

UNIVERSIDAD DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

Estudio de la óptica ocular del bovino de Lidia.
Un modelo animal de ojo con tolerancia al desenfoque

D. Raúl Duarte Toledo
2020

UNIVERSIDAD DE
MURCIA



Departamento de Física

Laboratorio de Óptica

**ESTUDIO DE LA ÓPTICA OCULAR DEL
BOVINO DE LIDIA. UN MODELO ANIMAL DE
OJO CON TOLERANCIA AL DESENFQUE**

Trabajo presentado por:

Raúl Duarte Toledo

para aspirar al grado de Doctor por la Universidad de Murcia

Doctorado en Ciencias de la Visión

Universidad de Murcia

Julio 2020



UNIVERSIDAD DE
MURCIA

D. Juan Manuel Bueno García, Catedrático de Universidad del Área de Óptica en el Departamento de Física, AUTORIZA:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada "ESTUDIO DE LA ÓPTICA OCULAR DEL BOVINO DE LIDIA. UN MODELO ANIMAL DE OJO CON TOLERANCIA AL DESENFQUE", realizada por D. Raúl Duarte Toledo, bajo mi inmediata dirección y supervisión, y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad de Murcia.

En Murcia, a 21 de Julio de 2020

Los ojos de vidrio de la cabeza del toro muerto me observan al salir, los ojos lánguidos de Manolete me siguen mientras me alejo. Camino de salida tropiezo con los ojos pequeños y tristes del anciano Hemingway. A todos nos llega la decadencia, papáito. Qué lejos quedan los días [...] en que eras un vigoroso grandullón pletórico de talento literario.

El sonido de la noche (Xavier B. Fernández, 2010)

A mi abuelo Manuel.

Resumen

El ojo del bovino es un modelo usado de forma habitual en entornos académicos, fundamentalmente en clases de anatomía ocular de niveles medios de enseñanza, pues el tamaño de sus componentes fisiológicos hace que éstos se puedan identificar y manipular fácilmente. Sin embargo, a diferencia de otros modelos animales de mamíferos o incluso de aves, hay escasez de análisis detallados no sólo sobre su morfología, sino sobre la propia óptica y los aspectos que relacionan a ésta con la función visual.

El bovino es un animal con un globo ocular que presenta características similares a las que en los humanos se corresponden con la presbicia. Su acomodación es prácticamente nula y en general es hipermetrope, por lo que aparentemente no tendría capacidad de ver de cerca. Sin embargo, es un hecho palpable que el animal es capaz de realizar tareas a distancias cortas, así como responder a estímulos lejanos. Es por ello que en esta Tesis Doctoral se ha llevado a cabo un análisis detallado desde el punto de vista óptico de la córnea y el cristalino del ojo del bovino (así como de la combinación de éstos para formar un sistema completo). El estudio de la geometría y propiedades ópticas de los elementos oculares ayudará a entender cómo la configuración natural de ojo del bovino podrían compensar la falta de acomodación y contribuir a que el animal “pueda ver” a distintas distancias.

Como modelo se ha utilizado el ojo del toro de lidia, por ser éste un animal criado en condiciones de ganadería extensiva (espacios abiertos), sin apenas contacto humano, con un control estricto de la edad, y cuya visión es esencial para que su comportamiento durante el desarrollo de la lidia sea óptimo.

Para el estudio del cristalino se ha construido un sistema experimental que registra imágenes de sombra y a partir de las cuales se ha calculado la geometría de las superficies. El análisis de la superficie anterior de la córnea se ha realizado con un topógrafo comercial. Se ha implementado un método de trazado de rayos con el que a partir de los datos geométricos se calculan las aberraciones de dichos elementos por separado y en conjunto (sistema acoplado córnea-cristalino).

Los resultados muestran que los radios de curvatura de las superficies de ambos elementos oculares tienden a aplanarse con la edad. El espesor de cristalino también aumenta debido al crecimiento del globo ocular. La córnea tiene un meridiano horizontal más plano que el vertical. Además, la asfericidad del cristalino es fundamentalmente positiva (oblata),

mientras que la de la córnea es negativa (prolata). Las aberraciones dominantes son el astigmatismo y la aberración esférica. La refracción ocular es mayor en el meridiano horizontal que en el vertical, siendo ambos hipermétropes en la mayoría de casos estudiados.

Además, la presencia de una pupila elíptica (en lugar de una circular) hace que la aberración esférica ocular total sea notablemente mayor, hecho que va estrechamente ligado a un aumento de la profundidad de foco. Finalmente se ha comprobado que con el desenfoque, la imagen retiniana se degrada en mayor medida con una pupila circular que con una elíptica equivalente. Este incremento de la tolerancia al desenfoque en el ojo del bovino se podría interpretar como una herramienta natural que tendería a compensar, al menos parcialmente, su marcada presbicia.

Abstract

The bovine is an animal model often used for academic purposes, in particular during ocular anatomy teaching classes of intermediate levels. Due to the size of the eye, the different physiological elements can be easily manipulated and identified. However, unlike other mammal or bird eye models, existing literature hardly provides accurate details on the bovine's ocular optics or data about the visual function.

The ocular globe of bovine animals presents a property similar to that known as presbyopia in humans. Accommodation is almost absent and the refractive state is, in general, hyperopic. This implies an overall lack of (or reduced) capacity to see objects up close. However, it is known that these animals are able to respond to stimuli located at both far and closer distances. In this sense, the present PhD Thesis is centered on the detailed optical analysis of the cornea and the crystalline lens of the bovine eye (as well as the combination of both physiological components in a unique optical system). The study of the geometry and optical properties of both ocular components will help to understand how the natural configuration of the eye of the bovine might (partially) compensate for the lack of accommodation and contribute to an improved vision of objects placed at different distances.

Along this work, the eye of the fighting bull has been used as a model. This is a particular bovine breed (known as "toro bravo" in Spanish) bred free range on extensive farms (i.e. open-air facilities), with minimum human contact and a very strict age control, which visual function is one of the keys for an optimized performance during the fight ("lidia") at the arena face to face with the "torero" or bullfighter.

In order to study the lens, an instrument based on a shadow photography technique has been developed. From the acquired images the geometry of the anterior and posterior surfaces was determined. A commercial topographer was used to explore the corneal first surface. A ray-tracing procedure was implemented to calculate the aberrations of those individual components and the combination of both as a whole optical system.

Results show that the radii of curvature of the lens surfaces as well as the thickness increase with age as a result of a general change in size of the ocular globe. The horizontal meridian of the cornea is flatter than the vertical one. In addition, whereas lens asphericity is mainly positive (oblate), that of the cornea is strongly negative (prolate). The dominant

aberrations are astigmatism and spherical aberration. Ocular refraction is larger along the horizontal meridian than the vertical meridian, being both hyperopic in most cases.

Moreover, the presence of an elliptical-shaped pupil (instead of a circular one) leads to a noticeable higher contribution of spherical aberration within the whole eye. This is closely associated with an increase in depth of focus. As defocus is increased (i.e. objects are located closer to the eye), the retinal image for an elliptical pupil degrades at a lower ratio than that corresponding to an equivalent circular pupil. Thus, this increasing tolerance to defocus might be interpreted as a natural tool of the bovine eye to partially compensate a markedly presbyopia.

Índice

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Estructuras del globo ocular del bovino y comparación con el ojo humano | 4 |
| 1.1.1. Córnea | 5 |
| 1.1.2. Cámara anterior, iris y pupila | 7 |
| 1.1.3. Cristalino | 8 |
| 1.1.4. Cuerpo vítreo y retina | 11 |
| 1.2. Potencia ocular y refracción | 12 |
| 1.2.1. Cálculo de la potencia de los elementos oculares | 12 |
| 1.2.2. Refracción | 14 |
| 1.3. Cónicas: Definición | 16 |
| 1.4. Aberraciones | 18 |
| 1.4.1. Algunos datos sobre aberraciones oculares | 19 |
| 1.5. Acoplamiento córnea-cristalino | 21 |
| 1.6. Objetivos y estructura del trabajo | 22 |
| 2. Material y métodos | 23 |
| 2.1. Sistema y procedimiento experimental para el cristalino | 26 |
| 2.1.1. Muestras: Extracción de los cristalinos | 26 |
| 2.1.2. Sistema experimental para imágenes de sombra | 28 |
| 2.1.3. Procesado digital de las imágenes de retro-iluminación | 29 |
| 2.1.4. Calibrado del sistema experimental | 31 |
| 2.1.5. Trazado de rayos y cálculo de aberraciones | 33 |
| 2.1.5.1. Astigmatismo | 33 |
| 2.1.5.2. Aberración esférica | 34 |
| 2.2. Sistema y procedimiento experimental para la córnea | 37 |
| 2.2.1. Muestras | 37 |
| 2.2.2. Sistema experimental para el registro de topografías corneales | 38 |
| 2.2.3. Trazado de rayos y cálculo de aberraciones | 41 |
| 2.3. Combinación córnea-cristalino: Procedimiento para modelar el ojo completo | 42 |
| 2.3.1. Trazado de rayos: cálculo de aberraciones y refracción ocular | 43 |
| 2.3.2. Pupila circular vs. pupila elíptica | 46 |
| 2.3.3. Ángulo de incidencia de la luz | 47 |
| 2.3.4. Profundidad de foco | 48 |
| 3. Resultados I. Cristalino del Toro de Lidia | 49 |
| 3.1. Geometría del cristalino | 51 |
| 3.1.1. Radios, espesor y potencia | 51 |
| 3.1.2. Asfericidad | 54 |
| 3.1.3. Radios y asfericidades máximos y mínimos | 56 |
| 3.2. Aberraciones | 58 |
| 3.2.1. Aberraciones de bajo orden: Astigmatismo | 58 |
| 3.2.2. Aberraciones de alto orden: Aberración esférica | 60 |
| 3.3. Discusión | 62 |

| | |
|--|------------|
| 4. Resultados II. Córnea del Toro de Lidia | 67 |
| 4.1. Geometría de la córnea | 69 |
| 4.1.1. Radios y potencia | 69 |
| 4.1.2. Asfericidad | 71 |
| 4.1.3. Radios y asfericidades máximos y mínimos | 72 |
| 4.2. Aberraciones | 73 |
| 4.2.1. Variabilidad experimental | 73 |
| 4.2.2. RMS total y edad | 75 |
| 4.2.3. Astigmatismo corneal | 75 |
| 4.2.4. Aberración esférica corneal | 77 |
| 4.3. Discusión | 78 |
| | |
| 5. Resultados III. Combinación de córnea y cristalino | 83 |
| 5.1. Orientación relativa córnea-cristalino: minimización del astigmatismo | 85 |
| 5.2. Aberración esférica del ojo completo | 87 |
| 5.2.1. Dependencia con la edad y el tamaño de pupila | 87 |
| 5.2.2. Efecto sobre la aberración esférica de una pupila elíptica | 88 |
| 5.2.3. Aberración esférica, ángulo de incidencia y forma de pupila | 89 |
| 5.2.4. Efecto de la asfericidad sobre la aberración esférica | 90 |
| 5.3. Refracción ocular | 92 |
| 5.3.1. Esfera equivalente y astigmatismo | 92 |
| 5.3.2. Refracción ocular, ángulo de incidencia y forma de la pupila | 95 |
| 5.4. Profundidad de foco | 97 |
| 5.5. Discusión | 103 |
| 5.5.1. Orientación relativa córnea-cristalino | 103 |
| 5.5.2. Aberración esférica | 103 |
| 5.5.3. Refracción ocular | 105 |
| 5.5.4. Profundidad de foco | 107 |
| 5.5.5. Algunos comentarios finales sobre pupilas horizontales | 109 |
| | |
| 6. Conclusiones | 111 |
| | |
| Bibliografía | 117 |
| | |
| Agradecimientos | 125 |

Introducción



CAPÍTULO 1

Introducción

En este capítulo se hace un repaso de las estructuras básicas del ojo del bovino tanto desde el punto de vista anatómico como óptico. Se describirá la geometría (radios de curvatura y/o dimensiones) de dichas estructuras (córnea, cámara anterior, cristalino y cuerpo vítreo) y se aportarán datos bibliográficos sobre los diferentes índices de refracción. En la medida de lo posible se establecerán comparaciones de estos valores con los del ojo humano, por ser éste uno de los más estudiados. Tomando como base la Óptica Geométrica se revisará el método para el cálculo de la potencia de los diferentes elementos oculares y del ojo completo como sistema óptico. También se explicarán los conceptos de refracción ocular y ametropía.

