la visión central. Sin el tratamiento adecuado, derivará en ceguera. El glaucoma de ángulo cerrado es muy diferente al glaucoma de ángulo abierto. El de ángulo cerrado puede presentarse tanto de forma gradual como de repente. La presentación repentina suele incluir dolor ocular muy intenso, dilatación pupilar, enrojecimiento del ojo, visión borrosa e incluso náuseas. La pérdida de visión por glaucoma es irreversible. En términos clínicos se les llama glaucomatosos a los ojos afectados por esta dolencia.

Existen varios factores de riesgo para padecer glaucoma. Entre ellos se encuentran presión ocular elevada, edad avanzada, antecedentes familiares de glaucoma y uso de esteroides (26). Para la presión ocular, habitualmente se considera un valor igual o superior a 21 mmHg con factor de riesgo, a mayor presión intraocular, mayor riesgo. También es cierto, que algunos individuos pueden tener la presión ocular alta durante mucho tiempo (años) y no llegar a desarrollar ningún tipo de daño asociado al glaucoma. Y al revés, el daño del nervio óptico puede darse con presión intraocular normal, es lo que se conoce como glaucoma de tensión normal. La teoría más aceptada en cuanto al mecanismo del glaucoma de ángulo abierto es la salida demasiado lenta del humor acuoso a través de la red trabecular, por otro lado, en el glaucoma de ángulo cerrado el iris bloquea la red trabecular. El diagnóstico de glaucoma se realiza mediante un examen ocular dilatado.

Aunque el glaucoma no tiene cura, en muchas situaciones sus efectos pueden paliarse con tratamientos médicos e incluso quirúrgicos (27). Tratado a tiempo, es posible ralentizar o incluso detener la progresión de la enfermedad. Los tratamientos más habituales son fármacos, pero

también es popular el tratamiento con láser o cirugía. El objetivo común de estos procedimientos suele ser la disminución de la presión ocular. Existen varios tipos diferentes de medicamentos para el glaucoma. Tanto en el glaucoma de ángulo abierto como en el de ángulo cerrado pueden utilizarse tratamientos con láser. La cirugía de glaucoma se suele emplear en pacientes que no responden a otros tipos de tratamiento.

En todo el mundo, unos 70 millones de personas padecen glaucoma. Como la pérdida de la visión consecuencia del glaucoma generalmente ocurre lentamente y durante un largo período de tiempo, al glaucoma se le conoce popularmente como el *'ladrón silencioso de la vista'*. A nivel mundial, se estima que el glaucoma es la segunda causa principal de ceguera después de las cataratas.

### Retinopatía diabética

La retinopatía diabética o también llamada enfermedad ocular diabética, es una afección oftalmológica en la que se estropea el tejido retiniano debido a la diabetes mellitus (28, 29). La diabetes mellitus está asociada a altos niveles de azúcar en sangre, que provoca daño a los vasos sanguíneos en la retina. La retinopatía diabética es una de las principales causas de ceguera en los países desarrollados, junto con el glaucoma. Generalmente, en el desarrollo de la retinopatía diabética, la falta de riego sanguíneo comienza en la zona periférica de la retina. Este es el motivo por el cual la falta de visión solo es perceptible por el paciente, en una fase avanzada de la enfermedad, cuando la falta de riego afecta a la zona central.

Se estima que hasta el 80% de diabéticos que han padecido diabetes durante 20 años o más sufre de retinopatía diabética. En este contexto es importante tener en cuenta que la posibilidad de desarrollar retinopatía diabética aumenta con el tiempo que la persona ha sufrido de diabetes. Sin embargo, se estima que por lo menos el 90% de los nuevos casos se pueden reducir con la supervisión y el tratamiento adecuados.

### Degeneración Macular Asociada a la Edad (DMAE)

La degeneración macular, también llamada degeneración macular relacionada con la edad (DMAE o AMD, de sus siglas en inglés Age-related Macular Degeneration), es una afección que se produce cuando un proceso degenerativo afecta la mácula. La mácula es la zona de la retina responsable de la agudeza visual. La DMAE resulta en visión borrosa o incluso nula en el centro del campo visual (30).

Lo habitual es que no haya síntomas al comienzo de la enfermedad. Sin embargo, con el tiempo, algunos pacientes padecen un empeoramiento gradual de la visión, que puede afectar uno o ambos ojos. Si bien raramente produce ceguera completa, la pérdida de la visión central entorpece la realización de actividades cotidianas como leer, conducir o el reconocimiento de rostros.

La degeneración macular ocurre típicamente en personas mayores, de ahí el sobrenombre de degeneración macular asociada a la edad. El tabaquismo y ciertos factores gené-

ticos influyen en el pronóstico. El diagnóstico se realiza mediante un examen ocular completo. No existe cura o tratamiento que devuelva la visión ya perdida. Los esfuerzos preventivos se basan en seguir unas pautas de vida saludable, es decir, hacer ejercicio, comer bien y no fumar. Junto con las cataratas y el glaucoma, la DMAE es una de las causas más usuales de ceguera en el mundo. Se da una mayor incidencia en personas mayores de 50 años (31).

### Instrumentación oftálmica

Los instrumentos de exploración oftalmológica son una ayuda básica y fundamental para que el oftalmólogo pueda realizar su trabajo de forma satisfactoria. La elección es amplia y muy tecnificada, en este apartado se presenta una breve descripción de los aparatos oftálmicos más empleados en la clínica diaria.

La función visual, es decir, cómo y cuánto ven los ojos, se puede estimar midiendo: la agudeza visual y el campo visual. Para ello se utilizan los siguientes aparatos:

### Optotipos

- *Descripción y utilidad:* Una tabla optométrica, u optotipo, es una tabla que se usa para medir la agudeza visual. Los optometristas, oftalmólogos o enfermeros especializados, utilizan estas tablas de visión en la práctica clínica para evaluar los posibles problemas de visión de los pacientes. Los optotipos también son utilizados por el personal sanitario para monitorizar como responde la agudeza visual de un determinado paciente en función al medicamentos o cirugía aplicados. La tabla de optotipos se coloca a una distancia fija y estándar del paciente cuya visión se ha de evaluar. La tarea del paciente es intentar identificar los símbolos que se muestran en la tabla, comenzando con los símbolos (habitualmente letras) de mayor tamaño y continuando con símbolos progresivamente más pequeños hasta que la persona no puede identificar los símbolos con claridad. Los símbolos más pequeños que se pueden identificar de manera confiable se corresponden con la agudeza visual de la persona. Es una medida subjetiva. El gráfico de Snellen es el más popular en la práctica clínica (32).
- *Nivel de tecnificación:* Muy bajo.

### Campimetría o perimetría

- *Descripción y utilidad:* El campo visual se examina con un campímetro. Los campímetros se han venido usando en la práctica clínica desde mediados del siglo XIX. En sus orígenes, el examen del campo visual se refería en exclusiva a los límites externos, o 'perímetro' del campo visual, de ahí que se utilice la palabra 'perimetría', que tiende a usarse como sinónimo de 'campimetría'. Se utiliza principalmente para analizar el control evolutivo del glaucoma y de otras enfermedades retinianas (33).
- *Nivel de innovación:* Moderado bajo. La tecnificación de los campímetros tiende a hacerlos portables y más manejables y accesibles (34).

Existen muchos aparatos para explorar el segmento anterior, es decir, para examinar la conjuntiva, córnea, iris, cristalino, etc. Los más representativos se listan y describen a continuación:

### Lámpara de hendidura

- *Descripción y utilidad:* Es la herramienta más fundamental del oftalmólogo. Una lámpara de hendidura es un microscopio con el que se ve a gran aumento las diferentes partes del ojo (35). Una lámpara de hendidura es un instrumento oftálmico que se basa en una fuente de luz de alta intensidad cuyo enfoque puede variar, según la estructura ocular a observar. Con la lámpara de hendidura es posible examinar tanto el segmento anterior como el segmento posterior del ojo humano, lo que incluye, aunque no limita, el párpado, la conjuntiva, la esclera, la córnea, el iris y el cristalino. Con la lámpara de hendidura también se puede realizar un examen binocular, lo que proporciona una vista estereoscópica ampliada de las diferentes estructuras del ojo en detalle. Esto permite realizar diagnósticos anatómicos para una variedad de afecciones oculares. Así mismo, la lámpara de hendidura también facilita la exploración de la retina utilizando una segunda lente de mano (35).
- *Nivel de innovación:* Bajo.

### Queratometría corneal

- *Descripción y utilidad:* Un queratómetro es un instrumento de diagnóstico oftalmológico para medir la córnea, en concreto, la curvatura de la superficie anterior de la córnea. Su principal misión es evaluar la extensión corneal y el eje del astigmatismo (36). El fisiólogo alemán Hermann von Helmholtz inventó el queratómetro en 1851, aunque un modelo anterior a esta fecha fue desarrollado en 1796 por Jesse Ramsden y Everard Home.
- *Nivel de innovación:* bajo. Hoy en día ha quedado prácticamente relegado por los topógrafos corneales.

### Topografía corneal

- *Descripción y utilidad:* La topografía corneal, a veces llamada fotoqueratoscopia o videoqueratografía, es una técnica para la adquisición de imágenes oftálmicas no invasiva para hacer un mapa de la curvatura de la superficie de la córnea. Conocer la topografía de la córnea, es decir, su forma, es de vital importancia para el oftalmólogo, ya que la córnea es la estructura con mayor poder refractivo del ojo, es decir, que la córnea es de crítica importancia para garantizar la calidad de la visión y la salud del ojo en su conjunto.

En consecuencia, el mapa en tres dimensiones es una importante ayuda para el clínico examinador, oftalmólogo u optometrista, ya que asiste en el diagnóstico y tratamiento de una larga serie de afecciones, entre las cuales cabe destacar: la planificación de toda cirugía de cataratas y la implantación de lentes intraoculares (LIO); así como la planificación de la cirugía refractiva como LASIK y también en la evaluación de sus resultados; o en la evaluación

y valoración de la adaptación de lentes de contacto (37). La topografía corneal extiende el rango de medición que ofrece la queratometría tradicional (y ya casi obsoleta) a un rango de pocos milímetros de distancia, considerando varios miles de puntos de medida que representan toda la córnea. El procedimiento se realiza de forma casi instantánea, en segundos, y no reporta dolor ni molestia para el paciente.

- *Nivel de innovación:* Alto. La topografía corneal, aunque bien establecida, sigue en continuo crecimiento, dada su utilidad y versatilidad en la práctica clínica. Los topógrafos más modernos son corneoesclerales, es decir, no se limitan a hacer un mapa de la córnea, sino que también incluyen parte de la esclera anterior (38).

### Tonometría

- *Descripción y utilidad:* La tonometría es el procedimiento clínico que realizan los profesionales sanitarios especializados en el cuidado de los ojos para determinar la presión intraocular (PIO), es decir, la presión en el interior del ojo. Es una prueba significativa en la evaluación de pacientes con riesgo de glaucoma. La mayoría de los tonómetros se calibran para medir la PIO en milímetros de mercurio (mmHg). Existen muy diversos tipos de tonómetros (39). La prueba de PIO estándar es la tonometría de Goldmann y, en consecuencia, es el método más aceptado en el entorno clínico. Sin embargo, precisa de contacto con el paciente (un prisma debe apoyarse sobre el ojo del paciente), lo cual resulta menos higiénico y cómodo para el paciente. Más recientemente, la tonometría sin contacto (o también llamada tonometría de soplo de aire) fue inventada por Bernard Grolman de Reichert. Este tipo de tonometría se basa en un pulso de aire rápido que aplanan la córnea. Un sistema electroóptico detecta el consecuente aplanamiento corneal. La PIO se evalúa al detectar la fuerza del chorro de aire en el momento justo del aplanamiento. Históricamente, los tonómetros sin contacto se consideraban una forma rápida y sencilla de detectar una PIO elevada más que una forma precisa de medida. Sin embargo, en la actualidad ha quedado demostrado que los tonómetros modernos sin contacto se correlacionan muy bien con las mediciones tradicionales de tonometría de Goldmann.
- *Nivel de innovación:* Alto. Existe una necesidad clínica de medir la PIO de manera efectiva y sin contacto. Diversas empresas privadas y grupos de investigación están trabajando en la actualidad en esta línea de innovación (40, 41).

### Paquimetría

- *Descripción y utilidad:* La paquimetría corneal es el proceso de medir el grosor de la córnea. Un paquímetro es entonces el dispositivo médico que se utiliza para medir el grosor de la córnea. Conocer el grosor corneal es muy apreciado por los oftalmólogos en diversos contextos, como para la detección de queratocono (42-44), para evitar complicaciones antes de una cirugía refractiva o incluso para la detección de glaucoma. En este contexto, la paquimetría corneal es necesaria antes de cual-

quier cirugía refractiva para garantizar un grosor corneal suficiente para evitar un abultamiento anormal de la córnea, un efecto secundario no deseado y potencialmente peligroso, conocido como ectasia.

Un análisis paquimétrico puede realizarse mediante métodos ultrasónicos u ópticos. Destacan la microscopía confocal (CONFOSCAN), o los métodos sin contacto, como la biometría óptica con una única cámara Scheimpflug (como SIRIUS o PENTACAM), o una cámara dual Scheimpflug (como GALILEI), o la óptica Tomografía de coherencia óptica (OCT) y Paquimetría de coherencia óptica en línea (OCP, como ORBSCAN). Todo esto son diferentes maneras complementarias de realizar un análisis paquimétrico. Aunque hoy en día los métodos más populares son los métodos ópticos sin contacto directo con el ojo del paciente (45).

- *Nivel de innovación:* Moderado alto. Como la paquimetría es un indicador oftalmológico muy utilizado por los profesionales médicos, es habitual que nuevos instrumentos ópticos, aunque su función principal no sea la medida del grosor cornea, incluyan esta funcionalidad.

### Biometría

- *Descripción y utilidad:* La biometría ocular significa, literalmente, medir el ojo. Estas medidas incluyen la longitud del ojo (cómo de alargado es, es decir, su longitud axial) y la curvatura de la córnea, así como otras medidas importantes. Dependiendo de cada biómetro, más o menos parámetros clínicos estarán disponibles. Con los datos de la longitud y los de la queratometría (información sobre la potencia de la córnea como lente) es posible estimar qué LIO debe utilizarse en la cirugía de cataratas para sustituir el cristalino. Para la medida biométrica se pueden utilizar ultrasonidos o un sistema láser. En la actualidad, los biómetros láser son mucho más populares en la práctica clínica ya que no requieren de contacto instrumento-paciente (46).
- *Nivel de innovación:* Alto. El desarrollo de nueva instrumentación oftálmica gira en torno a elevar en nivel de integración, es decir, que un mismo aparato sea capaz de medir diversos parámetros oculares, por eso los biómetros están y estarán en el punto de mira del desarrollo de la instrumentación oftálmica.

Se han comentado los aparatos oftálmicos más populares para la caracterización del segmento anterior, pero para explorar el segmento posterior, fundamentalmente vítreo y retina, también existen una gran cantidad de instrumentos que listan y describen a continuación.

### Oftalmoscopia

- *Descripción y utilidad:* La oftalmoscopia, también llamada funduscopia, es una prueba clínica que le permite al oftalmólogo mirar en el interior del fondo del ojo utilizando precisamente un oftalmoscopio (a veces también llamado fondo de ojo). La oftalmoscopia se realiza habitualmente como parte de un examen ocular rutinario y es crucial para evaluar la salud de la retina, el disco óptico, y el humor vítreo (47).

El examen del fondo de ojo con dilatación pupilar es la situación ideal, pero en la práctica el examen sin dilatar es más cómodo y también útil (aunque no tan completo), y es consecuentemente el tipo más común en las primeras visitas oftalmológicas y en atención primaria. Una alternativa, o complemento, a la oftalmoscopia es tomar una fotografía de fondo de ojo, con la ventaja de que la imagen puede ser analizada a posteriori por un profesional.

- *Nivel de innovación:* En el oftalmoscopio de mano, bajo. Existen otras formas más avanzadas para observar la retina y estructuras aledañas como se describe a continuación.

### Retinógrafo

- *Descripción y utilidad:* Un retinógrafo es un oftalmoscopio, pero capaz de tomar fotografías de lo observado. Tomar una imagen del fondo de ojo supone fotografiar la parte posterior del ojo. En el campo de la fotografía para el fondo de ojo es necesario utilizar cámaras especializadas, estas cámaras consisten en un complicado microscopio conectado a una cámara que tiene flash. Las estructuras principales que se pueden observar en una foto de fondo de ojo son la retina, tanto central como periférica, el disco óptico y la mácula (48). Las fotografías del fondo de ojo se pueden tomar con filtros de colores o con tintes especiales que incluyen fluoresceína y verde de indocianina.
- *Nivel de innovación:* Los modelos y la tecnología de la fotografía del fondo de ojo han avanzado y evolucionado rápidamente durante el último siglo. Dado que el equipo es sofisticado y difícil de fabricar según los estándares clínicos, solo unos pocos fabricantes / marcas están disponibles en el mercado.