Se repasarán los conceptos de cónicas y aberraciones ópticas, que serán muy útiles para el estudio geométrico y óptico de los distintos elementos oculares, y para el análisis de cómo contribuyen éstos a la refracción ocular. Se darán unas nociones sobre las aberraciones de alto orden (concretamente la aberración esférica) del cristalino y se comparará con la del ojo humano y la de otros animales. El capítulo seguirá con unas nociones sobre el acoplamiento córnea/cristalino, para terminar con el apartado donde se presenta la motivación y los objetivos de esta Tesis Doctoral.

1.1. Estructuras del globo ocular del bovino y comparación con el ojo humano

El sistema visual del bovino, y el ojo en particular, tiene numerosas peculiaridades que lo diferencian del humano, a pesar de que ambos constan básicamente de las mismas estructuras anatómicas (Figura 1.1).

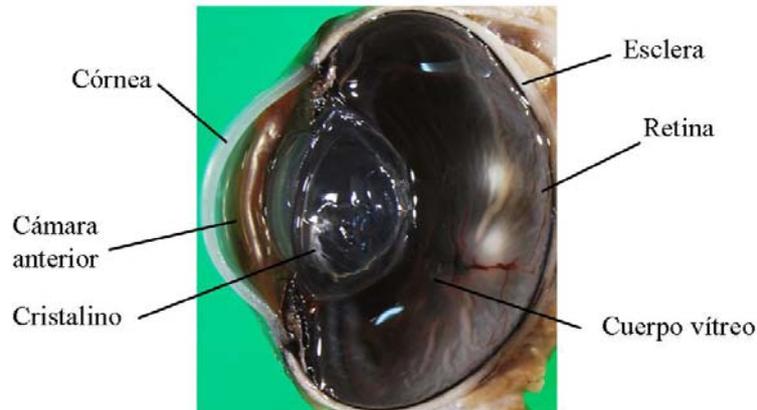


Figura 1.1. Corte sagital del globo ocular del toro de lidia y sus componentes (cortesía del Prof. Juan Seva, Facultad de Veterinaria, Universidad de Murcia).

El globo ocular del bovino tiene un mayor tamaño que el del humano. La longitud axial del bovino (distancia entre la primera superficie de la córnea y la retina) está en un rango entre 31.3 y 36 mm [Prince et al., 1960; El-Maghraby et al., 1995; Samuelson, 1999; Potter et al., 2008]. En la mayoría de las publicaciones no se especifica la edad de los animales o simplemente se alude a que son adultos. Sin embargo, es bien sabido que el globo ocular aumenta de tamaño. En un estudio más reciente se ha medido dicho parámetro en el ojo del bovino de lidia en función de la edad encontrándose que pasa de 31.58 mm a los 18 meses a 35.58 mm a los 63 meses [Lo Sapio, 2015].

En el ojo humano, dicha longitud axial toma valores entre 21.25 y 23.75 mm [Cumming and Ritter, 1994; Zamir et al., 2016]. Medidas más precisas realizadas con ultrasonidos la sitúan en el rango 22.14-23.40 mm [Storey and Rabie, 1985]. En el caso del humano el tamaño va aumentando hasta los 20 años, pasando de los 22.11 mm en la primera década de vida hasta los 23.33 mm en la segunda. A partir de los 30 años y hasta los 40, la longitud axial decrece levemente hasta situarse en torno a 22.85 mm, para llegar a los 22.66 mm entre los 41 y 60 años [Bhardwaj and Rajeshbhai, 2013].

1.1.1. Córnea

La córnea es la lente fisiológica convexo-cóncava situada en la parte anterior del globo ocular, que en el caso del bovino es más rígida y prominente. Se considera una continuación de la esclerótica (capa opaca más externa del ojo que cubre la mayor parte del mismo y donde se insertan los músculos oculares), pero transparente y con un radio de curvatura menor que hace que sobresalga (véase Figura 1.1). Dicha transparencia se debe entre otras razones a la ausencia de vasos sanguíneos, pues es un tejido avascular. Esta estructura ocular está formada por 5 capas, que de la más externa a la más interna son: epitelio, membrana de Bowman, estroma (~90% del espesor corneal), membrana de Descemet y endotelio [Colicchia and Wiesner, 2015]. Junto con el cristalino son los dos componentes ópticos del ojo encargados de enfocar la luz sobre la retina.

La vista frontal de la córnea del bovino muestra que ésta no es circular, sino ovalada, con su eje horizontal mayor que el vertical (Figura 1.2a). Las dimensiones oscilan entre 28.5-31.1 mm en la dirección horizontal, y 22.4-25.4 mm en la vertical [Sisson et al., 1975; Doughty et al., 1995].

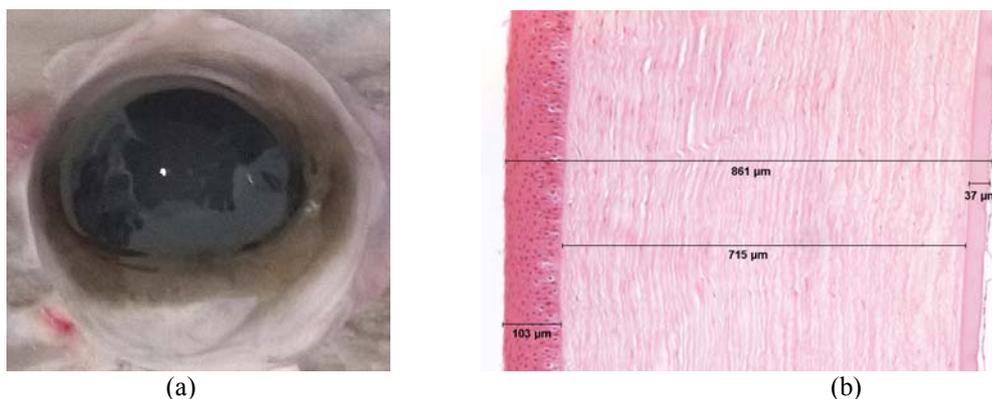


Figura 1.2. Imagen frontal de un globo ocular (a) y corte histológico de una córnea (b). Ambos corresponden a un bovino de lidia. La Figura 1.2b es cortesía del Prof. Juan Seva de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Murcia.

El espesor central de la córnea del bovino varía entre 0.75 y 2 mm según diferentes fuentes consultadas [Prince et al., 1960; Potter et al., 2008]. Comparaciones entre medidas histológicas y con ultrasonidos muestran pequeñas diferencias (1.4 mm frente a 1.1 mm, respectivamente [El-Maghraby et al., 1995]). Hacia la periferia el espesor aumenta, situándose entre 1.5 y 1.8 mm [Sisson et al., 1975; Samuelson, 1999]. Un ejemplo de un corte histológico de la córnea de bovino se muestra en la Figura 1.2b.

Comparado con el humano, el espesor de la córnea del bovino es claramente mayor. En humanos el espesor corneal central aumenta hasta los 3 años de edad, momento en el que alcanza valores de córnea adulta [Ehlers et al., 1976], los cuales están entre 0.51 y 0.57 mm

[Siu and Herse, 1993; Yaylali et al., 1997; Eysteinnsson et al., 2002; Mashige, 2013]. La variabilidad en los datos depende del método utilizado, yendo de 23 μm en medidas hechas con un topógrafo (Orbican), a 28 μm en las realizadas con paquimetría ultrasónica [Yaylali et al., 1997]. Hacia la periferia el espesor también aumenta, situándose entre 0.68 y 0.73 mm [Martola and Baum, 1968; Mashige, 2013]. A partir de los 60 años de edad, el espesor corneal en la periferia disminuye hasta llegar a valores similares a los del espesor central en torno a los 80-90 años [Mashige, 2013].

La forma de la córnea del bovino no es esférica. El radio corneal de la cara anterior en la dirección horizontal es mayor (más plano) que en la dirección vertical, concretamente 16.8 mm frente a 14.7 mm [Sisson et al., 1975]. No se han encontrado medidas directas del radio de curvatura de la cara posterior, aunque un modelo de ojo publicado estima que sería de 15 mm [Coile and O'Keefe, 1988]. Desde el punto de vista óptico, esta segunda superficie de la córnea es poco relevante debido a su reducido poder refractivo. La curvatura corneal se mantiene gracias a la presión que ejerce el humor acuoso, que llena tanto la cámara anterior como la cámara posterior del ojo [Sisson et al., 1975]. En cuanto a la asfericidad de la córnea del bovino, no se han encontrado datos bibliográficos (véase apartado 1.3 para el concepto de asfericidad).

Los radios corneales del ojo humano son claramente menores que los del bovino. Éstos se sitúan entre 7.62 y 7.93 mm en la cara anterior, mientras que en la cara posterior están entre 7.67 y 8.03 mm [Eysteinnsson et al., 2002; Reuland et al., 2007; Gamba et al., 2013; Mashige, 2013; Zamir et al., 2016]. Medidas queratométricas arrojan valores entre 7.33 y 8.25 mm [Storey and Rabie, 1985]. La comparación de los valores obtenidos con el biómetro IOL Master y el Pentacam (instrumento basado en una cámara de Scheimpflug) no muestra diferencias en el radio posterior, pero sí en el anterior (0.03 mm) [Reuland et al., 2007].

La asfericidad de la cara anterior de la córnea humana tiene un valor de -0.28 ± 0.18 para una pupila de 3 mm, manteniendo casi el mismo valor (-0.29 ± 0.18) para una pupila de 7 mm. En la cara posterior el valor es de -0.26 ± 0.216 para una pupila de 3 mm y mantiene el mismo valor para una pupila de 7 mm (-0.26 ± 0.215) [Xiong et al., 2017].

En la córnea humana no se producen cambios significativos en los radios de curvatura hasta la edad adulta [Fledelius and Stubgaard, 1986]. Concretamente entre los 40 y los 64 años se produce un aumento de la curvatura central y un aplanamiento de la curvatura periférica, creciendo la asfericidad corneal en 0.15 ± 0.14 en el caso de la cara anterior y en 0.09 ± 0.14 en la posterior [Hashemi et al., 2015].

El índice de refracción del epitelio corneal del ojo del bovino varía entre 1.376 en el centro, 1.3757 en la zona nasal y 1.3746 en la zona temporal [Vasudevan et al., 2008]. Por su parte, el del estroma se estima que se sitúa entre 1.3708 y 1.3767, siendo ligeramente superior en la parte anterior comparado con la parte posterior [Patel et al., 2004; Vasudevan et al., 2008]. En el caso de la córnea humana el índice de refracción del estroma es similar al del bovino: entre 1.372 y 1.380, siendo ligeramente mayor en el centro que en la periferia [Patel et al., 1995; Patel et al., 2004; Vasudevan et al., 2004].

1.1.2. Cámara anterior, iris y pupila

La cámara anterior es el espacio situado en la parte anterior del iris, que separa la córnea del cristalino y contiene el humor acuoso. Dicho humor, formado por agua y proteínas, presenta un índice de refracción de 1.3339 en el ojo del bovino [Hrachovina, 1967] y de 1.336 en el humano [Hecht, 2017].

Debido al mayor tamaño del globo ocular del bovino con respecto al humano, resulta lógico que los tamaños de la cámara anterior también difieran. En el bovino ésta tiene una profundidad de 6.2 mm, aunque algunos estudios la estiman en 3.3 mm [Sisson et al., 1975; El-Maghraby et al., 1995; Potter et al., 2008], valores claramente diferentes.

Por su parte, en el ojo humano la profundidad de la cámara anterior tiene un valor medio de 3.20 mm medida con el biómetro IOL Master y de 3.25 mm cuando se midió con el Pentacam [Reuland et al., 2007]. Los valores fueron de 2.99 mm cuando se usaron ultrasonidos y 3.17 mm para medidas paquimétricas [Hoffer and Savini, 2015]. En otro estudio con ultrasonidos el espesor se situó entre 3.08 y 3.70 mm [Storey and Rabie, 1985]. Con un método de registro digital de imágenes, los valores (excluyendo el espesor corneal) se situaron entre 2.53-2.62 mm [Zamir et al., 2016]. El tamaño de la cámara anterior decrece ligeramente con la edad, pasando de 3.19 mm entre los 0 y 10 años, hasta unos valores en torno a 2.75 mm a partir de los 41 años [Bhardwaj and Rajeshbhai, 2013].