### Angiografía

- *Descripción y utilidad:* La angiografía con fluoresceína, también llamado angiografía fluorescente o angiografía con fluoresceína del fondo de ojo, es una técnica para examinar la circulación sanguínea en la retina y la coroides (49). Para ello se emplea un tinte fluorescente y una cámara especializada. Es similar a una retinografía, ya que son fotografías de la retina, pero para la angiografía es necesario utilizar un contraste intravenoso. Además, las imágenes se capturan con filtros especiales para observar los vasos sanguíneos. Así pues, para realizar una angiografía, es necesario añadir fluoresceína de sodio a la circulación sanguínea, se ilumina la retina con luz azul y se obtiene un angiograma al fotografiar la luz verde fluorescente que emite el tinte. La fluoresceína se administra por vía intravenosa en la angiografía con fluoresceína intravenosa y por vía oral en la angiografía con fluoresceína oral. La prueba es un método de rastreo de tinte. Esta prueba tiene ciertos efectos secundarios, aunque generalmente de naturaleza no grave. Por ejemplo, el tinte causado por la fluoresceína suele reaparecer en la orina del paciente, lo que hace que la orina parezca más oscura incluso, a veces, anaranjada. También puede provocar decoloración de la saliva. El oftalmólogo ale-

mán Achim Wessing, quien publicó sus hallazgos en 1969, fue el pionero en la angiografía con fluoresceína.

- *Nivel de innovación:* Muy alto. Es una prueba diagnóstica relativamente nueva y con gran potencial (50, 51).

### Tomografía de Coherencia Óptica

- *Descripción y utilidad:* La tomografía de coherencia óptica (OCT, de sus siglas en inglés) es una técnica de obtención de imágenes que utiliza luz para capturar imágenes bidimensionales y tridimensionales de resolución micrométrica de diferentes tejidos y estructuras oculares (por ejemplo, tejido biológico como puede ser la córnea o la retina). Se utiliza para imágenes médicas varias, aunque fundamentalmente de carácter oftalmológico (52). La microscopía confocal, es otra técnica óptica, normalmente penetra menos profundamente en la muestra (el tejido o estructura ocular) pero a cambio ofrece una mayor resolución. Con este sistema, el oftalmólogo puede realizar diagnósticos certeros de enfermedades retinianas que anteriormente solo podía determinar con un significativo margen de incertidumbre.
- *Nivel de innovación:* Muy alto. La tomografía de coherencia óptica permite observar las capas internas de la retina, en vivo y con precisión de micras (53). Esta técnica aspira a sustituir la observación por microscopio, que solo puede hacerse ex-vivo.

Aunque en el día a día con los pacientes son los oftalmólogos y optometristas los que utilizan esta instrumentación oftálmica, es preciso caer en la cuenta de que la instrumentación representa el trabajo de muchas personas, físicos especializados en óptica e ingenieros de muy diversa índole, fundamentalmente. La instrumentación oftálmica es un campo que está en continuo crecimiento y desarrollo. Siempre se puede conseguir una imagen de mejor calidad, con mejor contraste y menos artefactos. Ese es el objetivo último de los profesionales científicos técnicos dedicados al desarrollo y mejora de la instrumentación oftálmica.

### Retos pendientes en la investigación de las ciencias de la visión

El campo de la oftalmología ha progresado muy rápidamente en las últimas décadas y actualmente está presente en un gran número de centros quirúrgicos de todo el mundo. Así pues, en los últimos años se ha producido un cambio significativo en las ciencias visuales. A pesar de que no se ha realizado ningún estudio riguroso sobre la medición del crecimiento del avance científico en las diferentes especialidades médicas, la oftalmología apunta como una de las disciplinas con mayor número de avances. En la actualidad, las nuevas técnicas microquirúrgicas no invasivas y sin suturas han hecho un cambio revolucionario y, como resultado, la mortalidad y la morbilidad de diversas enfermedades se han reducido significativamente. Se ha avanzado en áreas específicas. Por ejemplo, las técnicas quirúrgicas han tenido un enorme desarrollo en las cirugías oculares anteriores y posteriores, y los pacientes pueden reanudar su vida cotidiana en mismo día de la cirugía. Las complicaciones

posoperatorias han disminuido significativamente y se ha introducido la nueva generación de antibióticos. Sin embargo, aún queda mucho por hacer.

La ceguera y la discapacidad visual son problemas de salud importantes y omnipresentes. Aunque las nuevas tecnologías progresan rápidamente, la discapacidad visual sigue siendo un problema notable para los sistemas sanitarios de todo el mundo (54).

Actualmente, la oftalmología se ocupa de las principales causas de ceguera, incluidas las cataratas, los errores de refracción no corregidos, el glaucoma, la degeneración macular relacionada con la edad, las opacidades corneales, la retinopatía diabética, las enfermedades oculares pediátricas y muchas enfermedades infecciosas. Aunque se han presentado modalidades de tratamiento innovadoras, **hasta ahora no se ha introducido un tratamiento definitivo para la mayoría de las enfermedades crónicas.** De igual manera, la prevención es fundamental en todas las etapas de la vida para hacer frente a cualquier desorden o enfermedad ocular. En muchas patologías oculares ocurre, que el daño causado en el aparato visual no es reversible, sin embargo, una detección temprana sí ayuda a contener y controlar el avance de la patología, mejorando la calidad de vida del paciente, por lo que la **detección precoz de enfermedades oculares es una prioridad** de los oftalmólogos. Para que la detección temprana sea una realidad clínica es necesario que la instrumentación oftálmica evolucione, se desarrolle y sofisticue. Haciendo accesible al especialista, detalles clínicos que tradicionalmente no estaban a su alcance. En consecuencia, **el desarrollo de instrumentación oftálmica para facilitar la detección temprana de enfermedades oculares es uno de los retos más importantes de los investigadores** en el campo de ciencias de la visión.

En resumen, se puede señalar que los retos de investigación en el campo de la oftalmología y las ciencias de la visión van en una o varía de las siguientes líneas de trabajo:

1. Mejorar la detección temprana de enfermedades y patologías oculares.
2. Investigar modalidades de tratamiento innovadoras, así como evaluar de forma objetiva el progreso de una determinada dolencia.
3. Avances quirúrgicos que minimicen los efectos secundarios y mejoren la calidad de vida del paciente.

### La multidisciplinariedad de las ciencias de la visión: descripción de las ramas de conocimiento involucradas

La RAE define el adjetivo multidisciplinario como *‘que abarca o afecta a varias disciplinas’*. Si algo caracteriza a la oftalmología y a las ciencias de la visión es precisamente su carácter multidisciplinar. El profesional sanitario encargado de diagnosticar y tratar las enfermedades y dolencias oculares es el médico especialista, el oftalmólogo. Sin embargo, la labor de éste se apoya en el trabajo de otros muchos profesionales que no tratan directamente con el paciente. Para poder *‘ver dentro’* del ojo, hacen falta instrumentos oftálmicos desarrollados por físicos e

ingenieros, encargados no solo de diseñar y construir estos aparatos, sino también de adaptarlos a nuevas necesidades médicas, tanto en la consulta como en el quirófano. La oftalmología hoy en día no se entiende sin cirugía láser, por ejemplo. Toda esa instrumentación requiere el trabajo de muchas personas y muchas décadas de investigación. Por otro lado, los tratamientos más habituales para pacientes afectados por una condición ocular son medicinas locales, habitualmente gotas para los ojos. Sin la continua investigación y trabajo de los farmacéuticos dedicados a las ciencias de la visión la curación sería inviable. Estos son solo algunos ejemplos. A continuación, se enumeran y describen las disciplinas que juegan un papel más importante en el desarrollo y avance de las ciencias de la visión.

### Oftalmología

El oftalmólogo es el profesional médico especializado en el ojo humano y los problemas y dolencias relacionados con la visión. Es el personal sanitario cuya responsabilidad es diagnosticar y decidir el tratamiento a seguir dada una determinada dolencia ocular. El oftalmólogo clínico puede ser también oftalmólogo cirujano, en cuyo caso será el profesional sanitario encargado de operar al paciente.

### Optometría

La optometría es la disciplina encargada de la identificación, el tratamiento y la corrección de los errores refractivos y defectos acomodativos. También es tarea de la optometría el diseño, cálculo, adaptación y control de lentes de contacto y lentes oftálmicas (gafas). Los optometristas son expertos en graduar la vista, es decir, en determinar los errores refractivos de cada paciente. Una corrección refractiva óptima (es decir, portar las gafas o lentes de contacto adecuadas) mejorará significativamente la calidad de vida del paciente. Pese a la creencia popular de que el optometrista se limita a graduar la vista, en realidad sus tareas van mucho más allá. El optometrista es está también es la persona encargada de adaptar lentes de contacto especiales, como las lentes de contacto esclerales. Estas son unas lentes de un material rígido y de un tamaño mayor a lo que estamos acostumbrados y que se utilizan para tratar ciertas dolencias como el queratocono. Otro tipo de lente de contacto especial, populares en la clínica son las lentes de contacto tipo Orto-k que corrigen la miopía mientras el paciente duerme. Además de ser los encargados de lidiar con todo tipo de lentes de contacto, los optometristas cuentan también entre sus tareas la terapia visual o, también conocido como gimnasia visual, entrenamiento visual o rehabilitación visual. La terapia visual consiste en un tratamiento optométrico que tiene como objetivo potenciar y corregir los problemas del sistema visual: enfoque, coordinación de ejes visuales, ojo vago o estrabismos. Es un tratamiento totalmente individualizado que en muchos casos evita la cirugía. Es especialmente importante en niños y jóvenes, cuando los músculos oculares todavía son receptivos al cambio.

### Física (óptica)

La física es la ciencia básica que estudia la energía, la materia, el espacio-tiempo y sus interacciones fundamentales.

Es un campo de estudio amplísimo, con una gran cantidad de ramas de estudio bien diferenciadas las unas de las otras. La óptica es una rama de la física. La óptica juega un papel fundamental en el campo de las ciencias de la visión. La óptica se define como el estudio de la luz y los fenómenos asociados a ella: su naturaleza, su propagación, sus propiedades, etc. El adjetivo 'óptico' se refiere a un sistema por el cual la luz es transmitida. En consecuencia, el ojo se puede definir como un sistema óptico. El ojo está formado por un conjunto de lentes que son las encargadas de focalizar la luz de la retina. El papel del físico en ciencias de la visión es doble. Por una parte, entender y describir el ojo como un aparato óptico. Por otra, el físico será el encargado, junto con el ingeniero óptico, cómo se describirá a continuación, de diseñar y desarrollar los instrumentos oftálmicos necesarios para el diagnóstico y tratamiento de diferentes enfermedades oculares.

### Ingeniería óptica

En general, la ingeniería se define como el 'conjunto de conocimientos científicos y tecnológicos para la innovación, invención, desarrollo y mejora de técnicas y herramientas para satisfacer las necesidades y resolver problemas técnicos tanto de las personas como de la sociedad.' En particular, la ingeniería óptica es el campo de estudio que se centra en las aplicaciones de la óptica. Los ingenieros ópticos diseñan componentes de instrumentos ópticos como lentes, microscopios, telescopios y otros equipos que utiliza las propiedades de la luz. En el campo de las ciencias de la visión, el ingeniero óptico es el profesional encargado de desarrollar instrumentación oftálmica, y no solo de desarrollarla, sino también de su mantenimiento, calibración y reparación. La instrumentación oftálmica u oftalmológica es clave para el diagnóstico y tratamiento de las dolencias oculares, independientemente del tipo que estas sean. Aunque la instrumentación oftálmica es muy amplia, se puede dividir en dos grandes grupos. Por un lado, los aparatos oftálmicos necesarios para el diagnóstico. Estos son aparatos ópticos cuya principal misión es facilitar la observación de diferentes estructuras oculares, es decir, permiten al personal sanitario ir más allá de lo que se puede observar a simple vista. En este contexto es importante tener en cuenta que el objetivo final de un instrumento óptico de carácter diagnóstico siempre es intentar observar estructuras del cuerpo humano, del ojo en este caso, de forma no invasiva con la mayor resolución posible. En ciencias de la visión, generalmente no es suficiente con observar la forma o el aspecto de los diferentes tejidos o estructuras oculares, su no que es especialmente útil para los oftalmólogos poder medir las dimensiones de cada estructura ocular, es decir, describir con un número concreto acompañado de unas unidades de medida. Esto permite al oftalmólogo cuantificar y gradar posibles defectos en la anatomía ocular.

Por otra parte, el ingeniero óptico también tiene un papel muy importante en lo que concierne a la instrumentación necesaria en el quirófano, es decir, instrumentación quirúrgica. Cirugía de cataratas, cirugía refractiva o cirugía por glaucoma, son cirugías habituales pero muy distintas las unas de las otras. En las últimas décadas el trabajo manual del cirujano se está viendo remplazado, o apoyado,

por láseres de alta precisión. Las cirugías láser anteriormente mencionadas, necesitan un tipo de láser diferente para su realización. Es decir, que para cada cirugía es necesario desarrollar instrumentación quirúrgica concreta. El ingeniero óptico, junto con el físico, es el encargado del diseño y desarrollo de la instrumentación quirúrgica.

### Ingeniería biomédica

La ingeniería biomédica aúna en un mismo campo de estudio los principios físicos y técnicos que definen a la ingeniería, pero siempre aplicada a sistemas biológicos. Aunque es una ciencia muy amplia, juega un papel significativo en el campo de las ciencias de la visión.

El ojo a pesar de ser un órgano en relativamente pequeño en tamaño es muy complejo en su estructura y está muy especializado en sus tejidos y funciones. Para el correcto funcionamiento del ojo humano, ocurren gran cantidad de interacciones físico químicas. El papel del ingeniero biomédico en este contexto es aunar los dos mundos. Es decir, unificar el conocimiento más puramente biológico (morfolo-gía, fisiología, anatomía, etc.) con el mundo más físico (óptica).

### Otras ingenierías

Aunque se ha prestado especial atención a la ingeniería óptica y a la ingeniería biomédica, realmente casi cualquier ingeniería tiene cabida en las ciencias de la visión. Por ejemplo, la **ingeniería mecánica**, aunque habitualmente se puede pensar que está estrechamente relacionada con metales y materiales pesados, grandes construcciones o sistemas de ventilación, lo cual es correcto, también es verdad que tiene importancia en el estudio del ojo, concretamente en el campo de estudio llamado **biomecánica**. La biomecánica estudia los fenómenos naturales que ocurren en el cuerpo humano u otros organismos como consecuencia de la aplicación de fuerzas de diverso origen y es útil para medir el rendimiento de acuerdo a la optimización del gasto energético. En el contexto del ojo humano la biomecánica es necesaria para entender cómo se comportan los diferentes tejidos del ojo, por ejemplo, cómo afecta el párpado a la superficie corneal (el párpado ejerce una fuerza sobre ésta), o cómo afecta portar un cuerpo extraño, como son las lentes de contacto, a la integridad ocular.

En el contexto del desarrollo de instrumentación oftalmológica, además del ingeniero óptico, existen otros tipos de ingenierías que merece la pena mencionar. Por ejemplo, la **ingeniería eléctrica**, es fundamental para poder comunicar la corriente eléctrica entre los diferentes dispositivos que integren el equipo final. La **ingeniería electrónica** es necesaria en el diseño de circuitería. Por otra parte, no menos importante es la **ingeniería informática**. Será un ingeniero informático el profesional encargado de programar la interfaz que utilizará el usuario (el personal sanitario) en última instancia. Es decir, es el responsable de una correcta comunicación hombre-máquina.

### Matemáticas

Las matemáticas se definen como una ciencia formal que se utiliza como lenguaje para describir la naturaleza. La descripción de la naturaleza no es más que un modelaje de la misma. Un modelo matemático es una descripción de un sistema usando conceptos y lenguaje matemáticos. El proceso de desarrollo de un modelo matemático se denomina modelado matemático. Los modelos matemáticos se utilizan tanto en las ciencias naturales como en las disciplinas de la ingeniería, y también son habitualmente aplicados en ciencias de la visión.

Es importante considerar que hoy en día los aparatos oftálmicos generan una cantidad ingente de datos de numéricos. El papel primario del matemático en este contexto, es el modelaje de esos números. Es decir, utilizando herramientas matemáticas, normalizar o estandarizar los datos disponibles para construir un modelo que el personal sanitario podrá usar como referencia. Por ejemplo, un 'modelo del ojo' sirve para definir qué parámetros y dimensiones son adecuadas para cada estructura ocular. Pero los modelos no tienen por qué ser del ojo completo, pueden restringirse a estructuras como 'modelo de la córnea' o incluso a dolencias particulares 'modelo de la córnea en ojos con queratocono forma frustré'. El modelaje de los datos disponibles facilita los estudios epidemiológicos.

Por otro lado, el aprendizaje automático (del inglés, *machine learning*), es una rama de la inteligencia artificial, que puede ser interpretado como un intento de automatizar algunas partes del método científico mediante métodos matemáticos. Se trata de 'entrenar' y 'enseñar' a un ordenador utilizando gran cantidad de información. Las nuevas técnicas de diagnóstico e imagen generan una cantidad tan increíble de datos que a menudo es un desafío discernir y extraer toda la información que pueda ser útil en la práctica clínica. Las técnicas de aprendizaje automático son un importante apoyo, como herramienta objetiva, para ayudar a los profesionales médicos a diagnosticar ciertas afecciones y tomar decisiones clínicas. En particular, las técnicas de aprendizaje automático han demostrado repetidamente su utilidad para los oftalmólogos. Las posibles aplicaciones de esta tecnología van mucho más allá de lo que se ha utilizado como herramienta de diagnóstico, ya que también se puede utilizar para clasificar la gravedad de una patología, realizar una detección temprana de la enfermedad o predecir la evolución de una condición. Matemáticos e ingenieros informáticos son los profesionales más destacados en el intrincado mundo del aprendizaje automático.