Por otro lado, el iris es un diafragma situado entre la córnea y el cristalino, que está bañado por el humor acuoso tanto en su parte anterior (cámara anterior) como en su parte posterior (cámara posterior, que comprende el pequeño espacio que hay entre el iris y el cristalino). Su abertura central es la pupila. La función principal del iris es regular el paso de luz mediante la modificación del tamaño pupilar por contracción o dilatación de los músculos que lo componen [Sisson et al., 1975].

La pupila del bovino tiene forma ovalada, siendo su eje horizontal mayor que su eje vertical (Figura 1.3). En condiciones mesópicas tiene unas dimensiones de 9-11 mm en su dirección vertical y 14-17 mm en su dirección horizontal [Taninura, 1977; Aly, 2003]. Su forma tiende a ser circular con la dilatación.

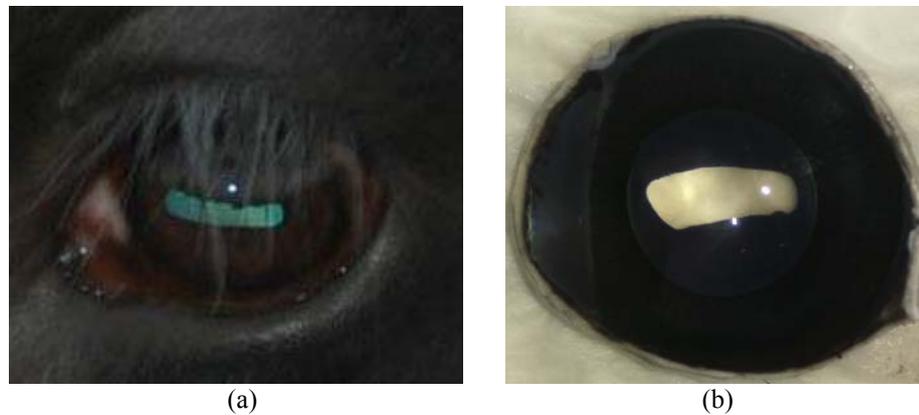


Figura 1.3. Iris de un ojo de bovino de lidia en vivo (a) y en condiciones post-mortem (b) donde se puede apreciar su forma ovalada. La foto de la izquierda es cortesía del Prof. Juan Seva (Facultad de Veterinaria, Universidad de Murcia).

La pupila del ojo humano es circular y en condiciones de alta iluminación (fotópicas) su diámetro se sitúa entre 2 y 4 mm, mientras que en condiciones de baja iluminación (escotópicas) la pupila puede tener entre 4 y 8 mm de diámetro [James and Benjamin, 2006]. El tamaño pupilar también se ve afectado por la acomodación, concretamente la pupila del ojo humano tiene un diámetro de 2-3 mm cuando el ojo está acomodado, frente a los 7-9 mm del ojo desacomodado [Schachar et al., 1996].

1.1.3. Cristalino

El cristalino es la segunda lente natural del ojo, tiene forma biconvexa y está envuelto en una membrana transparente denominada cápsula. Se encuentra situado detrás del iris, separando el humor vítreo de la porción anterior del globo ocular. Carece de inervación y gracias a la distribución regular de sus fibras posee una gran transparencia (Figura 1.4). Contiene una alta concentración de proteínas, llamadas cristalinas, y se nutre principalmente a través del humor acuoso [Moreno y de la Torre, 2001].

Su función es la acomodación, es decir enfocar objetos a distintas distancias. Dicho enfoque se lleva a cabo por medio de los músculos ciliares cuya contracción produce una distensión de la zónula (fibras que sujetan el cristalino) produciendo un aumento de la curvatura y del espesor del cristalino, que se traduce en un aumento de su potencia. En el bovino se estima que la acomodación del cristalino es mínima o inexistente [Prince et al.,

1960; Sivak, 1980; Baldwin, 1981], debido probablemente a un desarrollo no completo de los músculos ciliares [Glasser and Kaufman, 2003]. El diámetro ecuatorial del cristalino del bovino tiene unos valores que oscilan entre 17.75 y 18.70 mm [Sisson et al., 1975].

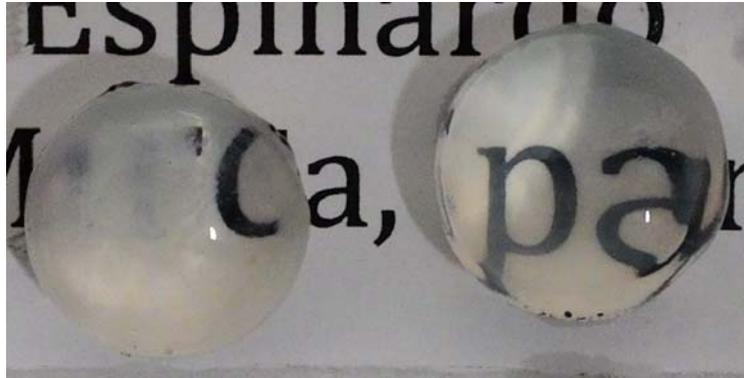


Figura 1.4. Ejemplos de cristalinos de bovino de lidia. La transparencia y el aumento de imagen que produce por el hecho de ser una lente positiva se puede apreciar en el de la derecha. El de la izquierda presenta una catarata y por tanto su transparencia se ve claramente reducida.

A diferencia del bovino, en el ojo humano, la acomodación tiene una función relevante en el sistema visual. La forma del cristalino es casi esférica en recién nacidos. Con el crecimiento del ojo, el diámetro ecuatorial del cristalino va aumentando debido a la adición de nuevas fibras cristalinas. Medidas con ultrasonidos han mostrado que dicho diámetro se sitúa entre 9.22 y 10.08 mm. Con la acomodación el diámetro ecuatorial del cristalino humano decrece pasando de 9.59 mm desacomodado a 8.96 mm con 8 D de acomodación [Storey and Rabie, 1985; Khan et al., 2018].

El cristalino del bovino tiene un espesor entre 11.3 y 14.88 mm (dependiendo del estudio consultado) [Prince et al., 1960; El-Maghraby et al., 1995; Samuelson, 1999]. Otros estudios muestran valores superiores, concretamente entre 17.8 y 19.2 mm [Potter et al., 2008].

En el caso del humano, el espesor es de 3.91 ± 0.16 mm a los 3 meses de edad. Éste va disminuyendo a razón de 50 micras cada año durante 10 años hasta alcanzar los 3.42 ± 0.16 mm. En la edad adulta el cristalino recupera espesor hasta los 40 años, momento en el que alcanza el espesor medido en la infancia (3.91 mm) [Richdale et al., 2008]. En medidas con ultrasonidos el espesor del cristalino humano adulto se sitúa entre 3.56 y 4.04 mm [Storey and Rabie, 1985]. Si se tiene en cuenta la acomodación, el espesor del cristalino humano pasa de 3.55 ± 0.21 mm desacomodado a 3.89 ± 0.21 mm al acomodar.

En cuanto a los radios de curvatura, el cristalino del bovino tiene 11.3 mm en la cara anterior y 9.7 mm en la posterior [Sisson et al., 1975]. Por su parte, y al igual que sucede con

la córnea, no se han encontrado datos sobre la asfericidad del cristalino del bovino en la literatura.

El cristalino humano presenta un radio en la cara anterior de 12.90 ± 0.64 mm y de 6.20 ± 0.59 mm en la cara posterior, en condiciones de no acomodación [Gambra et al., 2013]. Al igual que en el bovino, la primera cara es más plana que la segunda. Estudios comparativos entre la cámara de Scheimpflug y las imágenes de Purkinje dan unos resultados de 11.1 ± 1.1 mm y 10.8 ± 1.1 mm respectivamente para la cara anterior y de 6.1 ± 0.55 mm y 6.7 ± 0.8 mm respectivamente para la posterior [Rosales et al., 2006]. En función de la edad, el radio de la cara anterior del cristalino pasa de 15.98 mm a los 8 años, hasta los 8.26 mm a los 82 años [Brown, 1974]. Otro estudio determina que el radio de curvatura del cristalino varía de 11.988 mm a los 16 años en la cara anterior hasta los 9.195 mm a los 65 años, mientras que en la cara posterior pasa de 6.008 a 5.42 mm en ese mismo periodo [Dubbelman and van der Heijde, 2001]. A pesar de estas diferencias, los estudios coinciden en que a lo largo de la vida se produce un aumento de la curvatura en ambas superficies. En lo que respecta a la asfericidad, se ha reportado que ésta que no varía con la edad y es negativa en ambas superficies: -4 en la cara anterior y -3 en la cara posterior [Dubbelman and van der Heijde, 2001].

En el cristalino, el índice de refracción no es constante, sino que presenta un gradiente, con valores que en el bovino están entre 1.432 y 1.442 [Pierscionek, 1995]. Un modelo de ojo propone un valor para el índice de 1.527 [Coile and O'Keefe, 1988]. La literatura existente no reporta cambios con la edad.

El gradiente del índice de refracción en el cristalino humano pasa de 1.4181 ± 0.075 en el núcleo a 1.3709 ± 0.0039 en la periferia [Jones et al., 2005]. En otros estudios los cambios son de 1.4 a 1.36, y de 1.38 y 1.48 entre el núcleo y la periferia respectivamente [Freitas et al., 2013]. Además, este índice de refracción del cristalino humano es ligeramente superior en el polo anterior con respecto al polo posterior. En la edad adulta se mantiene prácticamente constante, siendo de 1.364 a los 27 años en el polo anterior y de 1.37 a los 61 años. En el polo posterior pasa de 1.357 a los 27 años a 1.35 a los 61 [Pierscionek, 1994]. Otros autores por el contrario sugieren que no hay cambios en el índice de refracción del cristalino humano con la edad [Pierscionek, 1997; Glasser and Campbell, 1999].

1.1.4. Cuerpo vítreo y retina

El cuerpo vítreo separa el cristalino de la retina y ocupa la mayor parte del globo ocular. Está formado por un gel compuesto principalmente por agua y proteínas, cuyo índice de refracción en el ojo del bovino es 1.3337 [Hrachovina, 1967], mientras que en el ojo humano tiene un índice de refracción de 1.337 [Hetch, 2017]. La longitud del cuerpo vítreo del bovino está entre 13.7 y 16.2 mm dependiendo de los autores [El-Maghraby et al., 1995; Potter et al., 2008]. En el humano los valores oscilan entre 14.17 y 16.89 mm [Cumming and Ritter, 1994].

La retina es la capa más interna del ojo y está conectada con el cerebro a través del nervio óptico que sale del globo ocular por su parte más posterior. Este nervio se aprecia como un área redondeada (papila óptica) a partir de la cual irradian los vasos sanguíneos (Figura 1.5). La función de la retina es transformar los impulsos luminosos que le llegan a través de los elementos refractivos oculares (córnea y cristalino), en señales eléctricas que son transmitidas al cerebro e interpretadas allí como un estímulo visual.

La retina está poblada por fotorreceptores (conos y bastones) que en el caso del bovino están dispuestos en una franja horizontal central (denominada *visual streak*) que se expande hasta la zona supero-nasal. La densidad de células fotorreceptoras se reduce significativamente (o incluso desaparece) en el resto de zonas superiores e inferiores de la retina [Sisson et al., 1975].

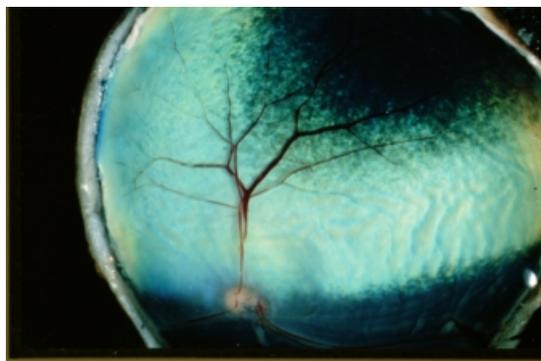


Figura 1.5. Fondo de ojo en un bovino (cortesía del Prof. J. M. Vázquez-Autón) donde se puede apreciar tanto la papila como la franja horizontal central.

En el caso de la retina humana, la zona más sensible de la retina es la mácula, en cuyo centro hay una depresión denominada fóvea, con forma redondeada. En la fóvea humana predominan los conos (células encargadas de la visión fotópica y del color) mientras que en el resto de la retina la densidad de conos disminuye y aumenta la de bastones (células encargadas de la visión escotópica y sensibles al movimiento).

1.2. Potencia ocular y refracción

La potencia dióptrica ocular se debe exclusivamente a los dos elementos refractivos del ojo (la córnea y el cristalino) y viene determinada por la geometría, los índices de refracción y la distancia entre las superficies. Aunque la bibliografía sobre la potencia ocular del bovino es escasa, ésta se sitúa en torno a 47.7 D, correspondiendo 21 D a la córnea y 33.4 D al cristalino [Coile and O’Keefe, 1988]. En el ojo humano, la córnea tiene una potencia aproximada de 40 D mientras que el cristalino tiene entre 15 y 22 D en estado desacomodado, y en torno a 33 D con máxima acomodación. El globo ocular humano en su conjunto tiene una potencia aproximada de 60 D [Palanker, 2013; He et al., 2017].

1.2.1. Cálculo de la potencia de los elementos oculares

Con los índices de refracción y la geometría de los elementos refractivos del ojo del bovino que aparecen en la literatura y se han expuesto en el apartado 1.1, se puede calcular la potencia de dichos elementos refractivos por separado y con ellos la potencia total del ojo.

| | Bovino | Humano |
|--------------------------------------|--|---------------|
| <i>Espesor corneal</i> | 1.31 | 0.54 |
| <i>Radio corneal anterior</i> | 16.80 (horizontal) 14.70 (vertical) | 7.78 |
| <i>Radio corneal posterior</i> | 15 | 7.85 |
| <i>Índice de la córnea</i> | 1.375 | 1.387 |
| <i>Espesor de la cámara anterior</i> | 4.75 | 3.23 |
| <i>Índice cámara anterior</i> | 1.334 | 1.336 |
| <i>Espesor del cristalino</i> | 13.09 | 3.70 |
| <i>Radio anterior cristalino</i> | 11.30 | 11.60 |
| <i>Radio posterior cristalino</i> | -9.70 | -6.33 |
| <i>Índice del cristalino</i> | 1.527 | 1.402 |
| <i>Longitud del cuerpo vítreo</i> | 14.95 | 15.53 |
| <i>Índice del cuerpo vítreo</i> | 1.334 | 1.337 |
| <i>Longitud axial</i> | 33.65 | 22.77 |

Tabla 1.1. Comparativa de los parámetros geométricos e índices de refracción del ojo del bovino con los del ojo humano. Las unidades de los radios y los espesores son mm.

Para conocer de forma aproximada las potencias individuales, a partir de los datos encontrados en la literatura se ha calculado el valor medio de los espesores, radios de curvatura e índices de la córnea y el cristalino. Dichos valores se muestran en la Tabla 1.1,

donde por motivos de comparación se han añadido también los valores medios del ojo humano.

Usando los valores de la Tabla 1.1, la potencia de las superficies anterior y posterior de la córnea y el cristalino se calculan usando la ecuación de un dioptrio esférico:

$$P = \frac{n' - n}{R} \quad (1.1)$$

donde n y n' son los índices de refracción a ambos lados de la superficie refractiva y R su radio de curvatura.

Las focales de cada superficie se calculan de forma sencilla a partir de la potencia del dioptrio, P , como:

$$f = \frac{-n}{P} \quad f' = \frac{n'}{P} \quad (1.2)$$

donde n y n' son los índices a ambos lados del dioptrio.

Conocida la potencia de las superficies que conforman cada elemento refractivo, P_1 y P_2 , la potencia total se obtiene considerándolo ópticamente como una lente gruesa:

$$P = P_1 + P_2 - \frac{e}{n_2} \cdot P_1 \cdot P_2 \quad (1.3)$$

siendo e es el espesor y n_2 es el índice de refracción del elemento refractivo considerado.

Para acoplar diferentes sistemas/elementos ópticos es necesario utilizar las expresiones de la Teoría General de Sistemas Ópticos. En particular, para la córnea, la ecuación (1.4) proporciona la posición de su plano principal imagen, H_{co}' , con respecto a la superficie posterior de ésta (H_2'), teniendo en cuenta que e es su espesor:

$$H_2' H_{co}' = \frac{e \cdot f_2'}{e - f_1' + f_2} \quad (1.4)$$

En esta expresión las focales con subíndices 1 y 2 se refieren a las superficies anterior y posterior respectivamente, y se calculan utilizando las ecuaciones (1.2), donde n_1' ($=n_2$) es el índice de la córnea y n_2' el del humor acuoso.

En el caso del plano principal objeto de la córnea, H_{co} , la distancia de éste a su superficie anterior (H_1) se obtendrá como:

$$H_1 H_{co} = \frac{e \cdot f_1}{e - f_1' + f_2} \quad (1.5)$$

donde ahora n_1 es el índice del aire, y $n_1' (=n_2)$ el de la córnea.

De forma similar se calcularían los planos principales para el cristalino, para finalmente, con la información de ambos elementos ópticos calcular la posición de los planos principales del ojo completo, utilizando de nuevo las mismas ecuaciones. En este caso del ojo completo, el parámetro e será la distancia entre el plano principal imagen de la córnea (H_{co}') y el plano principal objeto del cristalino (H_{cr}). Por su parte, las focales con subíndices 1 y 2 se refieren ahora a la córnea y al cristalino respectivamente. Así, ahora las ecuaciones quedarán como:

$$H_{co}'H_T = \frac{e \cdot f_{co}}{e - f_{co}' + f_{cr}} \quad H_{cr}'H_T' = \frac{e \cdot f_{cr}'}{e - f_{co}' + f_{cr}} \quad (1.6)$$

Puesto que la potencia de cada elemento individual es conocida, utilizando de nuevo la ecuación (1.3) podremos calcular finalmente la potencia total del ojo, P_T , donde el índice n_2 es el índice del humor acuoso y e , como se acaba de comentar, la distancia entre H_{co}' y H_{cr} .

Los resultados obtenidos, se representan en la Tabla 1.2 junto con los valores recogidos en la bibliografía para el caso del ojo humano. También se han añadido los cálculos para el ojo humano obtenidos por el mismo procedimiento descrito para el ojo del bovino (datos bibliográficos / datos calculados).

| | Bovino | Humano |
|--------------------------------|--|-------------------|
| Potencia corneal | 19.65 D (horizontal) 22.84 D (vertical) | ~ 40 D / 43.35 D |
| Potencia del cristalino | 34.03 D | 15-22 D / 15.83 D |
| Potencia ocular | 47.22 D (horizontal) 49.39 D (vertical) | ~ 60 D / 56.04 D |

Tabla 1.2. Potencia de los elementos refractivos del ojo por separado (córnea y cristalino) y del conjunto del ojo. Comparación entre humano y bovino. Debido a la forma de la córnea del bovino sus potencias corneal y ocular se han separado en horizontal y vertical.

1.2.2. Refracción

Las aberraciones ópticas son una forma de determinar la calidad de un sistema óptico (se verá en el apartado 1.4). Sin embargo es interesante referirnos a ellas en este apartado porque la refracción no es más que una forma de medir parte de las aberraciones ópticas (llamadas de bajo orden) en los sistemas ópticos. La refracción determina si un sistema óptico (el ojo en particular) focaliza correctamente la luz que lo atraviesa en el lugar adecuado (retina). Puesto que la distancia focal está relacionada con la potencia dióptrica se puede hablar también de que la óptica ocular tiene un exceso o un defecto de potencia. Si la luz focaliza correctamente

en la retina se dice que el ojo es emétrepe (existe un balance entre la potencia y la longitud axial). En caso contrario se dice que el ojo es amétrepe.

Si el foco del sistema ocular está antes de llegar a la retina, se habla de un ojo miope (exceso de potencia, normalmente sucede cuando el ojo crece más de lo deseado). Si el foco se sitúa detrás de la retina, el ojo es hipermétrope (defecto de potencia, suele suceder cuando el ojo es más corto de lo normal) (Figura 1.6).

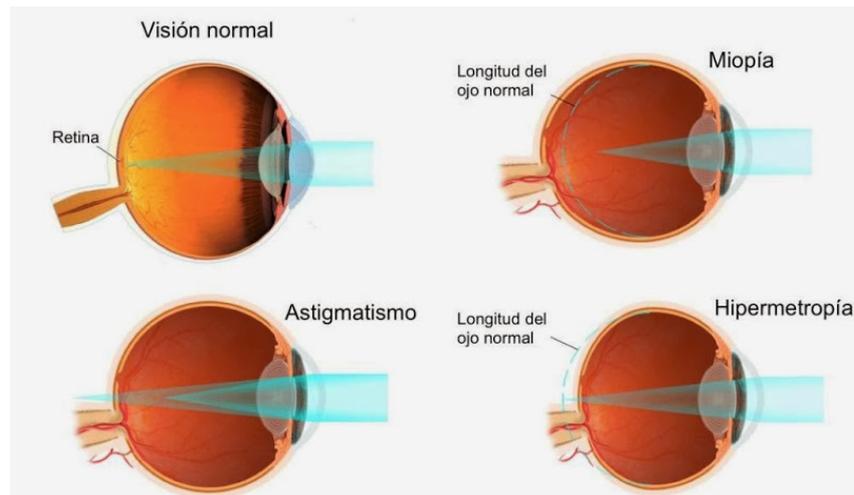


Figura 1.6. Ametropías oculares. Se puede apreciar cómo la luz que atraviesa el ojo focaliza en una posición distinta dependiendo del tipo de ametropía. En el caso del astigmatismo aparecen dos focos.

Cuando las superficies de la córnea y/o del cristalino no son esféricas sino que presentan una forma toroidal (dos radios de curvatura ligeramente distintos en una misma superficie que normalmente forman 90° uno con respecto al otro) se dice que hay astigmatismo. En lugar de un único foco aparecen dos (focos de Sturm), asociados a dos potencias oculares distintas. En un ojo astigmático puede suceder que ambas focales estén antes de la retina (astigmatismo miópico compuesto), que ambas se sitúen detrás (astigmatismo hipermetrópico compuesto) o que una de ellas caiga delante y la otra detrás (astigmatismo mixto) (Figura 1.6). También puede ocurrir que una de las focales caiga en retina y la otra, bien delante (astigmatismo miópico simple), bien detrás (astigmatismo hipermetrópico simple).

Por lo tanto, se puede decir que un ojo amétrepe es un sistema óptico que tiene una calidad óptica deficiente, entendida solamente desde el punto de vista del desenfoque. En términos sencillos, cuanto más alejada está la imagen de la retina, peor será la calidad óptica, o dicho de otra forma, cuanto mayor sea la diferencia entre la potencia real y la ideal, peor será la calidad óptica. Esta diferencia entre la potencia correcta (la de un ojo emétrepe) y la potencia real del ojo es lo que se denomina refracción.

En humanos, las ametropías se corrigen de forma habitual con lentes oftálmicas o lentes de contacto. Se usan lentes con potencia positiva para la corrección de la hipermetropía (pues la corrección compensa la falta de potencia o defecto de longitud axial). El ojo miope precisa de una lente negativa (debido a su exceso de potencia o longitud axial). Las lentes tóricas se usan en el caso de que exista astigmatismo. En este caso, cada una de las dos potencias principales podrá ser positiva, negativa o nula de manera independiente, con el objeto de corregir el tipo de astigmatismo presente.

1.3. Cónicas: Definición

Las superficies ópticas no siempre son perfectamente esféricas, es decir pueden presentar un radio de curvatura que no es constante en toda su extensión. Esta falta de esfericidad, conocida como asfericidad, viene acompañada por un cambio en la calidad óptica de dicha superficie.