### Estadística

La estadística es una especialización de las matemáticas que estudia la variabilidad, así como el proceso aleatorio que la genera siguiendo las leyes de la probabilidad. En otras palabras, el papel de la estadística es buscar correlaciones entre grupos diferenciados y definir si las correlaciones son producto del azar o si, por el contrario, existe una relación causa-efecto. También se encarga de hacer predicciones, generar modelos e inferencias (estadística

inferencial). La estadística también describe, visualiza y resume los datos originados a partir de los fenómenos de estudio (estadística descriptiva). La estadística es imprescindible en como entendemos hoy en día las ciencias de la salud y, en consecuencia, las ciencias de la visión.

### Química

La química es la disciplina científica encargada del estudio de elementos y compuestos. Investiga átomos, moléculas e iones: su composición, estructura, propiedades, comportamiento y los cambios que experimentan durante una reacción con otras sustancias. La química es fundamental para comprender en detalle el proceso de visión. La energía de la luz incidente puede convertir sustancias químicas en otras formas. El mecanismo de la visión es muy complejo y diferentes moléculas están involucradas en el proceso. El ojo posee ciertas estructuras, en ellas se encuentra la molécula del cis-retinal que cuando incide sobre ella un fotón de luz se produce un cambio en su estructura y se transforma en el trans-retinal. Esta modificación en la estructura es necesaria para el proceso de visión.

### Biología

La biología es la ciencia natural que estudia la vida y los organismos vivos, incluida su estructura física, procesos químicos, interacciones moleculares, mecanismos fisiológicos, desarrollo y evolución. Los biólogos estudian el comportamiento celular. En particular, la biología molecular es una disciplina científica relativamente joven que ya ha tenido un profundo impacto en la ciencia biomédica, incluida la investigación ocular básica y clínica. Los avances moleculares influyen cada vez de manera más clara y sólida en aspectos de diagnóstico, pronóstico y terapia en oftalmología clínica.

En la investigación básica de las ciencias de la visión, a menudo se trabaja con animales. Conejos, aves domésticas son los especímenes más habituales en los ensayos en vivo. Los biólogos, con el apoyo de los **veterinarios**, son los profesionales encargados de llevar a cabo esos experimentos e interpretar si los resultados obtenidos podrían ser trasladados a la visión humana.

### Farmacia

La farmacia une la ciencia médica con la química, es una rama del conocimiento de la salud clínica. La farmacia es la responsable del descubrimiento, desarrollo, producción, control y uso seguro de fármacos y medicamentos. En consecuencia, el farmacéutico es el profesional que tiene un extenso conocimiento de los diferentes tipos de medicamentos, así como su mecanismo de acción, interacciones, posibles efectos secundarios y toxicidad. A la vez, la farmacia necesita del saber del tratamiento y comprensión de la patología. Además, los farmacéuticos clínicos, que son una clase especializada de farmacéuticos, requieren de otras habilidades añadidas, como por ejemplo tener conocimientos sobre la adquisición y evaluación de datos físicos y de laboratorio. En oftalmología la inmensa mayoría de fármacos se aplican directamente sobre el ojo. El farmacéutico trabaja en la producción de fármacos oculares más eficaces y con menos efectos secundarios.

Todos los grupos profesionales aquí descritos están relacionados de una forma u otra con el estudio de las ciencias de la visión. Los aquí escritos no son los únicos profesionales dedicados al estudio del ojo humano, pero sí puede que sean los más representativos. Es importante reparar en el hecho, de que todos estos profesionales, a pesar de tener una formación y conocimientos científicos muy diversos entre sí, aspiran a un objetivo común: entender y preservar la visión humana. Es decir, comprender cómo funciona el ojo humano desde un punto de vista físico, químico y biológico para poder facilitar el diagnóstico y tratamiento de diferentes dolencias oculares para mejorar la calidad de vida del paciente afectado.

Todos los grupos profesionales anteriormente descritos participan de la investigación de la visión humana. Si bien es cierto, que la investigación es una elección habitualmente personal, especialmente en las disciplinas de carácter más clínico. Por ejemplo, un oftalmólogo puede limitarse a pasar consulta a sus pacientes o a realizar cirugías, sin necesidad de verse involucrado en el mundo de la investigación. O al revés, un oftalmólogo puede dedicarse en exclusiva a la investigación, sin necesidad de tratar con pacientes. Aunque todas las combinaciones son posibles, lo más habitual es que aquellos oftalmólogos involucrados en investigación, compaginen ésta con sus responsabilidades clínicas.

Lo que sí tienen en común todos los profesionales que se dedican a la investigación, ya sea de forma exclusiva o complementaria, independientemente de la rama de conocimiento de la que provengan es que están en posesión del título de doctorado. Esto, sin ser una restricción legislativa, sí es una restricción formal en muchos centros de trabajo (hospitales, universidades, centros de investigación, ...) para poder tener el estatus de investigador. En la siguiente sección se discutirá qué es el doctorado.

### Qué es el doctorado

Más allá de los diferentes contextos académicos y de los marcos legales de cada país, el doctorado se define, de manera general, como uno de los niveles de posgrado universitario, que posee mayor jerarquía académica.

Según el informe Panorama de la Educación de la OCDE 2017 (OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) publicado por el Instituto Nacional de Evaluación Educativa español (55), **tan solo un 0.8% de la población española de 25 a 64 años cuenta con estudios de doctorado.**

En el Espacio Europeo de Educación Superior y en la mayoría de los países occidentales, el acceso a los estudios de doctorado requiere de la superación previa del grado de Máster. Habitualmente se exige que el máster sea de carácter oficial (y no un título propio de una universidad o centro educativo) para dar acceso a la escuela de doctorado.

El doctorado culmina con la presentación y la defensa de la tesis doctoral. La tesis doctoral es un estudio escrito sobre una investigación de carácter original, es decir, en la tesis doctoral el doctorando recopila los resultados de su

investigación. El doctorando es la persona que está realizando los cursos de doctorado o que prepara la tesis doctoral para la obtención del grado de doctor.

No hay una duración fija para la realización del doctorado. Se estima que el doctorado dura entre tres y seis años. El plazo suele estar supeditado al tipo de financiación (beca, proyecto de investigación, ...) de la que se beneficie el doctorando. No todos los doctorandos ven económicamente retribuido su paso por los estudios de doctorado, si bien, esta es la situación más habitual, al menos en los campos científico-técnicos. En este contexto, la realización del doctorado se considera un trabajo a tiempo completo y por eso debe de ser retribuido económicamente.

**La realización del doctorado es el primer paso necesario, para desarrollar una carrera profesional como investigador.** Es también importante tener en cuenta que en España es necesario estar en posición del título de doctor para poder ser docente universitario. De hecho, se considera que investigar y dar clases en la universidad es la opción preferida por la mayoría de doctores. Aunque no la única. Trabajar en la empresa privada o para organismos públicos también son opciones válidas y frecuentes entre doctores.

En la Real Academia Española de la lengua se define *‘investigador’* como aquel que investiga. E *‘investigar’* se define como *‘Realizar actividades intelectuales y experimentales de modo sistemático con el propósito de aumentar los conocimientos sobre una determinada materia’*. Además, como se ha mencionado anteriormente, para desarrollarse como investigador es necesario tener el título de doctor. Así pues, es importante señalar que un profesional médico no es necesariamente un doctor, a menos que ese profesional médico haya realizado una tesis doctoral. El término *‘doctor’* habitualmente utilizado para referirse a los médicos es un signo de respeto hacia el colectivo, pero no debe confundirse con la titulación académica. Un médico será rigurosamente un doctor únicamente cuando haya presentado y defendido su tesis doctoral. Es decir, cuando haya realizado una investigación novedosa y rigurosa en un tema determinado y que, en general, trate sobre su especialidad médica.

### **Tipos de doctorado: académico o industrial**

Existen dos modalidades fundamentales a la hora de matricularse en los estudios de doctorado: el doctorado académico y el doctorado industrial. El doctorado académico es la modalidad más tradicional y extendida. Consiste en realizar los estudios de doctorado en el seno de una universidad o centro de investigación. El doctorado industrial es más reciente, es una manera diferente de hacer el doctorado. Consiste en una tesis de doctorado realizada dentro de una empresa, a través de un acuerdo de colaboración entre una universidad y una empresa.

Un alto porcentaje de doctores en países desarrollados trabaja en la industria, y no tanto en la universidad (mundo académico). Se estima que sobre el 60% de la investigación y el consecuente desarrollo en Europa realiza en empresas, y no en universidades. En algunos países, como Dinamarca y Francia, es habitual encontrar programas de cooperación de doctorado bien asentados que aúnan a la universidad y la empresa. En Alemania, se estima que alrededor del 16%

de todos los estudiantes de doctorado hicieron un doctorado industrial (dato de 2013), y en Italia, la *‘Escuela Internacional de Doctorado en Formación de Capital Humano y Relaciones Laborales’*, ha otorgado gran cantidad de becas a doctorandos para promover el intercambio académico y científico entre universidades y empresas. Los estudiantes de doctorado que participan en programas de doctorado industrial suelen estar muy solicitados a posteriori e igualmente están muy bien valorados por los empleadores. Muchos de estos doctorandos pueden acceder al mercado laboral sin demasiada dificultad poco después de terminar su doctorado. Aunque no suele haber garantía de trabajo fijo en un doctorado basado en la industria, muchas empresas ofrecen a sus doctorandos un puesto de trabajo al finalizar el programa.

La promoción de doctorados industriales a menudo es beneficiosa para todas las partes involucradas:

- Las universidades reciben apoyo económico de las empresas involucradas.
- Los doctorandos ganan conocimientos especializados en el sector privado y adquieren experiencia sobre cómo tener éxito en un entorno empresarial. En este contexto, las relaciones y experiencias adquiridas durante su doctorado también pueden impulsar su empleabilidad.
- Las empresas pueden desarrollar sus propios recursos humanos formando y apoyando a la próxima generación de investigadores. También es una forma de potenciar su competitividad e innovación mediante la transferencia fluida de conocimientos a las universidades e instituciones de investigación.

Los doctorados de carácter académico (universitario) suelen ser más flexibles, lo que permite a los estudiantes reorientar su investigación si así lo desearan, conforme que ganan más experiencia en el campo de estudio. Publicar su trabajo o presentarlo en conferencias y congresos es una parte habitual de todos los programas de doctorado académicos. Sin embargo, este no es el caso de los doctorados industriales, donde la empresa privada que patrocina el programa normalmente tiene metas y plazos bien definidos. Es relativamente habitual que los estudiantes tengan que firmar acuerdos de confidencialidad, y en consecuencia no puedan revelar información relacionada con el proyecto en el que están trabajando. En este contexto, la publicación de sus resultados puede estar prohibida o, al menos, requeriría un permiso especial de la empresa. Esto puede ser una limitación importante para los doctores que quieran postularse para trabajos académicos después de terminar su tesis doctoral. Por otro lado, las empresas pueden fomentar que sus estudiantes de doctorado patentes los resultados de su trabajo.

No existe un tipo de doctorado mejor que otro, pero es importante conocer bien la diferencia entre ambos. Ambos tipos de doctorado co-existen también en el campo de las ciencias de la visión. Cualquier empresa que trabaje entorno a las ciencias de la visión es susceptible de aceptar un doctorando industrial. Si la empresa es de carácter farmacéutico, probablemente requerirá graduados en biología, química o farmacia. Mientras que si la empresa

se dedica a fabricar instrumentación oftálmica aceptará estudiantes de la rama más técnica, física, ingeniería o incluso matemáticas. Todo depende de la naturaleza del proyecto a desarrollar.

### **Problemas frecuentes del investigador novel**

En los últimos años, periodistas, gestores de la política en investigación y académicos han alzado la voz sobre el impacto potencial que las condiciones laborales en las que se encuentran los investigadores jóvenes, puede tener sobre la salud mental de estos. Según un estudio reciente, los doctorandos son hasta seis veces más propensos a desarrollar depresión o ansiedad en comparación con la población general (56). Aunque tradicionalmente las universidades han sido consideradas como lugares de trabajo relajados, investigaciones recientes han apuntado la presencia de niveles alarmantes de estrés entre académicos (56), especialmente entre los más jóvenes, ya que son los jóvenes investigadores los que habitualmente se enfrentan a niveles más altos de inseguridad laboral. En consecuencia, cada vez se reportan más casos de ansiedad, depresión, agotamiento y desgaste emocional. Sin embargo, esta tendencia al alza no queda registrada en registros oficiales. Se estima que solamente 1 de cada 500 investigadores pide ayuda u orientación para enfrentarse a esta circunstancia (56). Se cree que la reticencia a buscar ayuda a menudo está causada por el miedo a la estigmatización, represalias o un impacto negativo en el futuro de la carrera profesional.

Más allá de la importancia del bienestar individual, hay razones sólidas que conducen a pensar que la precariedad laboral en el mundo académico puede tener al menos tres consecuencias importantes para el conjunto de la sociedad.

Primero, el trabajo de los estudiantes de doctorado en sí mismo constituye una importante fuente de avance científico, ya que una tesis doctoral requiere de una aportación original y única a un determinado campo de estudio. Además, la diseminación pública de los resultados obtenidos durante dicha investigación es un requisito indispensable para conseguir el título de doctor, lo que hace que la diseminación pública de resultados juegue un papel fundamental en el proceso científico actual.

Segundo, dado que la mayor parte de estudiantes de doctorado forman parte de amplios grupos de investigación, evaluados por su impacto científico como conjunto (57), la existencia de doctorandos con problemas mentales podría suponer un coste considerable a universidades y equipos de investigación. Hoy en día, el camino a la excelencia científica parece estar marcado en exclusiva por el número de publicaciones, factor de impacto y número patentes, ignorando el hecho de que la consecución de esos objetivos va a menudo asociado a niveles altos de estrés. Sin embargo, el hecho de que uno o varios miembros de un equipo se sientan incapacitados para trabajar por estrés, agotamiento o cualquier otro motivo similar repercutirá en los resultados finales del grupo, lo que afectará al nivel de financiación recibida (58).

Tercero, los problemas mentales asociados a los académicos universitarios tienen un impacto directo en la investi-

gación industrial. Diferentes estudios sobre el abandono de estudios de doctorado sugieren que entre el 30% y el 50% de los programas no se completan, el porcentaje varía dependiendo de la disciplina y del país. Dicho rechazo dificultará que la empresa privada pueda atraer nuevo talento, comprometiendo la viabilidad y calidad de la investigación industrial. Debido a que la competición económica entre países está estrechamente ligada al avance tecnológico y cognitivo de cada nación, si los investigadores académicos con experiencia dejan de estar interesados en cualquier tipo de investigación, ya sea pública o privada, las consecuencias económicas para el país pueden ser importantes.

A estas dificultades inherentes a la realización de estudios de doctorado hay que sumarles los potenciales problemas que pueden aparecer en la realización de un proyecto de carácter multidisciplinar, tal y como se describe en la siguiente sección.

## **LA MULTIDISCIPLINARIEDAD EN LAS CIENCIAS DE LA VISIÓN: EXPERIENCIAS Y EJEMPLOS REALES**

### ***Multidisciplinariedad: definición, ventajas y desventajas***

El trabajo en equipo que involucra múltiples disciplinas se prioriza y enfatiza cada vez más en la investigación, los servicios, la educación y las políticas de salud. Los términos multidisciplinario, interdisciplinario y transdisciplinario se utilizan cada vez más en la literatura, pero se definen de forma ambigua y se utilizan indistintamente.

La multidisciplinariedad se basa en conocimientos de diferentes disciplinas, pero se conserva dentro de sus límites. Por otra parte, la interdisciplinariedad sintetiza, analiza y armoniza los vínculos entre diferentes disciplinas en un todo coherente y coordinado. La transdisciplinariedad trasciende las fronteras tradicionales de ciencias naturales, sociales y de la salud en un contexto de humanidades, integrando armónicamente ramas del conocimiento tradicionalmente muy distintas las unas de las otras. De una forma u otra, los objetivos de los enfoques disciplinarios múltiples son resolver problemas complejos o del mundo real, proporcionar diferentes perspectivas sobre los problemas, crear preguntas de investigación, desarrollar definiciones y directrices clínicas consensuadas y proporcionar servicios de salud integrales. El trabajo en equipo multidisciplinario tiene ventajas e inconvenientes que se describirán a continuación.

Como se ha explicado anteriormente, el estudio de las ciencias de la visión tiene un marcado carácter multidisciplinar. Es decir, que un profesional dado necesita de otros, fuera de su área, para complementar su conocimiento y así poder avanzar.

La multidisciplinariedad puede aplicarse fundamentalmente de dos formas:

1. El equipo de trabajo es monodisciplinar. Los miembros de un equipo fundamentalmente monodisciplinar pueden colaborar de manera puntual con individuos de fuera del equipo de trabajo, que tengan una expe-

**Tabla 1.** Problemas más habituales entre los jóvenes investigadores (doctorandos), con especial enfoque a las ciencias de la visión (Fuente propia).