La asfericidad se define a partir de las secciones cónicas. Conocer este concepto es importante puesto que a lo largo de este trabajo se va a determinar la geometría de las superficies de la córnea y del cristalino usando la definición de cónica. Una cónica es la curva que se produce al cortar un cono con un plano [Akopyan and Zaslavsky, 2007] (Figura 1.7). Dependiendo de la inclinación del plano se obtiene una cónica diferente:

- Plano paralelo a la base del cono: circunferencia.
- Plano paralelo a la generatriz del cono: parábola (la generatriz de un cono es la recta que une el vértice con la base pasando por su superficie).
- Plano situado entre las dos posiciones anteriores: elipse.
- Plano con una inclinación mayor que en el caso de la parábola con respecto al caso de la circunferencia: hipérbola.

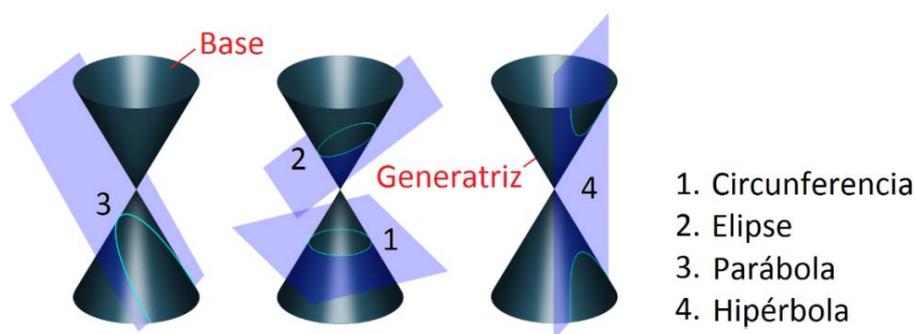


Figura 1.7. Cónicas obtenidas a partir de la sección plano-cono. En el caso de la hipérbola se cortan dos conos que comparten eje y están unidos por su vértice, de modo que se obtienen dos curvas simétricas entre sí.

Matemáticamente, las cónicas se rigen por la expresión:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} \quad (1.7)$$

donde:

- c es la curvatura, es decir, la inversa del radio de curvatura de la superficie, $c=1/R$ (no se debe confundir R con la coordenada polar r).
- k es la asfericidad de la superficie. La asfericidad indica si la curva se cierra, se abre o se mantiene constante conforme nos alejamos del vértice. Si la asfericidad es cero, se trata de una circunferencia (la curva se mantiene constante). Si la asfericidad es positiva (negativa) la curva se cierra (abre) al alejarse del vértice. Cada sección cónica tiene asignado un valor de asfericidad: circunferencia ($k=0$); elipse oblata ($k>0$); elipse prolata ($-1<k<0$); parábola ($k=-1$); hipérbola ($k<-1$). Una elipse oblata es una elipse que se cierra hacia su periferia, mientras que una elipse prolata es una elipse que se abre hacia su periferia.
- z y r son las posiciones de la curva en una gráfica. Asignando un valor constante al radio R y, por tanto, a la curvatura c , y cambiando el valor de asfericidad k , se obtienen las distintas cónicas al representar z en función de r . Es decir, para cada valor de r , se calcula la z correspondiente (Figura 1.8).

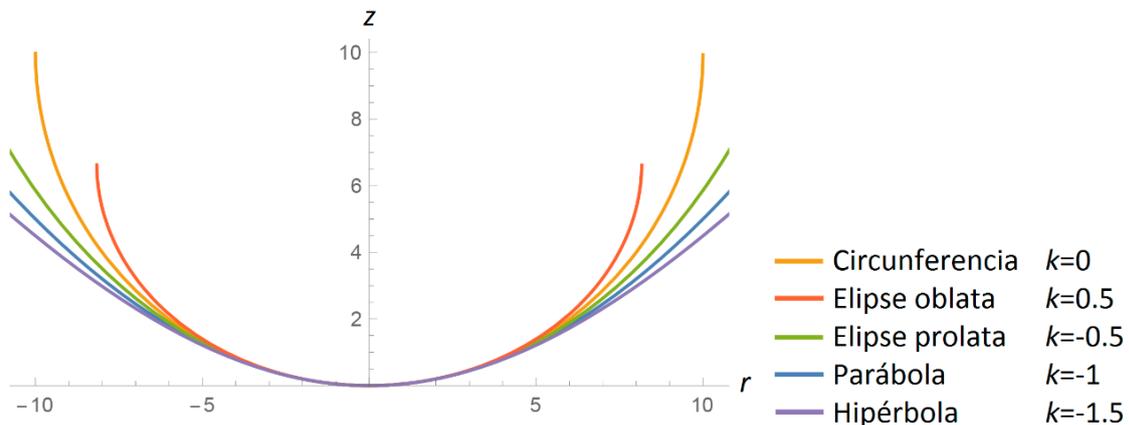


Figura 1.8. Representación de los distintos tipos de cónicas. El radio de curvatura utilizado es $R=10$; lo cual se aprecia en la circunferencia, pues la curva está siempre a 10 unidades de su centro. El vértice se corresponde con el valor $(0, 0)$ de la gráfica. Cada color se asocia con un valor de asfericidad (de rojo a violeta la asfericidad disminuye y, por tanto, la curva se abre más hacia la periferia).

1.4. Aberraciones

Para la correcta realización del estudio que aquí se plantea, es también necesario definir objetivamente el comportamiento de un sistema óptico. Para ello se suelen utilizar las aberraciones ópticas monocromáticas. Cuanto mayor sean las aberraciones, peor será la imagen que forma dicho sistema y, por tanto, peor su calidad óptica [Born et al., 1999]. Desde el punto de vista de la Óptica Fisiológica las aberraciones se suelen dividir en dos grupos: bajo orden y alto orden. Las aberraciones de bajo orden están asociadas a las ametropías más comunes, y que como ya se ha comentado, se pueden corregir con lentes oftálmicas: desenfoque (miopía e hipermetropía) y astigmatismo. Las de alto orden no se pueden medir ni corregir de manera tan sencilla [Lombardo and Lombardo, 2010].

La luz que atraviesa un sistema óptico lo hace de una manera determinada por la geometría de las superficies del sistema y los índices de refracción que separan dichas superficies. El frente de onda es una superficie imaginaria perpendicular en cada punto a la dirección de propagación de la luz (rayo). Así, el haz procedente del infinito tiene asociado un frente de onda plano. Si el haz es convergente, el frente de onda ideal será esférico y convergerá a un único punto (Figura 1.9a). Si el haz es aberrado (no es ideal), el foco no será un punto sino una mancha (Figura 1.9b).

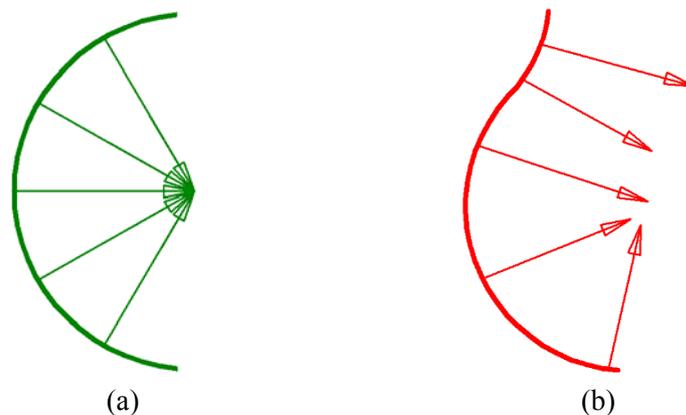


Figura 1.9. Frente de onda esférico ideal (a) y frente de onda aberrado (b). Mientras que el primero converge a un único punto, en el segundo cada zona del frente de onda iría a un sitio distinto, dando lugar a una mancha.

La aberración de onda se define como la diferencia de camino óptico punto a punto entre el frente de onda ideal y el real (Figura 1.10a). Habitualmente se mide en la posición de la pupila de salida del sistema bajo estudio. Una de las formas más habituales de representarlos es mediante un conjunto de polinomios denominados polinomios de Zernike [Noll, 1976] (Figura 1.10b). En esta base polinomial cada término representa una aberración definida, de modo que la combinación en serie de todos ellos da lugar a la aberración total. En

la mayor parte de este trabajo utilizaremos los términos que corresponden al desenfoque y el astigmatismo (fila 3ª, central y extremos respectivamente), así como la aberración esférica (mapa central de la 5ª fila). En los mapas de color la zona roja indica que el frente está adelantado con respecto al ideal y la zona azul que está retrasada. En verde se indica la zona donde ambos frentes de onda se solapan.

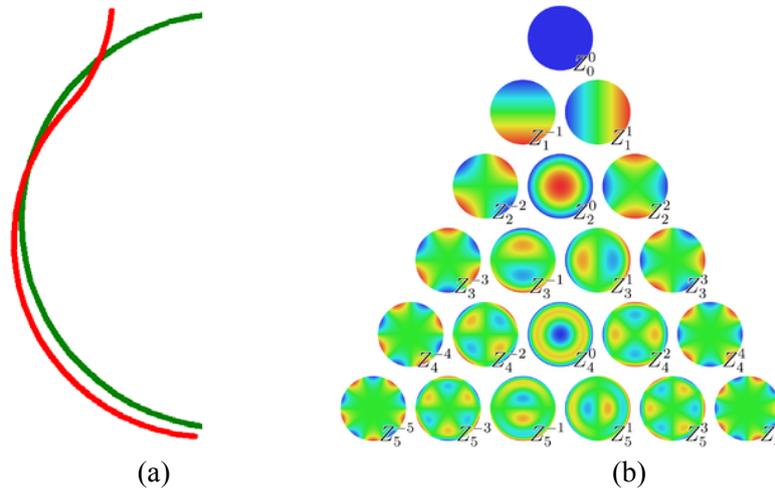


Figura 1.10. (a) Superposición de un frente de onda aberrado (rojo) y un frente de onda ideal (verde). (b) Distribución piramidal de los polinomios de Zernike.

Para indicar de forma cuantitativa la cantidad de aberración de un sistema óptico se suele utilizar la métrica RMS (del inglés *Root Mean Square*) definida como:

$$RMS = \sqrt{\sum (c_n^m)^2} \quad (1.8)$$

donde c_n^m son los coeficientes de la expansión de la serie en polinomios de Zernike, Z_n^m . Este parámetro será nulo para un sistema perfecto (sin aberraciones). Cuanto mayor sea su valor, más aberrado será dicho sistema óptico. A lo largo de este trabajo se usarán fundamentalmente los términos de bajos orden asociados al astigmatismo (Z_2^2 y Z_2^{-2}) y el término de alto orden definido como aberración esférica (Z_4^0).

1.4.1. Algunos datos sobre aberraciones oculares

En un sistema óptico que presenta aberración esférica, el foco depende de la distancia de los rayos al eje óptico. Si la luz que atraviesa la zona periférica del sistema focaliza delante de la posición del foco paraxial la aberración esférica se considera positiva (Figura 1.11a). Será negativa si los rayos periféricos focalizan detrás de la posición que lo hacen los centrales (Figura 1.11b).

Un sistema con aberración esférica tiende a tener una mayor profundidad de foco debido precisamente a la ausencia de un foco paraxial “perfecto” [Villegas et al., 2014]. De esta manera objetos situados en un cierto rango de distancias podrían verse con una nitidez “aceptable” sin necesidad de cambiar el foco del sistema.

La aberración esférica es, junto con las de bajo orden, la más significativa en el ojo humano. Para una pupila estándar de 5 mm las de bajo orden corresponden al 90.8 % del total, mientras que las aberraciones de orden 3, 4 y 5 (mapas de las filas 4, 5 y 6 de la Figura 1.10b) suponen un 6.4%, 2.6% y 0.2% respectivamente [Castejón-Mochón et al., 2002]. Se sabe que la aberración esférica tiene valores positivos en la córnea ($\sim +0.2$ micras) y negativos (~ -0.2 micras) en el cristalino. De esta manera tienden a compensarse (o minimizarse) entre sí dando lugar un sistema global (ojo completo) con aberración esférica baja [Artal et al., 2001]. Esta compensación de aberraciones se va perdiendo con la edad [Artal et al., 2002].