Problema del investigador novel	Descripción/Ejemplos
Comenzar el proyecto de investigación como individuo completamente nuevo al objeto de estudio.	Muchos doctorandos comienzan su investigación de cero, son completamente nuevos al campo de estudio. Esto es especialmente problemático en un campo como el de ciencias de la visión, donde podemos encontrar por ejemplo, a un matemático o un físico que nada sabe de anatomía ocular y sin embargo tienen que ponerse al día de forma rápida y, en la mayoría de los casos, independiente, para poder comenzar a trabajar en su proyecto.
Problemas de naturaleza personal	Sufrir de ansiedad, soledad, inseguridades varias es habitual entre los estudiantes de doctorado, especialmente aquellos que se dedican al campo de ciencias de la salud
Desencuentros con el supervisor	Existen casi tantos tipos de supervisores y estilos de supervisión como de estudiantes. Es una queja habitual entre los doctorandos que el supervisor no les apoya lo suficiente, no les guía o ayuda como hubiesen esperado.
Recurrente falta de conocimiento 'técnico' (know-how)	Aprender una determinada técnica, ya sea de carácter clínico o técnico, a menudo lleva tiempo y mucha práctica por 'prueba y error'. La falta de ayuda de personas más experimentadas puede dificultar enormemente el desarrollo profesional del investigador novel.
La investigación está en un punto muerto	Es frecuente que conforme avanza un proyecto exista un problema en el desarrollo del mismo no trivial y de difícil resolución. Aunque esto es habitual en la investigación a cualquier nivel, la falta de experiencia juega en contra del joven investigador. Dependiendo de los apoyos y recursos que el joven investigador disponga el problema será más o menos llevadero.
Compaginar la investigación de doctorado con otras tareas profesionales	Esta circunstancia afecta especialmente a los investigadores de tipo clínico, es decir, oftalmólogos y optometristas. Es habitual, que además de su proyecto de doctorado, sigan teniendo sus responsabilidades clínicas habituales (visitas y consultas de pacientes).
Financiación	Los investigadores jóvenes están supeditados a conseguir financiación externa para poder financiar sus estudios. Sin ver retribuida su labor investigadora, es difícil que los doctorandos puedan mantener un nivel de vida digno.

riencia laboral diferente. Por ejemplo, un equipo de ingenieros biomédicos contacta con un oftalmólogo para resolver unas dudas concretas de fisiología.

- El equipo de trabajo es multidisciplinar. Las personas involucradas en este equipo tienen un objetivo común (por ejemplo, mejorar el diagnóstico temprano del glaucoma), pero atacarán el problema desde diferentes puntos de vista, ya que cada uno tendrá una formación diferente.

Sea de una forma o de otra, la multidisciplinariedad cuenta tanto con ventajas como desventajas que se listan a continuación.

#### *Ventajas de trabajar con un equipo multidisciplinar.*

- Fomenta la creatividad.
- El trabajo final suele ser de mayor calidad.
- El resultado final a menudo es mejor recibido por otros investigadores. Por ejemplo, un grupo de ingenieros ha trabajado en el desarrollo de una cámara de alta resolución para la observación de la retina. Si entre los investigadores, hay un oftalmólogo, el público objetivo (otros oftalmólogos) recibirán más abiertamente los resultados publicados. Y también puede ocurrir al revés, que un equipo fundamentalmente clínico cuente con el apoyo de una persona más técnica, para realizar, por ejemplo, los cálculos del estudio.
- Se pueden acometer retos científicos de mayor nivel. Cuantos más puntos de vista diferentes haya para acometer un determinado problema, más fácil o probable será alcanzar un resultado científico innovador e importante.

#### *Desventajas de trabajar con un equipo multidisciplinar.*

- Encontrar un 'lenguaje común'. Palabras técnicas que son triviales para un determinado profesional, pueden ser completamente nuevas para otra persona.
- El trabajo suele ralentizarse. Diferentes profesionales con diferentes obligaciones. Si hay una fecha fija para realizar una tarea, esto habitualmente es fuente de conflicto y estrés.
- Lucha de 'egos'. Puede ocurrir que todo el mundo quiera tener razón, o mostrarse como líder del grupo, dificultando la colaboración.
- Es probable que no todos los miembros del grupo se sientan valorados. Es habitual que un profesional sienta que aquellos ajenos a su campo consideran su trabajo como trivial o más sencillo de lo que en realidad es. Lo mismo ocurre con la apreciación del tiempo. Para una persona ajena a un determinado campo de trabajo es complicado estimar de forma realista si una determinada tarea requiere una semana de trabajo o un mes.

#### **Difficultades y retos del investigador novel en ciencias de la visión**

Como se ha explicado en el apartado anterior 'Problemas frecuentes del investigador novel' parecen existir ciertas dificultades intrínsecas a la realización de un doctorado, así como a ser un investigador en los primeros años de carrera profesional. La Tabla 1 resume los problemas más habituales que afectan a los jóvenes investigadores.

¿Considera que las ciencias de la visión es un campo de estudio multidisciplinar?

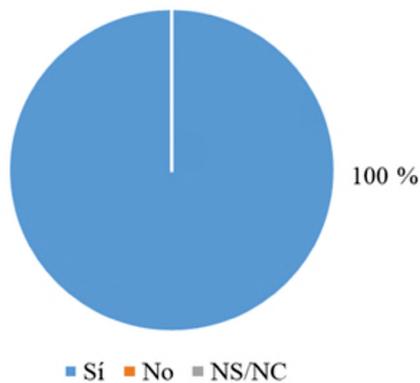


Figura 4. La totalidad de jóvenes investigadores encuestados, cuyo trabajo gira en torno a la visión y el ojo humano declararon que consideran las ciencias de la visión como un campo de estudio multidisciplinar (Fuente propia).

¿Considera que su doctorado es de naturaleza multidisciplinar?

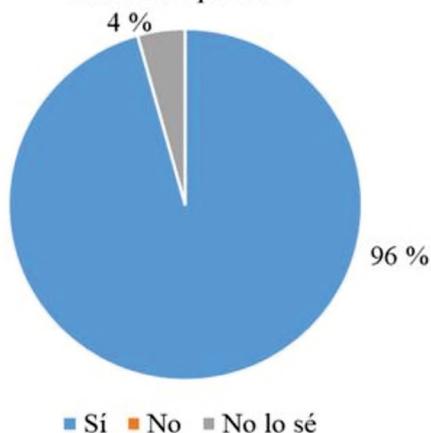


Figura 5. Grafico circular que ilustra que tan solo uno de los jóvenes investigadores encuestados, que representa un 4%, no tiene claro si su tesis doctoral es de naturaleza multidisciplinar, mientras que todos los demás declararon afirmativamente. (Fuente propia).

### Naturaleza de la colaboración multidisciplinar en ciencias de la visión

Hoy en día, existe una clara tendencia a trabajar en equipos multidisciplinarios o colaborar con profesionales ajenos al área de conocimiento de uno mismo. A pesar de sus desventajas, la multidisciplinariedad ha probado ser eficaz para el progreso científico. Pero, ¿cómo afecta la multidisciplinariedad a los jóvenes investigadores? Como se ha discutido anteriormente, hacer un doctorado ya es por sí complicado y a menudo compromete el bienestar e incluso la salud mental del estudiante. En este contexto parece importante preguntarse si la multidisciplinariedad ayuda o entorpece el desarrollo de un investigador novel. Para contestar a esta pregunta, en el seno de esta tesina de investigación, se ha realizado un breve cuestionario (Anexo 1) que se ha repartido entre diferentes profesionales que han terminado recientemente sus estudios de doctorado en el campo de las ciencias de la visión.

Un total de 23 profesionales jóvenes investigadores han contestado al cuestionario que se presenta en el Anexo 1. De los cuales, la mitad responde a un perfil más clínico (oftalmólogos u optometristas) y la otra mitad a un perfil más científico técnico (físicos, ingenieros, matemáticos o biólogos). Tal y como indica la Figura 4, todos ellos consideran que las ciencias de la visión es un campo de estudio multidisciplinar. Cuando se les preguntó en concreto sobre su experiencia y su tesis doctoral, solamente una persona declaró no estar segura si la naturaleza de su investigación era multidisciplinar mientras todos los demás así lo confirmaron, Figura 5.

En la Tabla 1 se han descrito los problemas más habituales que afectan a los jóvenes investigadores. En particular, tal y como muestra la Figura 6, el desafío más popular entre los doctorandos en el campo de ciencias de la salud son las dificultades técnicas recurrentes o *know-how*, es decir, el saber práctico del día a día. La introducción al campo de estudio también parece que fue una dificultad común entre de muchos de los investigadores jóvenes encuestados.

### Dificultades del investigador novel en ciencias de la visión

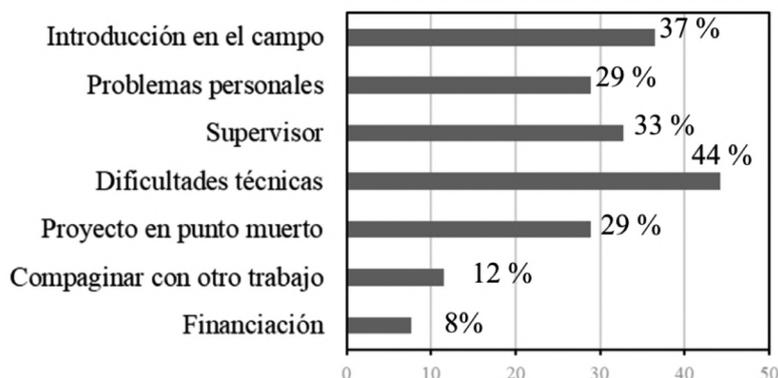
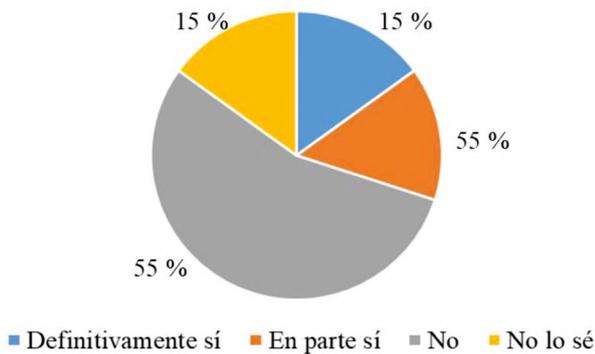


Figura 6. Recurrencia de los problemas más habituales que sufren los investigadores jóvenes según se describió en la Tabla 1, aplicado a jóvenes dedicados al campo de ciencias de la salud. Se dio la opción a cada entrevistado de seleccionar tantas opciones como considerase necesarias (Fuente propia).

¿Considera que las dificultades encontradas durante su doctorado estuvieron reacionadas con el carácter multidisciplinar del mismo?



**Figura 7.** Gráfico circular que muestra qué porcentaje de jóvenes investigadores en el campo de las ciencias de la visión considera que las dificultades encontradas en sus estudios de doctorado estuvieron relacionadas con el carácter multidisciplinar del mismo.

La mayoría de los encuestados parecen estar de acuerdo en que los problemas o dificultades que sufrieron durante la realización de su tesis doctoral poco tenía que ver con el carácter multidisciplinar de la misma, tal y como indica la Figura 7.

Como se ha mencionado en la sección anterior, existen diversas dificultades inherentes a la multidisciplinariedad. En la Tabla 2 se listan y describen algunas de estas dificultades descritas y explicadas en el contexto de la investigación en ciencias de la visión.

En la Tabla 2 se han descrito los problemas más habituales asociados a la multidisciplinariedad y su contexto en el campo de las ciencias de la visión. Como muestra la Figura 8, el encontrar un lenguaje común parece ser el problema más acusado derivado de la multidisciplinariedad que afecta a los jóvenes investigadores en ciencias de la visión entrevistados.

Sobre si en general es más fácil o más complicado trabajar o colaborar con un equipo multidisciplinar, tal y como indica la Figura 9, de todos los profesionales encuestados dos de cada tres opina que es más fácil trabajar en un equipo multidisciplinar, el resto de opiniones de los encuestados se divide entre la consideración de que es más difícil trabajar en un equipo multidisciplinar o que depende de las circunstancias. De manera análoga, como muestra la Figura 10, los jóvenes investigadores encuestados en su mayoría disfrutaban del trabajo de carácter multidisciplinar, ninguno de ellos lo rechaza taxativamente.

A continuación, se comparten algunas experiencias personales de los profesionales entrevistados, indicando su categoría profesional, sin reparar en el género de la persona.

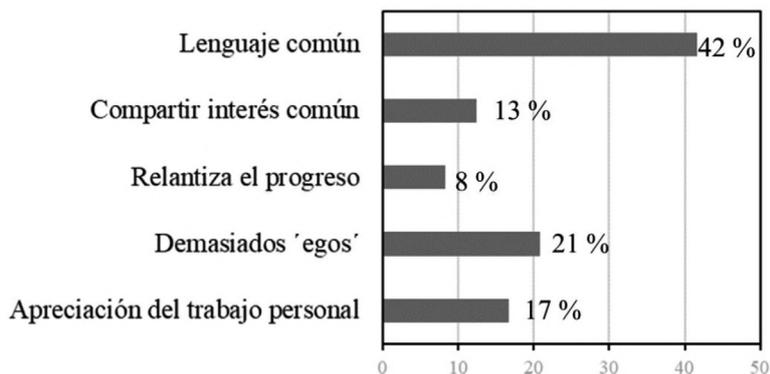
*‘Considero mi doctorado multidisciplinar. Sobre si es un modo de trabajo que me guste o no... Supongo que depende del equipo de trabajo, de la experiencia del joven investigador y de lo valiosa que los otros consideren esa experiencia. Demasiados egos dentro de la profesión médica.’* (Optometrista, Bélgica)

*‘Tuve dificultades como cualquier otro al realizar mi doctorado, pero tener el apoyo de otros profesionales, como bió-*

**Tabla 2.** Descripción de las dificultades más habituales asociadas a la investigación multidisciplinar y su contexto en ciencias de la visión (Fuente propia).

Problema asociado a la multidisciplinariedad	Contexto en ciencias de la visión
Encontrar un ‘lenguaje común’ con otros profesionales que no comparten el mismo área de conocimiento	Palabras técnicas que son triviales para un determinado profesional, pueden ser completamente nuevas para otra persona. Esto es especialmente habitual con la cantidad de términos clínicos que los oftalmólogos y optometristas manejan con cotidianidad.
Compartir intereses comunes con profesionales fuera del área de interés de uno mismo	Esta dificultad puede estar asociada con la creatividad y la dificultad de comunicación con profesionales de otros campos. A menudo ocurre que uno está tan metido en su propio campo que resulta complicado encontrar problemas científicos que resolver que vayan más allá de lo que dispone una única disciplina.
Es un proceso que lleva tiempo, ralentiza el progreso	En general, cuantas más personas forman un equipo, más complicado será este de gestionar. Especialmente si se trata de una colaboración desinteresada (no remunerada) y una parte más del trabajo principal de cada uno de los miembros del equipo de trabajo. Es decir, que si el proyecto de investigación común no es más que un añadido a las tareas profesionales de uno o varios individuos es fácil que la realización de tareas se dilate en el tiempo. Sin embargo, si la multidisciplinariedad ralentiza o acelera la investigación es discutible, depende de las circunstancias de cada proyecto y equipo de trabajo.
La presencia de demasiados ‘egos’ dificulta el avance	Puede ocurrir que varias personas en el grupo quieran mostrarse como líder del grupo, dificultando la colaboración. Este tipo de conflictos, ralentiza el proceso de investigación y tiende a desmotivar a los demás miembros del equipo.
Apreciación del trabajo propio por otros profesionales que no comparten el mismo campo de estudio	Es usual que un profesional dado sienta que aquellos ajenos a su campo de trabajo, consideren su trabajo como trivial o más sencillo o más rápido de realizar de lo que en realidad es. Por ejemplo, una profesional cuyo trabajo es analizar datos, puede que no sea consciente del trabajo que lleva esa recogida de datos, no solo el tiempo que el sanitario emplea con el paciente si no la preparación de un protocolo y documentación necesaria para llevar la investigación clínica a cabo. De igual forma, es habitual que a un profesional que acostumbra a trabajar con pacientes le cueste estimar el trabajo que conlleva el diseño y desarrollo sistemático del análisis de los datos recogidos en la clínica.

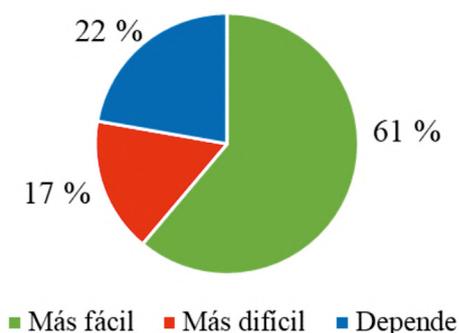
*Dificultades relacionadas con la multidisciplinaridad en ciencias de la visión*



**Figura 8.** Recurrencia de las dificultades asociadas a la multidisciplinaridad más habituales según se describió en la Tabla 2, aplicado a jóvenes dedicados al campo de ciencias de la salud. Se dio la opción a cada entrevistado de seleccionar tantas opciones como considerase necesarias (Fuente propia).

logos y expertos en genética, fue la única manera de sacar mi investigación adelante. Para mí la multidisciplinaridad es muy importante' (Médico oftalmólogo, Irlanda)

¿Considera que colaborar con un equipo multidisciplinar hace el trabajo más fácil o más complicado para los jóvenes investigadores?