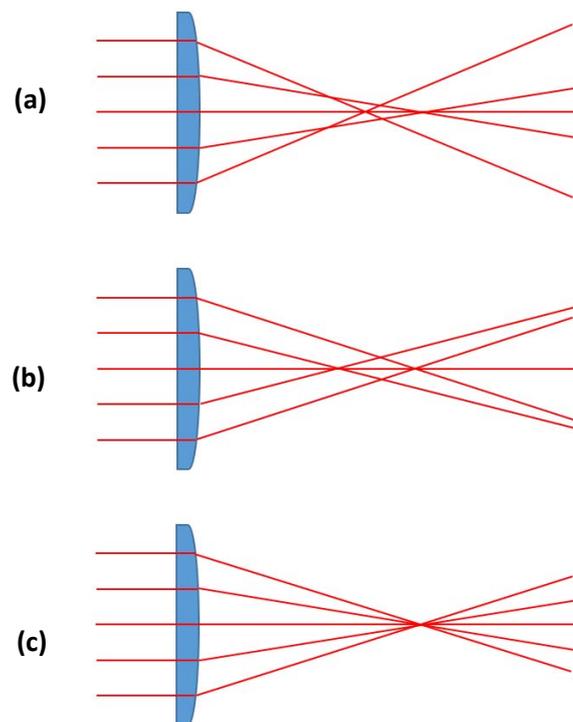


Figura 1.11. Sistema óptico con aberración esférica positiva (a), negativa (b) y sin aberración esférica (c).

No se han encontrado datos sobre la aberración esférica de la córnea ni del ojo completo del bovino. En un estudio en el que se midió la aberración esférica del cristalino de varios animales se estimó que la del bovino podría ser prácticamente nula, al igual que sucedía en otros animales como el cerdo, la oveja y el conejo [Sivak and Kreuzer, 1983]. Sin embargo, el cristalino de otros animales (perro, rana, pato y rata) muestra un valor negativo. Por el contrario la aberración esférica fue positiva en peces. El método utilizado por los autores fue

el siguiente. El cristalino aislado se sumergió en una cubeta llena de agua. Al líquido de inmersión se añadieron gotas de leche para poder observar los rayos de luz láser utilizados. Sobre el cristalino se hicieron incidir haces paralelos al eje óptico a distintas distancias del centro y se observó dónde convergían (si focalizan en un mismo punto el cristalino no tendría aberración esférica). Así, dependiendo de si focalizaban antes los periféricos o los centrales se pudo estimar si la aberración esférica era positiva o negativa, mientras que dependiendo de la distancia entre los focos se podía calcular la cantidad de aberración esférica (Figura 1.12).

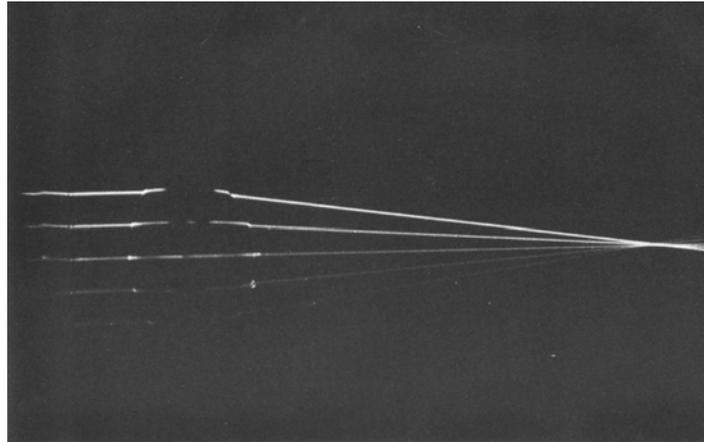


Figura 1.12. Rayos de luz atravesando el cristalino de bovino. Se aprecia el foco donde convergen los rayos de luz a la derecha [Sivak and Kreuzer, 1983].

1.5. Acoplamiento córnea-cristalino

Como se ha dicho al inicio de este capítulo, el globo ocular del bovino, al igual que el de otros muchos animales está formado por dos lentes naturales (córnea y cristalino) que en conjunto refractan la luz de tal manera que idealmente debería focaliza en la retina para obtener imágenes nítidas del mundo que le rodea. La pupila es también parte fundamental de este sistema. Además de limitar la cantidad de luz que pasa, su posición horizontal ayuda a mantener una visión más nítida del horizonte que de los elementos del entorno con contornos verticales, incluso aunque el conjunto córnea-cristalino no realicen correctamente su función de formar imágenes en la retina [Banks et al., 2015].

Además de conocer las aberraciones de la córnea y el cristalino del bovino por separado, sería interesante saber cómo se comportan en conjunto dichos elementos ópticos, el decir, si tienen aberraciones de alto orden significativas o si éstas se compensan parcialmente como sucede en el ojo humano.

La refracción, como parte de las aberraciones (bajo orden), también está determinada por el conjunto córnea-cristalino. Estudios sugieren que el bovino es hipermetrope en su meridiano horizontal ($+0.66 \pm 0.85$ D) mientras que es prácticamente emétrope es el meridiano

vertical (-0.06 ± 0.45 D), con un astigmatismo de 0.70 ± 0.32 D [Lo Sapio, 2015; Bueno et al., 2017].

1.6. Objetivos y estructura del trabajo

De forma general, el ojo del bovino no es miope [Bueno et al., 2017] y carece de acomodación [Prince et al., 1960; Sivak, 1980; Baldwin, 1981]. Sin embargo el animal realiza tareas que requieren visión de cerca. Esto hace plantearse la siguiente pregunta general, ¿cómo es el sistema ocular del bovino para que estos animales puedan ver a diferentes distancias sin acomodar y sin ser, en general, miopes? Para responder a esta pregunta a lo largo de este trabajo se analizará cómo se comportan los elementos ópticos del ojo del bovino, en particular el toro de lidia. Estudiando la geometría de la córnea y del cristalino se obtendrán los datos que servirán para realizar un modelo óptico de cada elemento por separado y luego se combinarán para estudiar su calidad óptica en conjunto.

Desde un punto de vista de ciencia básica, conocer la óptica ocular del toro de lidia ayudará a comprender el mecanismo de su visión y entender mejor el comportamiento de este animal bajo determinadas circunstancias experimentales. Pero por otra parte el análisis podría incluso servir para mejorar sistemas ópticos artificiales, si existe alguna característica óptica que haga singular la óptica de este modelo animal.

La presente memoria está estructurada en seis capítulos que se describen de forma breve a continuación.

El **Capítulo 1**, que aquí acaba, tiene un carácter introductorio donde se han repasado las estructuras del ojo del bovino. Sus características geométricas y ópticas se han comparado con las del ojo humano. También se han repasado los conceptos de cónicas y aberraciones ópticas (haciendo especial hincapié en la aberración esférica).

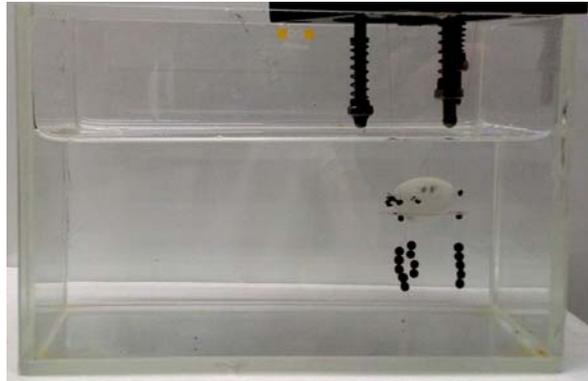
En el **Capítulo 2** se describe el sistema experimental desarrollado para este estudio, así como los métodos usados para calcular las aberraciones de la córnea y el cristalino a partir de topografías e imágenes de sombra respectivamente. También se explica cómo combinar ambos elementos para conformar el ojo completo desde un punto de vista óptico.

Los **Capítulos 3 y 4** muestran los resultados obtenidos tanto de la geometría como de las aberraciones del cristalino y de la córnea.

En el **Capítulo 5** se explican los resultados obtenidos al combinar córnea y cristalino, concretamente en términos de aberración esférica, refracción ocular y forma de la pupila.

Finalmente en el **Capítulo 6** se resumen las principales conclusiones del trabajo.

Métodos



CAPÍTULO 2

Material y métodos

En este capítulo se presentan los procedimientos experimentales usados en esta Tesis Doctoral. En particular, se muestran los dispositivos experimentales utilizados para obtener tanto las imágenes del cristalino como las de la córnea. Mientras que los primeros se han medido en un sistema completamente desarrollado en el Laboratorio de Óptica de la Universidad de Murcia (LO·UM), para el segundo se ha utilizado un topógrafo comercial, a partir de cuyas imágenes y datos de elevación se ha extraído la información necesaria para los objetivos del presente trabajo. También se describen detalladamente los métodos empleados para obtener los datos geométricos (radios de curvatura, espesores y asfericidades) de dichos elementos fisiológicos, así como los usados para calcular las aberraciones ópticas. Dado que los sistemas experimentales para registrar las imágenes de la córnea y del cristalino son muy diferentes, la forma en la que se han obtenido las aberraciones también los son, como se describirá a continuación.

2.1. Sistema y procedimiento experimental para el cristalino

En esta primera parte del Capítulo 2 se describen todos los métodos empleados para analizar el cristalino aislado desde el punto de vista geométrico y para obtener la información sobre algunas de sus aberraciones ópticas (en concreto, astigmatismo y aberración esférica). Se detallará el procedimiento experimental para la extracción del cristalino del globo ocular, el sistema instrumental desarrollado para el registro de imágenes y su posterior procesado digital. La geometría de las superficies del cristalino se ha obtenido directamente a partir de dichas imágenes. Con esta información geométrica y haciendo uso de la ecuación de las lentes gruesas se ha calculado el astigmatismo. Finalmente, se explica el cálculo de la aberración esférica, para el que se ha utilizado una técnica de trazado de rayos. Nos hemos centrado exclusivamente en el astigmatismo y en la aberración esférica por ser estas las más significativas en el cristalino del bovino en general y del toro de lidia en particular, aspecto que se detallará en el Capítulo 3.

2.1.1. Muestras: Extracción de los cristalinios

Para el presente estudio se han utilizado 49 cristalinios de 27 animales. Los globos oculares fueron enucleados de sus órbitas en el desolladero de la Plaza de Toros de Murcia. La operación la llevaron a cabo veterinarios especializados con el objeto de minimizar el daño. Todo el procedimiento experimental fue aprobado tanto por la empresa de la plaza (Toros Sureste, S.L.), como por la Consejería de Sanidad de la Región de Murcia. Tras el enucleado, las muestras, depositadas en contenedores con solución salina, fueron directamente trasladadas al LO·UM donde se realizaron todas las medidas.

Los animales involucrados en este estudio tenían edades comprendidas entre 17 y 61 meses. Este rango de edades en este tipo de animales bovinos permite hacer un estudio de los posibles cambios fisiológicos y ópticos con la edad. Es por ello que a lo largo de los capítulos que recogen los resultados, se han hecho tres grupos de edad distintos que hemos denominado #1, #2 y #3).

- Grupo #1: corresponde a los cristalinios de animales menores de 30 meses (N=14)
- Grupo #2: son aquellos animales con edades entre 30 y 50 meses (N=7)
- Grupo #3: los animales mayores de 50 meses (N=28).

La diferencia entre el tamaño de la población de los grupos se debe a que la mayor parte de los animales sacrificados tenían más de 4 años (cuatroños en términos taurinos). Aunque a lo largo de este trabajo en las gráficas se indicarán numéricamente los intervalos de edad de

los grupos, por fluidez de redacción en el texto escrito se hablará habitualmente de grupos de edad #1, #2 y #3.

Cuando en los capítulos de resultados se relacionen datos de ojos contralaterales (ojo derecho (OD) frente a ojo izquierdo (OI)), obviamente no se incluirán los cristalinos (o córneas) que no tiene pareja.

Una vez los ojos fueron llevados al laboratorio se procedió a extraer cada cristalino del correspondiente globo ocular. Para ello se realizó un pequeño corte en el limbo esclero-corneal con un bisturí y, posteriormente, con unas tijeras quirúrgicas se amplió dicho corte hasta completar un ángulo de unos 180° alrededor del limbo para poder extraer el cristalino con su cápsula (Figura 2.1).



Figura 2.1. Proceso de extracción del cristalino (véase el texto para más detalles).

Una vez extraído el cristalino, éste se depositó sobre un aro plano transparente apoyado sobre su cara posterior (Figura 2.2). Dicho aro estaba suspendido de una rueda giratoria graduada por medio de tres hilos de nylon. La rueda se colocó sobre la parte superior de la cubeta llena de agua (véase Figura 2.3) de tal forma que el cristalino quedó sumergido y se pudo rotar desde el exterior.