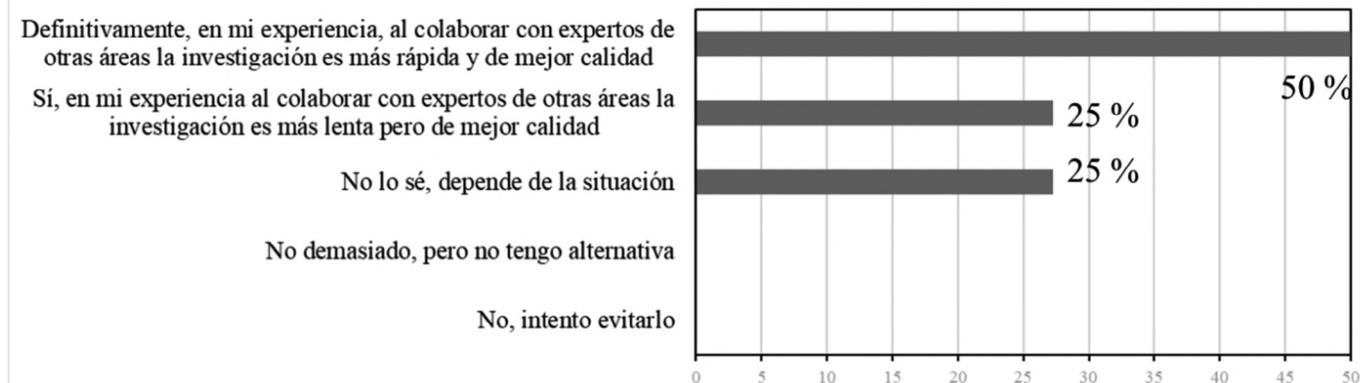
**Figura 9.** Gráfico circular que recoge la opinión de los jóvenes investigadores encuestados (Fuente propia).

'Creo que todo depende de lo bien que se elija la multidisciplinaridad y de lo bien que complemente el tema de la tesis. También depende de cómo de grande sea el equipo que trabaja en una tarea en particular (aprendí que "muchas manos en un plato hacen mucho garabato") y también (que en realidad es más general) las personalidades particulares de las personas hacen mucho. Los investigadores jóvenes requieren el apoyo de otros investigadores con más experiencia. Es realmente negativo cuando sienten que los colegas más experimentados tienen un carácter competitivo. También deben estar seguros de que su trabajo diario se verá recompensado y repercutirá de manera directa en completar el objetivo principal en ese momento de la carrera profesional, es decir, completar el doctorado.' (Ingeniero Óptico, Polonia)

'Disfruto mucho la colaboración de carácter multidisciplinar, es habitual que otros profesionales vean el mismo problema, pero desde un ángulo muy diferente, a menudo te ves inmerso en conversaciones muy interesantes' (Ingeniero biomédico, Bélgica)

'A veces, el propósito final puede ser diferente para diferentes profesionales. En cada área se pueden dar más o menos

*¿Le gusta participar en investigación de carácter multidisciplinar?*



**Figura 10.** Los jóvenes investigadores encuestados en su mayoría disfrutaban del trabajo de carácter multidisciplinar, ninguno de ellos lo rechaza taxativamente (Fuente propia).

importancia a diferentes detalles. El propósito final del trabajo debe estar muy claro para que todos vayan en la misma dirección. (Optometrista, España)

‘En mi experiencia la mayor dificultad fue conectar con los profesionales adecuados. Puede que intuyas qué tipo de ayuda necesitas, pero si no lo tienes muy claro, es muy difícil explicárselo a otra persona, especialmente si ni siquiera compartís el mismo campo de interés’. (Bioquímico, Bélgica)

Respecto a la frecuencia de colaboración, la inmensa mayoría de jóvenes investigadores en ciencias de la visión colabora de forma sistemática o muy habitual con otros profesionales fuera de su campo de conocimiento, tal y como indica la Figura 11.

¿Con qué frecuencia colabora con otros profesionales fuera de su campo de conocimiento?

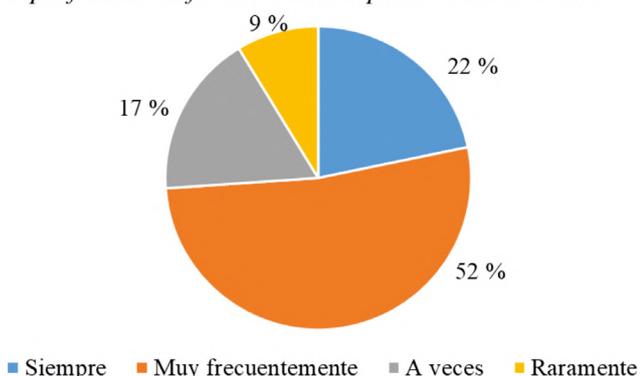


Figura 11. Frecuencia de colaboración con otros profesionales relacionados con las ciencias de la visión, pero fuera del campo de conocimiento propio (Fuente propia).

Dentro de las colaboraciones más frecuentes, la oftalmología es indiscutiblemente la rama reina del conocimiento en lo que a la investigación del ojo humano y ciencias de la visión se refiere, tal y como indica la Figura 12. Casi la totalidad de investigadores jóvenes encuestados confirmaron que colaboran con uno o varios oftalmólogos para llevar a cabo su investigación. Muchos también cuentan con el apoyo de

Colaboraciones más frecuentes en ciencias de la visión, fuera del área de conocimiento propio

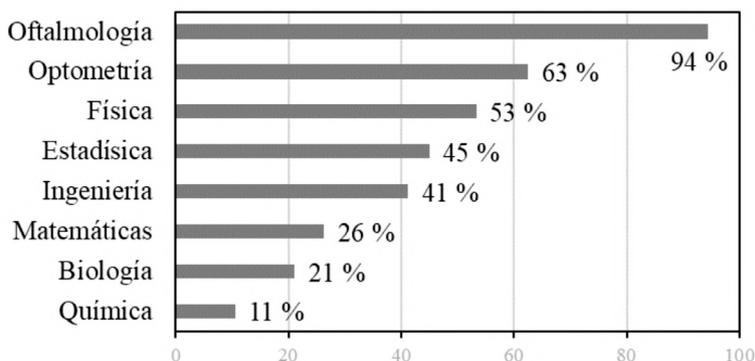


Figura 12. Gráfico de barras que representa el porcentaje de investigadores jóvenes que colaboran con otros profesionales, fuera de su campo de conocimiento (Fuente propia).

¿Con qué tipo de profesionales sanitarios colaboran habitualmente los profesionales de disciplinas más técnicas?

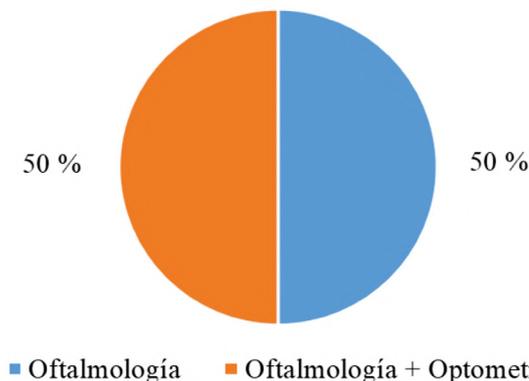


Figura 13. Gráfico circular que ilustra que, de los profesionales no sanitarios que sí colaboran con profesionales sanitarios, la mitad se ayuda en exclusiva de oftalmólogos mientras que la otra mitad colabora además con optometristas (Fuente propia).

optometristas. En cuanto a los investigadores más clínicos (oftalmólogos y optometristas), la mitad de ellos se apoya en físicos y estadistas para realizar sus proyectos de investigación, tal y como muestra la Figura 12.

Si separamos el análisis en dos grandes grupos según el carácter del trabajo de investigación: clínico (oftalmólogos y optometristas) y no clínicos (todos los demás profesionales), vemos que la mitad de los profesionales no clínicos se apoyan únicamente en oftalmólogos y que la otra mitad necesita también de colaborar con optometristas, tal y como muestra la Figura 13. No se ha registrado ningún caso, entre los jóvenes investigadores encuestados, en el que se colaborase exclusivamente con optometristas sin el apoyo de oftalmólogos.

Respecto a con quién tienden a colaborar los oftalmólogos y optometristas, si bien un tercio de ellos colabora con físicos, no existe una disciplina no-clínica que domine sobre todas las demás, tal y como muestra la Figura 14.

¿Con los expertos de qué campo colaboran habitualmente los profesionales sanitarios (oftalmólogos y optometristas)?

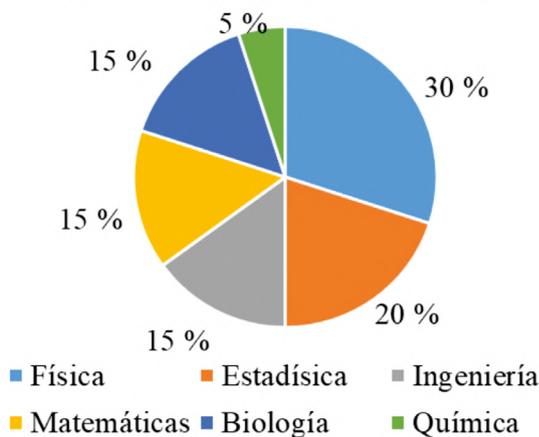


Figura 14. Gráfico circular que ilustra las colaboraciones más habituales que eligen los profesionales clínicos (oftalmólogos y optometristas), fuera de su área de conocimiento (Fuente propia).

**Ejemplos reales de multidisciplinariedad aplicada a las ciencias de la visión**

En esta sección se muestran siete ejemplos reales de investigación en el campo de las ciencias de la visión llevada a cabo por investigadores jóvenes.

**Ejemplo 1. Ingeniería biomédica en colaboración con optometría**

- *Ejemplo basado en la publicación científica (59): Consejo A, Iskander DR. Corneo-scleral limbus demarcation from 3D height data. Contact Lens and Anterior Eye. 2016; 39(6): 450-457*
- *Breve descripción del trabajo:* El objetivo de este trabajo es demarcar de manera precisa y automática la transición esclero-corneal, es decir, la posición del limbo corneal, tal y como muestra la Figura 15. Para ello se utilizaron medidas adquiridas con un topógrafo corneoescleral (colaboración

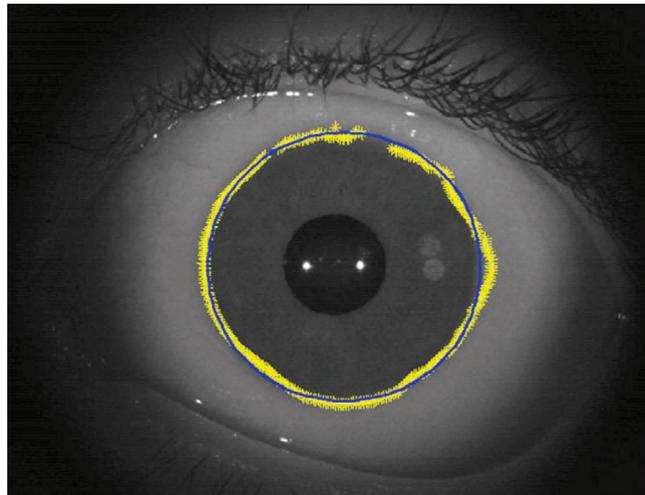


Figura 15. Estimación del limbo basado en el algoritmo desarrollado (producción propia, adaptado de: Consejo A, Iskander DR. Corneo-scleral limbus demarcation from 3D height data. Contact Lens and Anterior Eye. 2016; 39(6): 450-457)

con optometría), que posteriormente se exportaron y utilizaron para crear un algoritmo (tarea de ingeniería biomédica), basado en la elevación esclerocorneal, que determinase la posición del limbo. Un algoritmo es una secuencia finita de instrucciones bien definidas que se pueden implementar por un ordenador, típicamente para resolver un problema concreto dado. En general, para poder realizar modelos y algoritmos válidos, es habitual que los investigadores se apoyen en calibres ideales y bien definidos, como muestra la Figura 16. Es una forma de validar un determinado algoritmo. Primero, el algoritmo debe funcionar a la perfección en un caso bien definido, en el patrón, y una vez esa validación esté completa, el algoritmo puede probarse en ojos reales.

En la práctica clínica, a menudo se toman medidas clínicas basadas en la subjetividad o criterio del personal sanitario. Hoy en día, la tendencia es a eliminar esa subjetividad, para que los resultados sean reproducibles y comparables en el tiempo. La ingeniería biomédica es un apoyo importante para acometer este resultado.

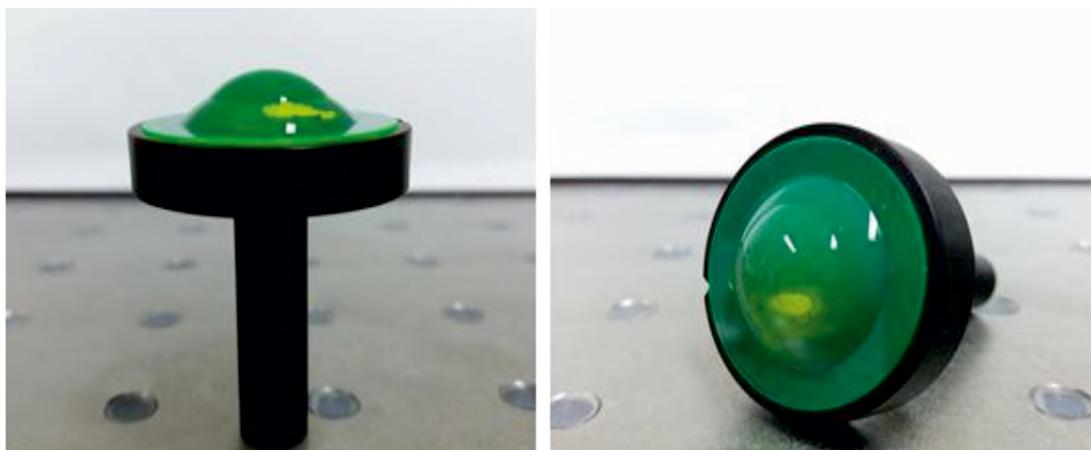
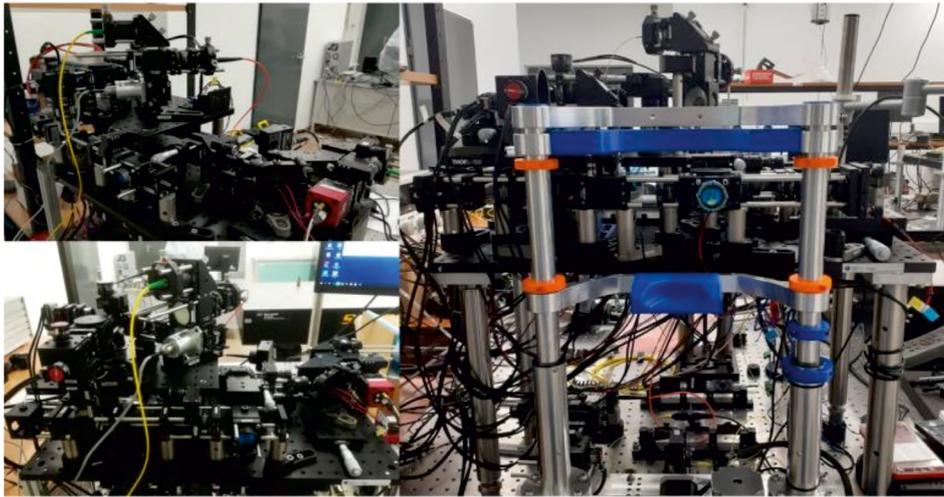


Figura 16. Calibres de material PMMA (un tipo de plástico) que imitan la superficie corneoescleral del ojo humano (Fuente propia).



**Figura 17.** Prototipo del FET (Freeze Eye Tracker). Imagen cortesía del Dr. MM Bartuzel (Fuente: Tesis doctoral del Dr. Bartuzel, *Optical methods for investigating aspects of the human eye dynamics* 2020).

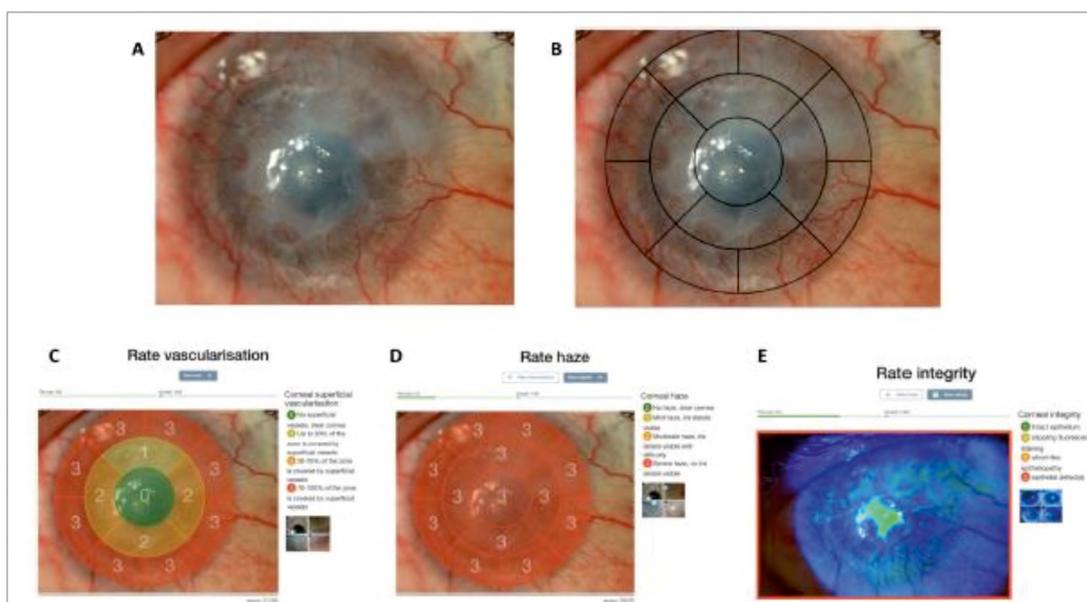
### Ejemplo 2. Ingeniería óptica y física en colaboración con oftalmología

- *Ejemplo basado en la publicación científica* (60): Bartuzel MM, Wróbel K, Tamborski S, Meina M, Nowakowski M, Dalasiński K, Szkulmowska A, Szkulmowski M. *High-resolution, ultrafast, wide-field retinal eye-tracking for enhanced quantification of fixational and saccadic motion*. Biomedical Optics Express. 2020 Jun 1;11(6):3164-80
- *Breve descripción del trabajo:* El objetivo de este trabajo es el diseño y desarrollo de un sistema de seguimiento ocular (eye-tracker) retiniano no invasivo capaz de detectar desplazamientos oculares para evitar los artefactos en la imagen creados por el movimiento natural e involuntario del ojo humano. Este trabajo de desarrollo de instrumentación reúne a físicos, ingenieros ópticos y electrónicos. Como muestra la Figura 17 el aparato, a pesar de haber

probado su eficacia, todavía se encuentra en la fase de prototipo. Los investigadores involucrados colaboran con oftalmólogos que serán los encargados de testear el aparato en un entorno real, antes de que el instrumento alcance el interés comercial.

### Ejemplo 3. Oftalmología en colaboración con ingeniería informática

- *Ejemplo basado en la publicación científica* (61): Behaegel J, Consejo A, Wouters K, Koppen C, De Cock J, Ní Dhubhghaill S. *Development and validation of an open-source grading tool for outcome assessment in limbal stem cell treatment*. Cornea. 2020; 39(6):787-792
- *Breve descripción del trabajo:* La deficiencia de células madre en el limbo esclerocorneal a menudo provoca se-



**Figura 18.** A: Ojo afectado por deficiencia de células madre en el limbo. B-E: capturas de pantalla del programa informático de libre acceso creado en el seno de este trabajo. (Fuente propia. Imagen tomada de la publicación Behaegel J, Consejo A, Wouters K, Koppen C, De Cock J, Ní Dhubhghaill S. *Development and validation of an open-source grading tool for outcome assessment in limbal stem cell treatment*. Cornea. 2020; 39(6):787-792).

veros problemas de visión que enormemente empeoran la calidad de vida del paciente. Existen diferentes tratamientos para tratar esta dolencia ocular, sin embargo, no existe un consenso claro y estandarizado entre profesionales médicos para gradar la evolución de la enfermedad. El objetivo de este trabajo es precisamente proporcionar un programa informático de acceso gratuito, con el objetivo de gradar imágenes de pacientes afectados por la deficiencia de células madre en el limbo y poder así evaluar de forma consistente su evolución. Este trabajo nació de una necesidad que observaron los oftalmólogos participantes del estudio, responsables del tratamiento de los pacientes afectados. Sin embargo, este trabajo no hubiera sido posible sin la colaboración con profesionales de carácter más técnico encargados, por una parte, del desarrollo del programa informático (software), como indica la Figura 18, como de la estadística y el tratamiento de datos.

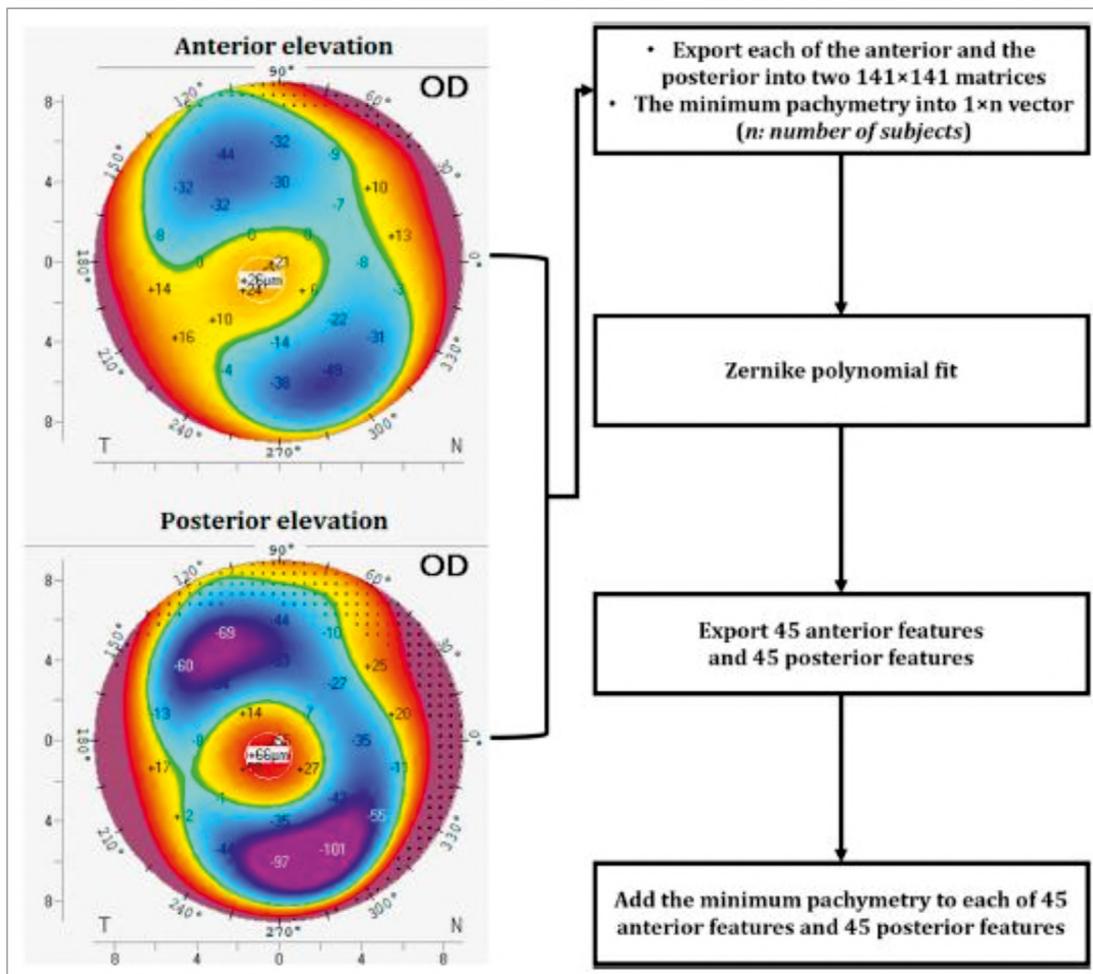
**Ejemplo 4. Matemáticas en colaboración con oftalmología y optometría**

- *Ejemplo basado en la publicación científica (62):* Issarti I, Consejo A, Jiménez-García M, Kreps EO, Koppen C, Rozema JJ. *Logistic index for keratoconus detection and severity scoring (Logik)*. Computers in Biology and Medicine. 2020; 122: 103809

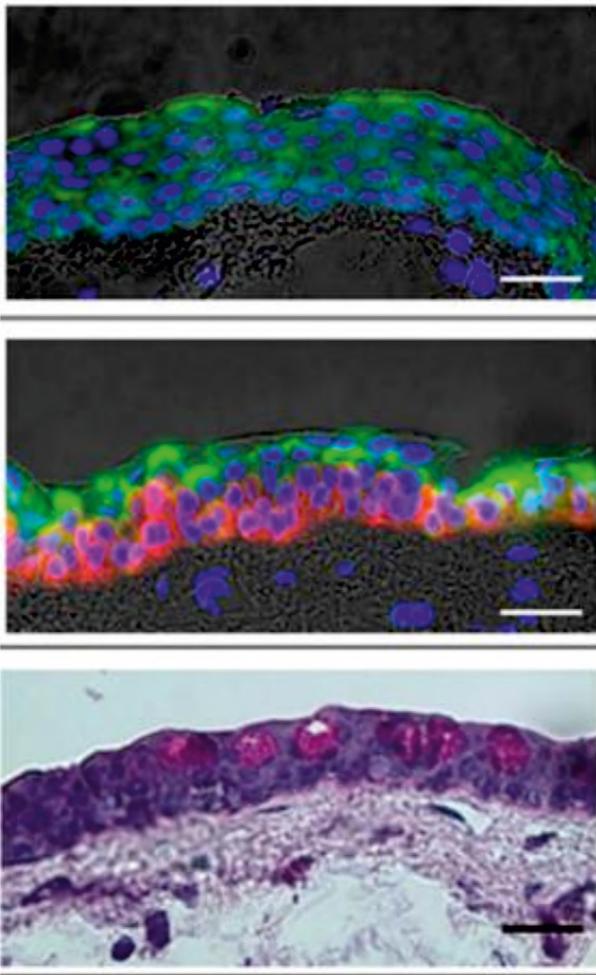
- *Breve descripción del trabajo:* La detección del queratocono en su estadio más preliminar y posterior gradación, continúa siendo un reto por resolver en el campo de la oftalmología. En este trabajo, basado en inteligencia artificial y aprendizaje automático, los autores utilizan datos clínicos, proporcionados por un topógrafo corneal, para reinterpretar la detección de queratocono. La Figura 19 muestra un ejemplo de los mapas corneales proporcionados por el topógrafo corneal, así como el esquema del algoritmo diseñado e implementado para la detección precoz de la enfermedad de queratocono.

**Ejemplo 5. Biología en colaboración con oftalmología**

- *Ejemplo basado en la publicación científica (63):* Bertolin M, Breda C, Ferrari S, Van Acker SI, Zakaria N, Di Iorio E, et al. *Optimized Protocol for Regeneration of the Conjunctival Epithelium Using the Cell Suspension Technique*. Cornea. 2019;38(4):469-79
- *Breve descripción del trabajo:* En el contexto de regeneración ex-vivo de la conjuntiva, el objetivo de este trabajo de investigación es desarrollar láminas epiteliales conjuntivales de tejido autógeno para su uso como medicamentos de terapia avanzada para trastornos graves de la superficie ocular que afectan a la conjuntiva. La Figura



**Figura 19.** Ejemplo de mapas corneales (izquierda), y la descripción de la implementación del algoritmo diseñado para analizar la información extraída de dichos mapas (derecha). (Fuente propia, Imagen tomada de la publicación: Issarti I, Consejo A, Jiménez-García M, Kreps EO, Koppen C, Rozema JJ. *Logistic index for keratoconus detection and severity scoring (Logik)*. Computers in Biology and Medicine. 2020; 122: 103809).

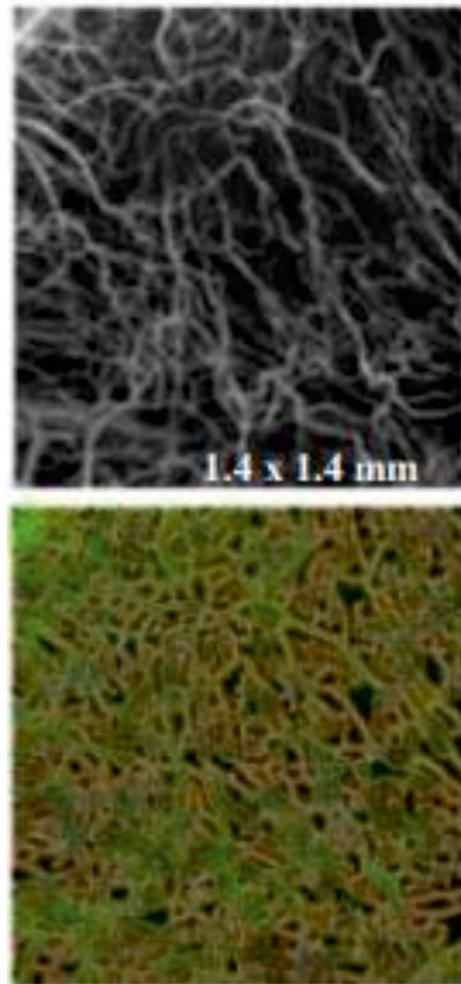


**Figura 20.** Imágenes correspondientes al análisis inmunohistoquímico de biopsias conjuntivales humanas. (Fuente: imagen adaptada de la publicación científica Bertolin M, Breda C, Ferrari S, Van Acker SI, Zakaria N, Di Iorio E, et al. *Optimized Protocol for Regeneration of the Conjunctival Epithelium Using the Cell Suspension Technique*. *Cornea*. 2019;38(4):469-79)

20 muestra imágenes de cultivo celular tomadas en el laboratorio. Para garantizar el éxito, este trabajo de investigación necesitó de ingenieros biomédicos, oftalmólogos, estadísticos, así como personal técnico de laboratorio. Es decir, personas encargadas del tratamiento y mantenimiento de los diferentes cultivos celulares.

#### Ejemplo 6. Física óptica en colaboración con biología y química

- *Ejemplo basado en la publicación científica (50):* Rapolu M, Niedźwiedziuk P, Borycki D, Wnuk P, Wojtkowski M. *Enhancing microvasculature maps for Optical Coherence Tomography Angiography (OCT-A)*. *Photonics Letters of Poland*. 2018; 10 (3), 61-63
- *Breve descripción del trabajo:* La angiografía de coherencia óptica (OCT-A) es un instrumento relativamente nuevo que brinda imágenes angiográficas de alta resolución de la circulación coroidea y retinal. Los autores del trabajo aquí presentado, físicos e ingenieros ópticos, proponen métodos alternativos a los existentes para mejorar la calidad de los angiogramas (Figura 21), así como para extraer información cuantitativa de los mismos. Es importante señ

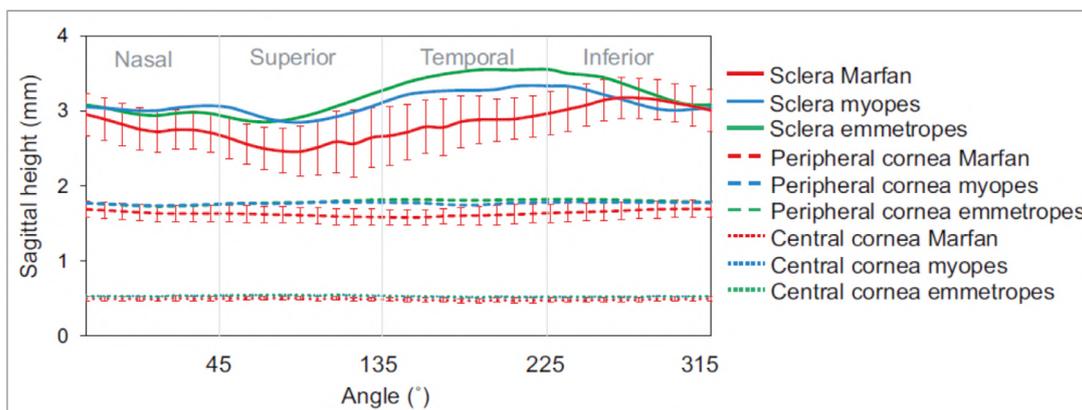


**Figura 21.** Mapa angiográfico original (arriba) y con contraste y resolución mejorado (abajo). Imágenes correspondientes al cerebro tumoral de un ratón. La técnica presentada tiene el potencial de ser transferible al estudio de la angiografía ocular (Fuente: imagen adaptada de la publicación científica Rapolu M, Niedźwiedziuk P, Borycki D, Wnuk P, Wojtkowski M. *Enhancing microvasculature maps for Optical Coherence Tomography Angiography (OCT-A)*. *Photonics Letters of Poland*. 2018; 10 (3), 61-63).

lar dos cosas, la primera que este estudio está realizado en el cerebro de ratones. Sin embargo, los resultados obtenidos son trasladables a los estudios del ojo humano, que el OCT-A es una técnica cada vez más utilizada para observar el flujo sanguíneo en la coroides y la retina. Por otra parte, merece también la pena señalar que, en la realización de este trabajo, no participó ningún profesional sanitario, es decir, ningún médico oftalmólogo ni optometrista. Es habitual que en los primeros pasos de una investigación, especialmente si esta está basada en animales, no se necesite todavía la colaboración del personal sanitario, que siempre será requerido cuando haya que hacer pruebas médicas sobre pacientes.

#### Ejemplo 7. Oftalmología en colaboración con otras especialidades médicas

- *Ejemplo basado en la publicación científica (64):* Vanhonselbrouck E, Consejo A, Coucke PJ, Leroy BP, Kreps EO. *The corneoscleral shape in Marfan syndrome*. *Acta Ophthalmologica*. 2020; doi.org/10.1111/aos.14636



**Figura 22.** Gráfico que diferencia el perfil corneoescleral de los pacientes Marfan en comparación con los controles emétopes y miopes. (Fuente propia, Imagen tomada de la publicación: Vanhosebrouck E, Consejo A, Coucke PJ, Leroy BP, Kreps EO. The corneoescleral shape in Marfan syndrome. Acta Ophthalmologica. 2020; doi.org/10.1111/aos.14636).

- **Breve descripción del trabajo:** El síndrome de Marfan (MFS) es un trastorno genético del tejido conectivo, afecta al organismo humano en su conjunto. En este caso, los investigadores decidieron estudiar la morfometría de la cornea y la esclera de pacientes MFS y compararlos con un grupo control. Para la realización de este trabajo los oftalmólogos implicados necesitaron apoyarse en médicos genetistas y también en personal técnico especializado en el análisis de datos, como muestra la Figura 22. Es habitual que los médicos oftalmólogos complementen su trabajo con el de profesionales diestros en el manejo e interpretación de resultados numéricos. Aunque un experto en estadística parece la opción más apropiada, en la práctica, tal vez porque no existen demasiados expertos en estadística en comparación con otras especialidades, esta carencia la suplen físicos, matemáticos o casi cualquier tipo de ingeniero. En resumidas cuentas, casi cualquier profesional que está acostumbrado a tratar con números.