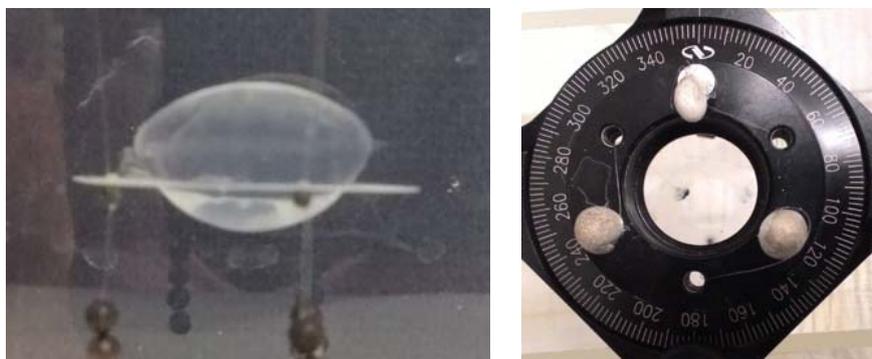


Figura 2.2. Cristalino en posición horizontal y dentro de la cubeta listo para ser medido (izquierda, véase también la Figura 2.3). Detalle de la rueda giratoria graduada (derecha).

2.1.2. Sistema experimental para imágenes de sombra

El sistema experimental utilizado se ha desarrollado íntegramente en el LO·UM y se muestra en la Figura 2.3. Tiene por objeto el registro de imágenes de las superficies del cristalino con la técnica denominada de “imagen de sombra” (del inglés *shadow photography*) o por iluminación posterior (del inglés *back-illumination*). El procesado digital de cada imagen determina objetivamente la curvatura y la asfericidad de las caras anterior y posterior de dicha lente fisiológica. Es importante que las imágenes sean nítidas, con la mayor resolución posible y tengan un alto contraste en la zona de los bordes.



Figura 2.3. Sistema experimental que contiene la fuente de retro-iluminación difusa (izquierda), cubeta (centro) y sistema telecéntrico con cámara CCD (derecha).

A continuación se describen los diferentes componentes (de izquierda a derecha):

- Fuente de iluminación. Es una fuente de luz difusa que retro-ilumina el cristalino, de modo que al capturar su imagen con una cámara se obtiene un fondo blanco con el cristalino oscuro. Este sistema proporciona un buen contraste en los bordes de las superficies, apreciándose claramente la diferencia entre el cristalino y el fondo.
- Cubeta y soporte giratorio. Es un recipiente rectangular abierto por su parte superior y lleno de agua. El índice de refracción del agua es aproximadamente $4/3$, valor muy similar al de los humores acuoso y vítreo, con los que está en contacto el cristalino dentro del ojo por delante y por detrás respectivamente. El vidrio con el que está fabricada la cubeta tiene estándares de alta calidad óptica ($\lambda/10$) para evitar posibles aberraciones generadas por las ventanas ópticas. Dentro de este contenedor se coloca el cristalino que se cuelga del soporte rotatorio (como ya se explicó el apartado 2.1.1). Dicho soporte permite girarlo sobre su plano ecuatorial de forma controlada.
- Sistema de registro de imágenes:
 - Objetivo telecéntrico (Edmund Optics Inc., Barrington, NJ, Estados Unidos). El modelo usado tiene un aumento $0.5x$ e incorpora un zoom óptico que es capaz de enfocar objetos situados a una distancia entre 117 y 142 mm de la última lente del objetivo. Este tipo de

objetivos son de alta calidad óptica, no generan distorsión y proporcionan una gran profundidad de campo.

- Cámara CCD (Retiga 1300i, Qimaging, Burnaby, BC, Canada). Contiene un sensor CCD de tipo 2/3 con 1280x1024 píxeles (cada pixel tiene un área $6.7 \times 6.7 \mu\text{m}^2$) que se acopla directamente al objetivo telecéntrico. Teniendo en cuenta los aumentos del teleobjetivo, en el plano de trabajo en foco, un pixel en la imagen equivale a $13.4 \mu\text{m}$. El *software* de la cámara permite ajustar manualmente el tiempo de exposición (para evitar saturación por parte de la fuente de iluminación) y capturar las imágenes del cristalino que se almacenan en un ordenador para su posterior procesado.

Una vez que el cristalino está situado correctamente dentro de la cubeta, se procede a registrar imágenes de retro-iluminación. Se registraron 18 imágenes para cada uno de ellos, espaciadas 10° (entre 0° y 170°) girando la rueda graduada. Un ejemplo de dichas imágenes se muestra en la Figura 2.4.

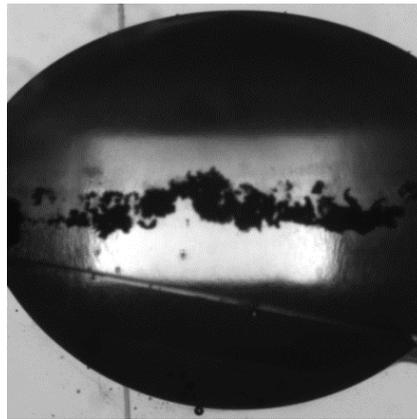


Figura 2.4. Imagen de retro-iluminación de un cristalino tomada con el sistema experimental desarrollado en el presente trabajo. Se pueden apreciar claramente los bordes de las superficies. La zona blanca que aparece en el interior del cristalino es la imagen virtual que se forma de la fuente de iluminación.

2.1.3. Procesado digital de las imágenes de retro-iluminación

El primer paso, una vez que se han registrado imágenes de los cristalinos con la técnica de retro-iluminación es poder definir las características geométricas de las superficies. En este caso, la geometría de los meridianos del cristalino se ha calculado usando las secciones cónicas obtenidas tras un procesado digital de dichas imágenes utilizando un programa desarrollado en el LO·UM que utiliza Mathematica 10.0 (Wolfram Research; Champaign, IL, EEUU). Esta aplicación contiene una gran cantidad de funciones ya programadas que permiten realizar el procesado digital necesario hasta obtener los radios de curvatura de las

dos caras del cristalino, su asfericidad y el espesor. El algoritmo programado contiene la siguiente secuencia de operaciones:

1. Cada imagen se secciona y se divide en dos partes, superior e inferior, como indica la Figura 2.5. Cada parte se corresponde con la zona central del cristalino donde se observan las superficies anterior (cara 1) o posterior (cara 2) recortadas a un tamaño de 9 mm.

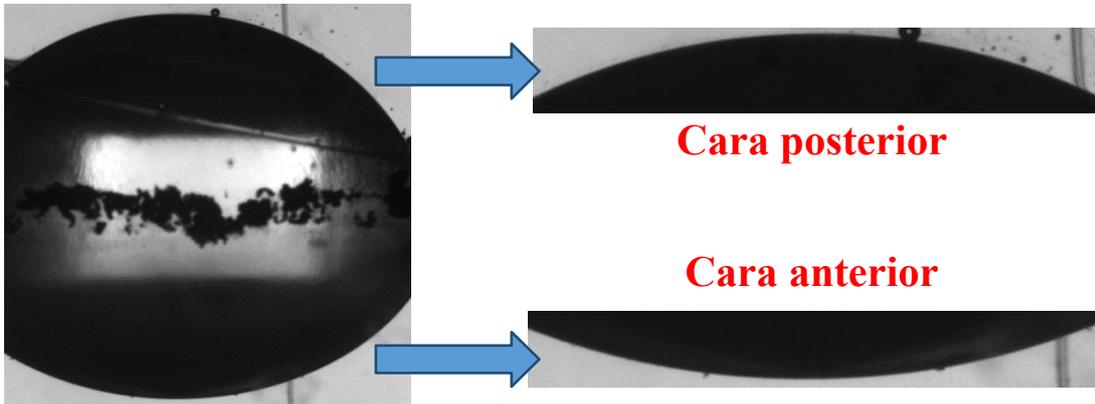


Figura 2.5. Imagen del cristalino dividida en dos partes usando Mathematica. Cada parte contiene el borde de la zona central de la correspondiente superficie.

2. A continuación, a partir de una imagen binarizada y usando la función “EdgeDetect”, se detectan los bordes de estas superficies (Figura 2.6). Esto es posible gracias al contraste entre el fondo de la imagen y el propio cristalino.

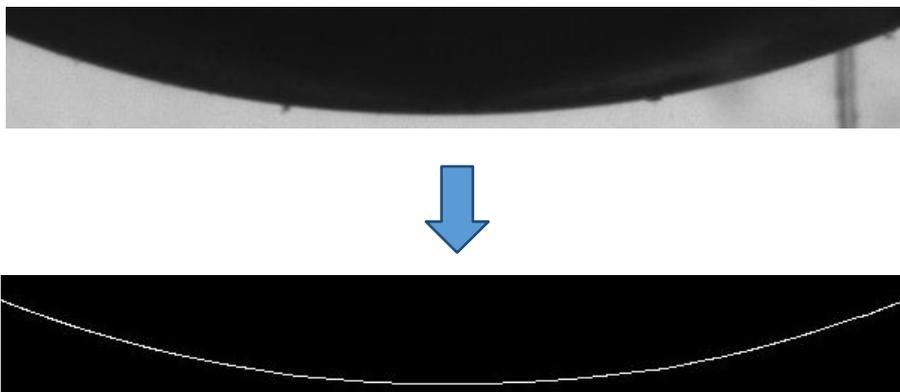


Figura 2.6. Detección del borde de la cara anterior a partir de una imagen binaria (blanco y negro) de la imagen real. El borde detectado queda definido en blanco (sobre fondo negro).

3. Una vez detectados los bordes, los puntos así definidos se ajustan a una curva cónica mediante un procedimiento de mínimos cuadrados. Mathematica usa la función "FindFit" para minimizar la distancia cuadrática entre los datos y definir la función a la que se ajusta. En el presente caso, esa función es una cónica con tres parámetros de ajuste: la posición del vértice, la curvatura y la asfericidad. Como ejemplo, los valores obtenidos de radio y asfericidad se muestran superpuestos en las imágenes de la Figura 2.7.

4.- Finalmente, se estima el espesor del cristalino como la distancia entre los vértices de las dos superficies (ver Figura 2.7, derecha).

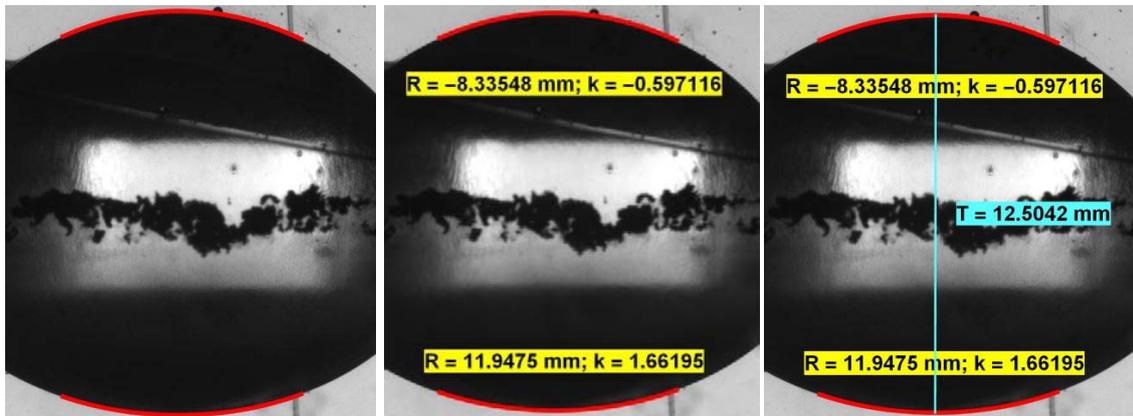


Figura 2.7. Ajuste de las superficies del cristalino a una cónica (en rojo, izquierda). Radio de curvatura (R) y asfericidad (k) correspondientes a las caras anterior y posterior (centro). El espesor (T) del cristalino es la línea azul que une los vértices de las dos caras (derecha).