**Contexto internacional**

Hoy en día la investigación tiene un marcado carácter internacional. Según un reciente informe de la *Fundación Nacional de Ciencias de Estados Unidos* (NSF), entre 2000 y 2013, el porcentaje de publicaciones con autores de varios países aumentó del 13.2% al 19.2%, y es una tendencia al alza (65). Dicho informe sirve como recurso para que los legisladores y las agencias federales comprendan las tendencias mundiales en la investigación y cómo encaja Estados Unidos en ellas. El último par de indicadores ha documentado en términos crudos cómo los países asiáticos, en particular China, han aumentado drásticamente en su producción de estudiantes y publicaciones en los campos de la ciencia y la ingeniería.

Las colaboraciones internacionales van en aumento, y es más probable que los científicos de países más pequeños colaboren con autores extranjeros que los de países más grandes. En 2016, poco más de la mitad de los artículos de ciencia e ingeniería de instituciones del Reino Unido incluían un coautor internacional; para Estados Unidos, la cifra fue de aproximadamente un tercio y China, aproximadamente el 15%.

Diferentes países mostraron diferentes propensiones a la coautoría con otros. Dentro de la Unión Europea, el Reino

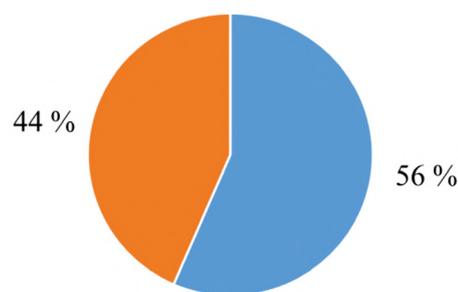
Unido, Francia y Alemania tuvieron los porcentajes más altos de colaboración internacional en general. Los autores estadounidenses colaboraron con mayor frecuencia con autores de China, en comparación con otros países. Y los científicos de China y Canadá fueron coautores con científicos estadounidenses a un ritmo más alto de lo que se esperaría de sus otras asociaciones internacionales.

Para discernir las tendencias entre países, el informe de la NSF estudió casi 2.2 millones de artículos revisados por pares publicados en 2013. De ellos, 412.542 (18.8%) procedían de Estados Unidos y 401.435 (18.2%) de China. Considerados como un bloque, los países de la UE siguen liderando la producción mundial total de publicaciones, produciendo el 27.5% de todas las publicaciones.

El informe de indicadores de 2016 cambió las métricas con las que mide las publicaciones. En lugar de utilizar el índice de citas científicas de Thomson Reuters y el índice de citas de ciencias sociales, la NSF utilizó la base de datos Scopus de Elsevier. El cambio se realizó para tratar de obtener una visión más precisa de las tendencias globales.

Estos indicadores afectan a todas las ramas de estudio, en consecuencia, las ciencias de la visión no son ajenas a esta internalización. De los 23 jóvenes investigadores encues-

¿Realizó su tesis doctoral fuera de su país de origen?



- No, realicé mi doctorado en mi país de origen
- Sí, realicé mi doctorado en un país diferente a mi país de origen

**Figura 23.** Gráfico circular que muestra el porcentaje de doctorandos en el campo de ciencias de la visión, que se desplazaron de su país de origen para la realización de su tesis doctoral (Fuente propia).

**Tabla 3.** Selección de consejos generales que según Brennan (66) garantizan el éxito en los comienzos de la carrera investigadora.

Regla para el investigador	Descripción
Encontrar un tema que le resulte interesante	Si el tema o proyecto de investigación no le parece atractivo de entrada, es probable que a menudo que pase el tiempo se potencie el rechazo.
Ser consciente de las habilidades personales y utilizarlas	Utilice su experiencia (por ejemplo, dominio de otro idioma, acceso a datos, experiencia metodológica, etc.) con fines de investigación. Sea oportunista. (Al mismo tiempo que sale de tu zona de confort y desarrollando su experiencia).
Ser responsable del propio proyecto de investigación	No culpe a su supervisor / coautores / revisores / editores. Cada individuo es responsable de su propio proyecto de investigación.
Elegir un nicho concreto de trabajo	Es importante pensar en su posicionamiento en la literatura, es decir, las publicaciones científicas ya existentes. Se recomienda elegir de dos a cinco áreas, al menos una de las cuales debe ser popular en la disciplina.
Desarrollar objetivos de publicación	Puede resultar motivador tener objetivos cuantificados, como número de artículos de revista a publicar al año en una revista de una cierta calidad especificada.
Documentar y organizar de antemano sus proyectos de investigación en forma de tareas.	Identificar proyectos de principio a fin, en términos de etapas e hitos que alcanzar antes de llegar a la terminación del proyecto.
Aprender a hacer malabares con la investigación y otras demandas	Los investigadores productivos se entrenan para hacer su investigación mientras tener que lidiar con otros aspectos de su trabajo, como puede ser dar clases en la universidad o atender pacientes en un entorno clínico.
Contar con el apoyo de un colega crítico	Antes de enviar su trabajo de investigación a revisar, es bueno contar con el apoyo de un amigo crítico que ofrezca retroalimentación (y viceversa). Además, si el inglés no es su primer idioma, un amigo crítico de habla inglesa nativa es ventajoso
Asegurar la financiación	Tanto la financiación propia (sueldo) como la financiación necesaria para llevar a cabo del proyecto de investigación (materiales, equipamiento, ...). Es importante conocer los recursos disponibles y anticiparse a la escasez de los mismos.

**Tabla 4.** Conjunto de pautas o recomendaciones para el éxito en los primeros pasos en la investigación en ciencias de la visión (Fuente propia).

Recomendación	Descripción
Asegurar los primeros pasos en el campo de estudio (ciencias de la visión) – anatomía y fisiología ocular	Antes de adentrarse en un determinado proyecto de investigación es importante tener un conocimiento básico sobre el campo de estudio. Por ejemplo, para un físico o ingeniero que nada sabe de anatomía, pero va a realizar su proyecto entorno al ojo humano o la visión sería recomendable estudiar el funcionamiento más básico del ojo, así como las partes que lo componen. El conocimiento irá creciendo con la experiencia, pero es importante comenzar sobre una base, sencilla pero sólida.
Adelantarse a las necesidades del proyecto	Más allá de tener un conocimiento global base del campo de estudio, es recomendable anticipar el conocimiento preciso que va a requerir un cierto proyecto. En este contexto, es recomendable realizar un curso de especialización en los primeros meses del proyecto, ya sea de un saber técnico (e.g., aprendizaje automático aplicado a imágenes biológicas) como un saber más clínico (e.g., adaptación de un determinado tipo de lentes de contacto).
Rodearse de buenos profesionales	Tan importante es estar en un buen entorno de trabajo como entender que, dada la muy posible naturaleza multidisciplinar del proyecto, sea necesario contar con el apoyo de otros profesionales fuera del campo de experiencia de uno mismo. Por ejemplo, un médico oftalmólogo que desee embarcarse en un proyecto de investigación muy probablemente necesite el contacto de algún profesional que pueda ayudarle con los cálculos y el análisis pormenorizado de los datos.
Conocimiento del material y equipamiento disponible	Para fomentar la creatividad y no plantear ideas irreales de realizar, es recomendable ser consciente de las posibilidades existentes. Para ello, el supervisor o un compañero experimentado deberían guiar al investigador novel en las instalaciones reparando sobre los detalles de qué material está disponible o las posibilidades, si las hubiese, de adquirir nuevo material o instrumentación.

tados casi la mitad de ellos (10 de un total de 23) realizó su tesis doctoral en un país diferente a su país de origen, como muestra la Figura 23.

### **Recomendaciones para el investigador joven en la investigación en ciencias de la visión**

En la Tabla 3 se lista un conjunto de consejos o recomendaciones generales para todo investigador, según Brennan (66). Esta lista es una selección de la enumeración

original que se extiende a un total de cien puntos a tener en cuenta. En una línea similar, la Tabla 4, describe un conjunto de pautas o recomendaciones para el éxito en los primeros pasos en la investigación en ciencias de la visión.

## CONCLUSIONES

El estudio del ojo humano y, en general, las ciencias de la visión, son una rama del conocimiento de un marcado carácter multidisciplinar. En este trabajo de desarrollo se ha descrito y ejemplificado dicha multidisciplinariedad, puntualizando los beneficios y dificultades asociados a la misma.

Para la realización de este trabajo de desarrollo se ha contado con la colaboración desinteresada de un total de 23 jóvenes investigadores de diferentes nacionalidades, que han terminado recientemente su tesis doctoral en un tema relacionado con la visión. La totalidad de ellos estaban de acuerdo en el carácter multidisciplinar de las ciencias de la visión. La mayoría considera el trabajar con profesionales de otro campo como algo positivo, una forma de avanzar más rápido y mejor en la investigación, otros consideran que la multidisciplinariedad, aunque deseable ralentiza el trabajo y puede ser fuente de conflicto. Ninguno de los encuestados ha demostrado un claro rechazo o desagrado a trabajar con profesionales de un campo de conocimiento diferente al propio.

Aunque la oftalmología es la indiscutible ciencia base en lo que al estudio del ojo y la visión se refiere, se apoya en muchas otras ramas del conocimiento para avanzar en los retos de investigación aun hoy en día existentes, que se listan a continuación:

1. Mejorar la detección temprana de enfermedades y patologías oculares.
2. Investigar modalidades de tratamiento innovadoras, así como evaluar de forma objetiva el progreso de una determinada dolencia.
3. Avances quirúrgicos que minimicen los efectos secundarios y mejoren la calidad de vida del paciente.

Oftalmólogos, optometristas, físicos, ingenieros, químicos, biólogos, farmacéuticos ... Son solo algunos de los profesionales trabajando en el intrincado mundo del ojo humano.

## BIBLIOGRAFÍA

**NOTA: Las referencias señaladas en negrita son co-autorizadas por la autora del presente trabajo de desarrollo.**

1. Freddo TF, Chaum E. Anatomy of the eye and orbit: the clinical essentials. Lippincott Williams & Wilkins. 2017 May 17.
2. Jiang D, Zheng Z, Li G, Sun Y, Kong J, Jiang G, Xiong H, Tao B, Xu S, Yu H, Liu H. Gesture recognition based on binocular vision. Cluster Computing. 2019 Nov 1;22(6):13261-71.
3. **Consejo A, Llorens-Quintana C, Bartuzel MM, Iskander DR, Rozema JJ. Rotation asymmetry of the human sclera. Acta ophthalmologica. 2019 Mar;97(2):e266-70.**
4. Garaszczuk IK & Iskander DR. Qualitative assessment of tear dynamics with fluorescein profilometry. Contact Lens and Anterior Eye. 2017, 40(4), 208-212.
5. Mousavi M, Jesus DA, Garaszczuk IK, Szczesna-Iskander DH, & Iskander DR. The utility of measuring tear film break-up time for prescribing contact lenses. Contact Lens and Anterior Eye. 2018, 41(1), 105-109.
6. Garaszczuk IK, Montes Mico R., Iskander DR, Cerriño-Expósito A. The tear turnover and tear clearance tests. Expert review of medical devices. 2018, 15(3), 219-229
7. Martinez-Enriquez E, Pérez-Merino P, Velasco-Ocana M, Marcos S. OCT-based full crystalline lens shape change during accommodation in vivo. Biomedical optics express. 2017 Feb 1;8(2):918-33.
8. Kim YK, Moon SY, Yim KM, Seong SJ, Hwang JY, Park SP. Psychological distress in patients with symptomatic vitreous floaters. Journal of ophthalmology. 2017 Dec 10;2017.
9. Morgan IG, French AN, Ashby RS, Guo X, Ding X, He M, Rose KA. The epidemics of myopia: aetiology and prevention. Progress in retinal and eye research. 2018 Jan 1;62:134-49.
10. Loffredo L, Pacella F, Pacella E, Tiscione G, Oliva A, Violi F. Conjunctivitis and COVID-19: a meta-analysis. Journal of medical virology. 2020 Apr 24.
11. Talib M, van Schooneveld MJ, van Duuren RJ, Van Cauwenbergh C, Jacqueline B, De Baere E, Florijn RJ, Schalijs-Delfos NE, Leroy BP, Bergen AA, Boon CJ. Long-Term Follow-Up of Retinal Degenerations Associated With LRAT Mutations and Their Comparability to Phenotypes Associated With RPE65 Mutations. Translational vision science & technology. 2019 Jul 1;8(4).
12. Naessens S, De Zaeytijd J, Syx D, Vandenbroucke RE, Smeets F, Van Cauwenbergh C, Leroy BP, Peelman F, Coppieters F. The N-terminal p.(Ser38Cys) TIMP3 mutation underlying Sorsby fundus dystrophy is a founder mutation disrupting an intramolecular disulfide bond. Human mutation. 2019 May;40(5):539-51.
13. Del Pozo-Valero M, Martin-Merida I, Jimenez-Rolando B, Arteché A, Avila-Fernandez A, Blanco-Kelly F, Riveiro-Alvarez R, Van Cauwenbergh C, De Baere E, Rivolta C, Garcia-Sandoval B. Expanded phenotypic spectrum of retinopathies associated with autosomal recessive and dominant mutations in PROM1. American journal of ophthalmology. 2019 May 24.
14. Bauwens M, Garanto A, Sangermano R, Naessens S, Weisschuh N, De Zaeytijd J, Khan M, Sadler F, Balikova I, Van Cauwenbergh C, Rosseel T, Bau-

- wens J, De Leeneer K, De Jaegere S, Van Lathem T, De Vries M, Carss K, Arno G, Fakin A, Webster AR, de Ravel de l'Argentièrè TJL, Sznajer Y, Vuylsteke M, Kohm S; Wissinger B, Cherry T, Collin RWJ, Cremers FPM, Leroy BP, De Baere E. ABCA4-associated disease as a model for missing heritability in autosomal recessive disorders: novel noncoding splice, cis-regulatory, structural, and recurrent hypomorphic variants. *Genetics in Medicine*. 2019 Jan 23:1.
15. Fricke TR, Tahhan N, Resnikoff S, Papas E, Burnett A, Ho SM, Naduvilath T, Naidoo KS. Global prevalence of presbyopia and vision impairment from uncorrected presbyopia: systematic review, meta-analysis, and modelling. *Ophthalmology*. 2018 Oct 1;125(10):1492-9.
  - 16. Consejo A, Radhakrishnan H, Iskander DR. Scleral changes with accommodation. Ophthalmic and Physiological Optics. 2017 May;37(3):263-74.**
  17. Garaszczuk IK, Mousavi M, Szczesna-Iskander DH, Cerviño A, Iskander DR. A (2020) 12-month Prospective Study of Tear Osmolarity in Contact Lens Wearers Refitted with Daily Disposable Soft Contact Lenses. *Optometry and Vision Science*, 97(3), 178-185.
  18. Garaszczuk I. K., Mousavi M, Cerviño-Expósito A, Bartuzel MM, Montes-Micó R, & Iskander DR (2018). Evaluating tear clearance rate with optical coherence tomography. *Contact Lens and Anterior Eye*, 41(1), 54-59.
  19. Alba-Bueno F, Garzón N, Vega F, Poyales F, Millán MS. Patient-perceived and laboratory-measured halos associated with diffractive bifocal and trifocal intraocular lenses. *Current eye research*. 2018 Jan 2;43(1):35-42.
  20. Millán MS, Vega F, Alba-Bueno F, Ríos-López I. Optical imaging properties of multifocal IOL. *Acta Ophthalmologica*. 2016 Oct;94.
  21. Jiménez-García M, Dhubghaill N, Koppen C, Varsano D, Rozema JJ. Baseline Findings in the Retrospective Digital Computer Analysis of Keratoconus Evolution (REDCAKE) Project. *Cornea*. 2020 Jun 10.
  22. Kreps EO, Jimenez-Garcia M, Issarti I, Claerhout I, Koppen C, Rozema JJ. Repeatability of the Pentacam HR in Various Grades of Keratoconus. *American journal of ophthalmology*. 2020 Nov 1;219:154-62.
  - 23. Van Nuffel S, Consejo A, Koppen C, Kreps EO. The corneoscleral shape in keratoconus patients with and without specialty lens wear. Contact Lens and Anterior Eye. 2020 Jun 8.**
  24. Gupta A, Ruminski D, Jiménez-Villar A, Duarte-Toledo R, Manzanera S, Panzari S, Mompeán J, Artal P, Grulkowski I. In vivo SS-OCT imaging of crystalline lens sutures. *Biomed. Opt. Express*, 2020, 11: 5388-540
  25. Day AC, Gore DM, Bunce C, Evans JR. Laser-assisted cataract surgery versus standard ultrasound phacoemulsification cataract surgery. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2016(7).
  26. Wiggs JL, Pasquale LR. Genetics of glaucoma. *Human molecular genetics*. 2017 Aug 1;26(R1):R21-7.
  27. Vinod K, Gedde SJ, Feuer WJ, Panarelli JF, Chang TC, Chen PP, Parrish RK. Practice preferences for glaucoma surgery: a survey of the American Glaucoma Society. *Journal of glaucoma*. 2017 Aug;26(8):687.
  28. Duh EJ, Sun JK, Stitt AW. Diabetic retinopathy: current understanding, mechanisms, and treatment strategies. *JCI insight*. 2017 Jul 20;2(14).
  29. Solomon SD, Chew E, Duh EJ, Sobrin L, Sun JK, VanderBeek BL, Wykoff CC, Gardner TW. Diabetic retinopathy: a position statement by the American Diabetes Association. *Diabetes care*. 2017 Mar 1;40(3):412-8.
  30. Mitchell P, Liew G, Gopinath B, Wong TY. Age-related macular degeneration. *The Lancet*. 2018 Sep 29;392(10153):1147-59.
  31. Colijn JM, Buitendijk GH, Prokofyeva E, Alves D, Cachulo ML, Khawaja AP, Cougnard-Gregoire A, Merle BM, Korb C, Erke MG, Bron A. Prevalence of age-related macular degeneration in Europe: the past and the future. *Ophthalmology*. 2017 Dec 1;124(12):1753-63.
  32. Tsou BC, Bressler NM. Visual acuity reporting in clinical research publications. *JAMA ophthalmology*. 2017 Jun 1;135(6):651-3.
  33. Martínez-González EA, Alba A, Méndez MO, Fernández-Wong J. Developing a visual perimetry test based on eye-tracking: proof of concept. *Health and Technology*. 2020 Mar;10(2):437-41.
  34. da Mata Oliveira M, Hagemann LA, Kronbauer AL, Oliveira MM. Mobile campimetry. *Computers & Graphics*. 2018 Nov 1;76:153-66.
  35. van den Berg TJ. Intraocular light scatter, reflections, fluorescence and absorption: what we see in the slit lamp. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 2018 Jan;38(1):6-25.
  36. Laursen JV, Jeppesen P, Olsen T. Precision of 5 different keratometry devices. *International ophthalmology*. 2016 Feb 1;36(1):17-20.
  37. Fan R, Chan TC, Prakash G, Jhanji V. Applications of corneal topography and tomography: a review. *Clinical & experimental ophthalmology*. 2018 Mar;46(2):133-46.
  - 38. Iskander DR, Wachel P, Simpson PN, Consejo A, Jesus DA. Principles of operation, accuracy and precision of an Eye Surface Profiler. Ophthalmic and Physiological Optics. 2016 May;36(3):266-78.**

39. Kouchaki B, Hashemi H, Yekta A. Comparison of current tonometry techniques in measurement of intraocular pressure. *Journal of current ophthalmology*. 2017 Jun 1;29(2):92-7.
40. Jiménez-Villar A, Mączyńska E, Cichański A, Wojtkowski M, Kałużny BJ, Grulkowski I. High-speed OCT-based ocular biometer combined with an air-puff system for determination of induced retraction-free eye dynamics. *Biomed. Opt. Express*. 2019; 10: 3663-3680
41. Maczynska E, Rzeszewska-Zamiara J, Jimenez Villar A, Wojtkowski M, Kaluzny BJ, Grulkowski I. Air-Puff-Induced Dynamics of Ocular Components Measured with Optical Biometry. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci*. 2019;60(6):1979-1986.
- 42. Jiménez-García M, Dhubhghaill N, Consejo A, Hershko S, Koppen C, Rozema JJ. Scheimpflug Densitometry in Keratoconus: A New Method of Visualizing the Cone. *Cornea*. 2020 Oct 15.**
- 43. Consejo A, Solarski J, Karnowski K, Rozema JJ, Wojtkowski M, Iskander DR. Keratoconus detection based on a single scheimpflug image. *Translational Vision Science & Technology*. 2020 Jun 3;9(7):36-.**
- 44. Consejo A, Gławdecka K, Karnowski K, Solarski J, Rozema JJ, Wojtkowski M, Iskander DR. Corneal Properties of Keratoconus Based on Scheimpflug Light Intensity Distribution. *Investigative ophthalmology & visual science*. 2019 Jul 1;60(8):3197-203.**
45. Schröder S, Mäurer S, Eppig T, Seitz B, Rubly K, Langenbucher A. Comparison of corneal tomography: repeatability, precision, misalignment, mean elevation, and mean pachymetry. *Current eye research*. 2018 Jun 3;43(6):709-16.
46. Hoffer KJ, Savini G. Effect of gender and race on ocular biometry. *International Ophthalmology Clinics*. 2017 Jul 1;57(3):137-42.
47. Wu AR, Fouzdar-Jain S, Suh DW. Comparison study of funduscopic examination using a smartphone-based digital ophthalmoscope and the direct ophthalmoscope. *Journal of pediatric ophthalmology and strabismus*. 2018 May 29;55(3):201-6.
48. González S, Lozano C, González S, González P, Castillo C, Fernández M, Barral FJ, Espinosa JR P. Assessment of the use of retinography as a screening method for the early diagnosis of chronic glaucoma in Primary Care: Validation for screening in populations with open-angle glaucoma risk factors. *Atencion Primaria*. 2017 Jan 23;49(7):399-406.
49. Durbin MK, An L, Shemonski ND, Soares M, Santos T, Lopes M, Neves C, Cunha-Vaz J. Quantification of retinal microvascular density in optical coherence tomographic angiography images in diabetic retinopathy. *JAMA ophthalmology*. 2017 Apr 1;135(4):370-6.
50. Rapolu M, Niedźwiedziuk P, Borycki D, Wnuk P, Wojtkowski M. Enhancing microvasculature maps for Optical Coherence Tomography Angiography (OCT-A). *Photonics Letters of Poland*. 2018 Oct 1;10(3):61-3.
51. Munk MR, Giannakaki-Zimmermann H, Berger L, Huf W, Ebnetter A, Wolf S, Zinkernagel MS. OCT-angiography: A qualitative and quantitative comparison of 4 OCT-A devices. *PloS one*. 2017 May 10;12(5):e0177059.
52. De Boer JF, Leitgeb R, Wojtkowski M. Twenty-five years of optical coherence tomography: the paradigm shift in sensitivity and speed provided by Fourier domain OCT. *Biomedical optics express*. 2017 Jul 1;8(7):3248-80.
53. Wojtkowski M, Stremplewski P, Aukorius E, Borycki D. Spatio-Temporal Optical Coherence Imaging—a new tool for in vivo microscopy. *Photonics Letters of Poland*. 2019 Jul 1;11(2):44-9.
54. Heidary F, Gharebaghi R. Significance of Novel Ideas to Solve Challenges Facing Today's Ophthalmology. *Medical Hypothesis, Discovery and Innovation in Ophthalmology*. 2012;1(2):19.
55. Panorama de la educación. Indicadores de la OCDE 2017. Informe Español. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte (<https://www.educacionyfp.gob.es/dctm/inee/eag/2017/panorama-de-la-educacion-2017-def-12-09-2017red.pdf?documentId=0901e72b8263e12d>; acceso el 08/12/2020)
56. Levecque K, Anseel F, De Beuckelaer A, Van der Heyden J, Gisle L. Work organization and mental health problems in PhD students. *Research Policy*. 2017 May 1;46(4):868-79.
57. Lee, You-Na, John P. Walsh, and Jian Wang. 2015. Creativity in scientific teams: Unpacking novelty and impact. *Research Policy* 44 (3): 684-97.
58. Goh, Joel, Jeffrey Pfeffer, Stefanos A. Zenios, and Sachin Rajpal. 2015. Workplace stressors & health outcomes: Health policy for the workplace. *Behavioral Science & Policy* 1 (1): 43-52.
- 59. Consejo A, Iskander DR. Corneo-scleral limbus demarcation from 3D height data. *Contact Lens and Anterior Eye*. 2016; 39(6): 450-457**
60. Bartuzel MM, Wróbel K, Tamborski S, Meina M, Nowakowski M, Dalasiński K, Szkulmowska A, Szkulmowski M. High-resolution, ultrafast, wide-field retinal eye-tracking for enhanced quantification of fixational and saccadic motion. *Biomedical Optics Express*. 2020 Jun 1;11(6):3164-80
- 61. Behaegel J, Consejo A, Wouters K, Koppen C, De Cock J, Ní Dhubhghaill S. Development and validation of an open-source grading tool for outcome assessment in limbal stem cell treatment. *Cornea*. 2020; 39(6):787-792**

62. Issarti I, Consejo A, Jiménez-García M, Kreps EO, Koppen C, Rozema JJ. Logistic index for keratoconus detection and severity scoring (Logik). *Computers in Biology and Medicine*. 2020; 122: 103809
63. Bertolin M, Breda C, Ferrari S, Van Acker SI, Zakaria N, Di Iorio E, et al. Optimized Protocol for Regeneration of the Conjunctival Epithelium Using the Cell Suspension Technique. *Cornea*. 2019;38(4):469-79
64. Vanhosebrouck E, Consejo A, Coucke PJ, Leroy BP, Kreps EO. The corneoscleral shape in Marfan

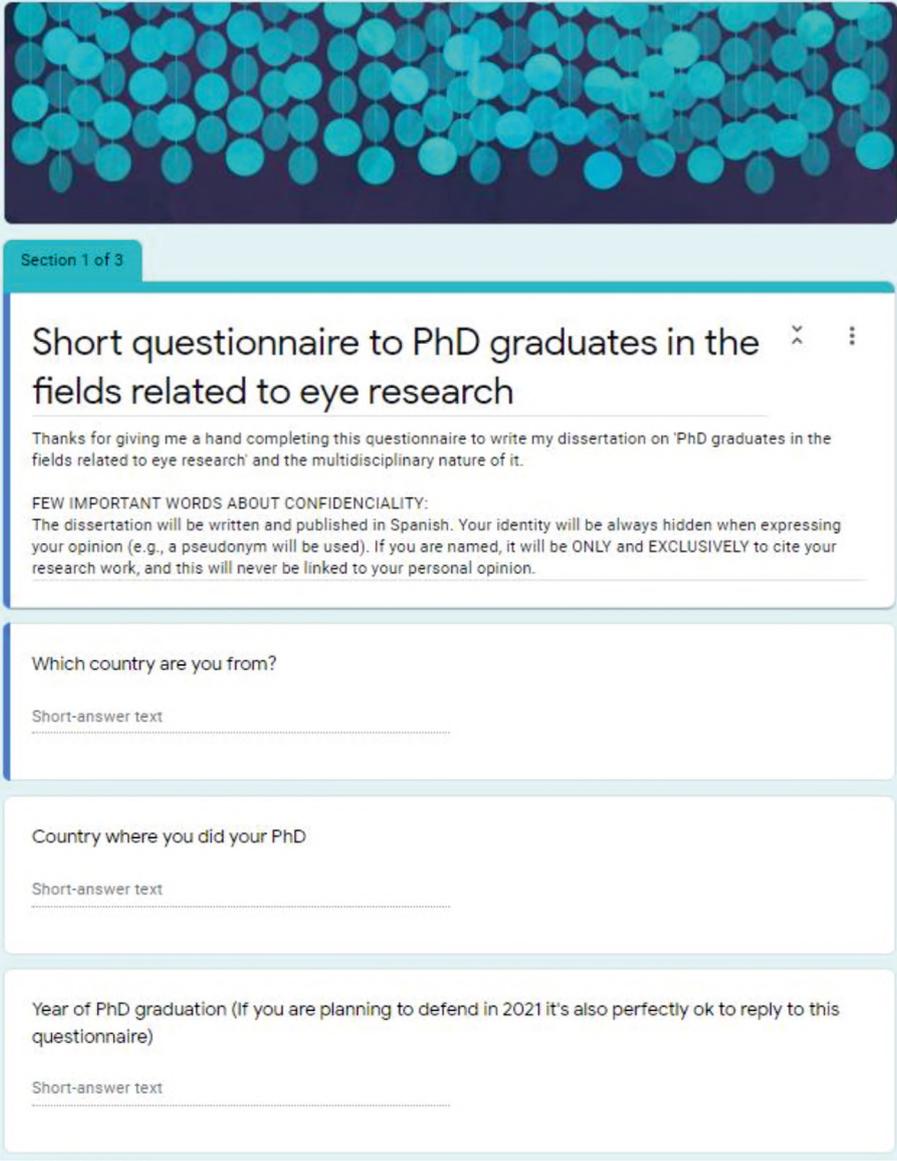
syndrome. *Acta Ophthalmologica*. 2020; doi.org/10.1111/aos.14636

65. Witze A. Research gets increasingly international. *Nature News*. 2016 Jan 19.
66. Brennan NM. 100 research rules of the game: How to make your research world class; how to successfully publish in top international refereed journals. *Accounting, Auditing & Accountability Journal*. 2019 Feb 18.

## ANEXO 1

En este anexo se presenta la encuesta contestada por los 23 jóvenes investigadores en el campo de ciencias de la visión. La mayoría de las preguntas cuentan con una opción 'otros' donde el encuestado puede expresar libremente su opinión

más allá de las opciones predefinidas, por este motivo este cuestionario tiene un carácter más de entrevista que de encuesta al uso. El documento está escrito en inglés, ya que fue distribuido y contestado por profesionales no exclusivamente hispanoparlantes.



Section 1 of 3

### Short questionnaire to PhD graduates in the fields related to eye research

Thanks for giving me a hand completing this questionnaire to write my dissertation on 'PhD graduates in the fields related to eye research' and the multidisciplinary nature of it.

**FEW IMPORTANT WORDS ABOUT CONFIDENTIALITY:**  
The dissertation will be written and published in Spanish. Your identity will be always hidden when expressing your opinion (e.g., a pseudonym will be used). If you are named, it will be ONLY and EXCLUSIVELY to cite your research work, and this will never be linked to your personal opinion.

Which country are you from?  
Short-answer text

Country where you did your PhD  
Short-answer text

Year of PhD graduation (If you are planning to defend in 2021 it's also perfectly ok to reply to this questionnaire)  
Short-answer text

Education (select the field of your bachelor and/or master)

- I'm a Medical Doctor
- I'm an Optometrist
- I'm a Physicist
- I'm an Optical Engineer
- I'm a Biomedical Engineer
- I'm a Mathematician
- I'm a Biologist
- Other...

Select your main field of study (if you have a hard time choosing, you can select more than one)

- Ophthalmology
- Optometry
- Optics (Physics)
- Biomedical Engineering
- Other...

Do you consider that 'Eye research' is a multidisciplinary branch of knowledge?

- Yes
- No
- Not sure

Do you consider your PhD thesis of multidisciplinary nature?

- Yes
- No
- Not sure

Describe in 2-3 lines what is your research is about. If possible, please highlight the multidisciplinary nature of it.

Long-answer text

What kind of professionals, from outside your area of expertise, do you collaborate with?

- With ophthalmologists
- With optometrists
- With physicists
- With engineers
- With biologists
- With chemists
- With mathematicians
- With statisticians
- Other...

How often do you collaborate with professionals with different areas of expertise than yours?

Always

Very often

Sometimes

Rarely

Other...

Why did you choose to join 'eye research'? If you wish, use the option 'other' to better express your opinion

I always found it interesting

Now it's the eye, but it could be any other thing, I don't mind changing

It was by chance, but I liked it and I decided to stay in the branch

There are a lot of job opportunities in this area (or more than in other areas, at least)

Other...

La segunda parte del cuestionario está orientada sobre la experiencia personal del doctorado encuestado en la realización de su tesis, y su experiencia sobre la dimensión multidisciplinaria del campo de estudio.

## About your PhD

This section focuses on your PhD experience and its multidisciplinary nature (if applicable)

Did you have any struggle when doing your PhD? (you can select as many as you want). Please, use the option 'other' to express your opinion

Yes, I had problems especially in the beginning of my studies, because I was new to the field

Yes, I had issues of personal nature (e.g., hard time in my personal life; I suffered from anxiety, loneliness, i...

Yes, I struggled with my supervisor(s)

Yes, I had recurrent 'technical' difficulties (lack of knowledge or 'know-how')

Yes, my research got stuck at some point (e.g., not finding publishable results, having a scientific problem ...

Yes, as a professional, I was not exclusively devoted to my PhD so it was hard to find time to manage ever...

Yes, I had economical difficulties to support my living while doing the PhD

Not really, it went pretty smooth

Other...

(Reply only if you consider your PhD to be of multidisciplinary nature) In your opinion, the difficulties you had while doing your PhD had anything to do with its multidisciplinary nature?

Definitely yes

Partially yes

I don't think so

Not sure

Other...

What are the largest challenges to work in a multidisciplinary team or to collaborate with professionals outside your area of expertise? You can mark as many as you want and use the option 'other' to express your opinion

- To find a common language with other professionals that do not share the same area of expertise
- It's difficult to find common interests with other professionals outside my main area of research
- It's very time consuming
- Too many 'egos' tend to make it difficult to advance
- I have the feeling that others have difficulties to appreciate my part of the job (as they took it as trivial or t...
- Other...

Do you consider that collaborating with a multidisciplinary team makes it easier or more complicated for young researchers? Please, use the option 'other' to express your opinion

- Easier
- More difficult
- Other...

Do you enjoy collaborating with people outside your area of expertise? Please, use the option 'other' to express your opinion

- Definitely, in my experience, when collaborating with professionals outside my area of expertise research d...
- Yes, in my experience, when collaborating with professionals outside my area of expertise research develo...
- Not sure, depends on the situation
- Not much, but I have no choice
- Not much, I try to avoid it, it mostly slows things down and it's difficult to get to a 'common language' with ...
- Other...