En algunos casos el programa no detecta correctamente la superficie del cristalino debido al ruido biológico, a la existencia de burbujas de aire o a pequeños desprendimientos de la propia cápsula del cristalino. En estas situaciones, se seleccionan una serie de puntos manualmente sobre la superficie del cristalino usando el ratón del ordenador. Con el mismo procedimiento de mínimos cuadrados indicado anteriormente el programa busca de nuevo cual es la cónica que mejor ajusta a esos puntos (Figura 2.8).



Figura 2.8. Puntos seleccionados manualmente sobre la superficie del cristalino (amarillo) y la curva cónica que mejor ajusta a esos puntos (rojo).

2.1.4. Calibrado del sistema experimental

Previamente al registro de imágenes de los cristalinos se llevó a cabo un calibrado para conocer el grado de precisión con el que se pueden reproducir las curvaturas y asfericidades de las superficies problema. Para ello, se utilizó una esfera de calibrado de la que se conocen sus parámetros geométricos nominales: radio de curvatura de 5 mm y asfericidad nula. Al igual que se haría con los cristalinos, la esfera se colocó en el soporte giratorio, se sumergió en la cubeta y se fue rotando en pasos de 10° , tomándose una imagen para cada meridiano (Figura 2.9).

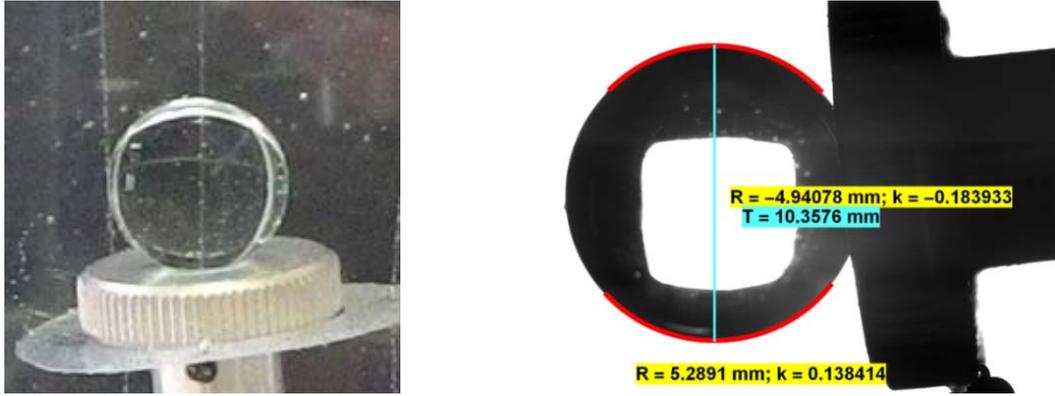


Figura 2.9. Esfera de vidrio utilizada en el calibrado (izquierda). Procesado digital de la imagen registrada (derecha). R, radio de curvatura; k, asfericidad; T, espesor (línea azul que une los vértices de las superficies de las dos cónicas). En rojo se muestran los ajustes de una cónica a las superficies de la esfera.

Tras procesar digitalmente las imágenes (véase apartado 2.1.3), la Tabla 2.1 muestra los valores medios de radios de curvatura y asfericidades para todos los meridianos. Los datos obtenidos experimentalmente son similares a los datos nominales de la esfera de calibrado. En media, se obtuvo un error relativo de un 3.6% para el radio de curvatura (5.18 mm frente a 5 mm de valor nominal). Además, en radios de curvatura mayores a 5 mm se espera que el error sea incluso menor al reducirse la curvatura (típicamente se ajusta mejor una superficie más plana frente a una muy curva). Con respecto a la asfericidad, los valores en media fueron bajos, apenas distintos del valor nominal nulo. En general se puede concluir que no existe un error sistemático en el procedimiento experimental mayor del 4% para determinar el radio de curvatura, y que la asfericidad puede medirse con una precisión de ± 0.2 unidades.

| | <i>Valor nominal</i> | <i>Valor medido</i> |
|----------------------|----------------------|---------------------|
| Radio 1 | 5 | 5.18±0.15 |
| Radio 2 | 5 | 5.08±0.20 |
| Espesor | 10 | 10.45±0.12 |
| Asfericidad 1 | 0 | 0.05±0.18 |
| Asfericidad 2 | 0 | -0.10±0.08 |

Tabla 2.1. Comparación entre los valores nominales y experimentales del radio de curvatura, espesor y asfericidad de la esfera de calibrado. Los datos medidos representan la media de todos los meridianos con su desviación estándar.

2.1.5. Trazado de rayos y cálculo de aberraciones

2.1.5.1. Astigmatismo

Cuando se quieren calcular las aberraciones de un sistema óptico mediante un trazado de rayos habitualmente se toma cada meridiano como un volumen de revolución. Este método es adecuado para obtener la aberración esférica (véase el siguiente apartado) pero no para estimar el astigmatismo. Así, la forma más adecuada para determinar el astigmatismo de una superficie óptica es evaluar la diferencia de potencia entre los meridianos de mayor y menor potencia, que formen aproximadamente 90° entre sí.

A partir de los radios de curvatura y del espesor obtenidos de las imágenes de retro-iluminación y asumiendo valores de la literatura para los índices de refracción del cristalino (índice equivalente o global) y de los humores, es posible calcular el astigmatismo. Es importante indicar que en este trabajo se ha obviado el hecho de que el cristalino no tiene un índice constante sino que presenta un gradiente [Pierscionek, 1995]. Por astigmatismo entendemos aquí la componente cilíndrica, ya que el eje del astigmatismo no es posible calcularlo debido a los orígenes arbitrarios de las rotaciones realizadas en el cristalino.

Teniendo en cuenta las leyes de la Óptica Geométrica, la potencia de cada cara del cristalino a lo largo de un meridiano de radio R_i será la potencia de un dioptrio esférico:

$$P_i = \frac{n' - n}{R_i} \quad (2.1)$$

donde n y n' son los índices de refracción a ambos lados de la superficie que se estudia. En concreto estos índices hacen referencia a los índices del humor acuoso y el cristalino respectivamente cuando trata de la cara anterior, y del cristalino y el humor vítreo cuando se calcula la potencia de la cara posterior. Hay que tener en cuenta el criterio de signos, de forma que el radio de la primera cara es positivo y el de la segunda negativo. Obviamente el valor del radio ha de ir expresado en metros para que la potencia calculada se obtenga directamente en dioptrías (D).

Conocida la potencia de las dos superficies para cada meridiano i , se puede calcular la potencia total de dicho meridiano P_{Ti} haciendo uso de la ecuación de las lentes gruesas:

$$P_{Ti} = P_{1i} + P_{2i} - \frac{e}{n_{cr}} P_{1i} \cdot P_{2i} \quad (2.2)$$

donde e es el espesor del cristalino y $n_{cr}=1.5268$ el índice de refracción del cristalino.

2.1.5.2. Aberración esférica

Los datos de la geometría del cristalino obtenidos con Mathematica (radios de curvatura, asfericidades y espesor) se van a utilizar también para calcular la aberración esférica de las superficies que forman el cristalino. Para ello, se realiza un trazado de rayos exacto, implementado con el programa de diseño óptico y simulación Zemax (Zemax LLC, Kirkland, WA, EEUU). Zemax resuelve la Ley de Snell de manera exacta para cada rayo que incide sobre cada punto de la superficie. Como es bien sabido, dicha ley determina el ángulo de refracción de un rayo de luz a partir del ángulo de incidencia y de los índices de refracción de ambos medios:

$$n_1 \cdot \text{sen } \theta_1 = n_2 \cdot \text{sen } \theta_2 \quad (2.3)$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los dos medios; y θ_1 y θ_2 son los ángulos de incidencia y de refracción respectivamente.

Zemax permite representar sistemas ópticos de manera sencilla introduciendo los datos geométricos de las lentes (en este caso, los datos del cristalino obtenidos como se indicó en los apartados anteriores) en el denominado “Editor de Lentes” (Tabla 2.2). Los índices de refracción tanto del propio cristalino como del humor acuoso (delante) y del humor vítreo (detrás) se tomaron de modelos ópticos del ojo de bovino previamente publicados [Coile and O’Keefe, 1988]. En resumen, las aberraciones del cristalino se calculan a partir de los siguientes parámetros:

- Radios de curvatura de ambas caras (medidos).
- Asfericidades de ambas caras (medidas).
- Espesor del cristalino (medido).
- Índice de refracción del cristalino (1.5268).
- Índice del humor acuoso (1.3339).
- Índice del humor vítreo (1.3337).

| Radius | Thickness | Glass | Semi-Diameter | Conic |
|-----------|-----------|----------|---------------|-----------|
| Infinity | Infinity | 1.33,0.0 | 0.000000 | 0.000000 |
| Infinity | 0.000000 | 1.33,0.0 | 3.000000 | 0.000000 |
| 12.500000 | 12.378400 | 1.53,0.0 | 8.000000 U | 0.700865 |
| -8.979620 | 33.158682 | 1.33,0.0 | 8.000000 U | -0.595003 |
| Infinity | | 1.33,0.0 | 0.074353 | 0.000000 |

Tabla 2.2. Ejemplo de tabla de datos en Zemax para generar el sistema óptico. En la primera columna (*Radius*) se introducen los radios de curvatura de las diferentes superficies que componen el sistema y en la segunda (*Thickness*) los correspondientes espesores. Las siguientes columnas contienen los índices de refracción (*Glass*), el radio de las superficies (*Semi-Diameter*) y, por último, las asfericidades (*Conic*).

Puesto que las aberraciones dependen del tamaño de la pupila de entrada del sistema, su diámetro puede también usarse como parámetro en Zemax y así estimar las aberraciones para distintos diámetros de pupila. Una vez que todos los datos (tanto geométricos como ópticos) se han introducido en el “Editor de Lentes”, se debe situar el plano imagen de Zemax en la distancia focal imagen (plano imagen paraxial) para que se puedan estudiar sus aberraciones de forma correcta (si el sistema no está focalizado, el desenfoque puede ser muy alto e impedir el cálculo de las demás aberraciones con precisión). Una función de Zemax (“*Quick focus*”) obtiene de forma sencilla esta distancia minimizando la dispersión de las posiciones de intersección de los rayos con el plano imagen (“*RMS Spot Radius*”). El sistema así enfocado se puede representar en un diagrama de trazado de rayos exacto (Figura 2.10). A partir de aquí ya se pueden obtener las aberraciones del sistema expresadas como los coeficientes de un desarrollo en polinomios de Zernikes usando la función “*Zernike Standard Polynomials*”.

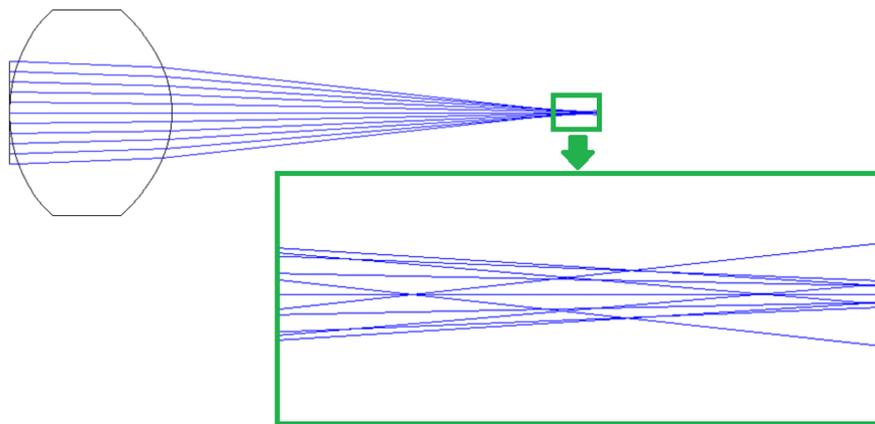


Figura 2.10. Trazado de rayos en Zemax para el caso de uno de los cristalinos involucrado en el presente estudio. En la ampliación de la región focal se puede observar cómo no todos los rayos focalizan en el mismo sitio debido a las aberraciones ópticas del propio cristalino (en particular la aberración esférica).

Existen dos simplificaciones que se aplican en este procedimiento. En primer lugar, se ha descartado una reconstrucción volumétrica del cristalino a partir de las curvaturas y asfericidades en cada meridiano. Puesto que no se conoce el origen de la rotación del cristalino (el meridiano cero en cada cristalino es aleatorio) una reconstrucción en volumen podría llevar a conclusiones erróneas por la generación de aberraciones asimétricas que serían un artefacto de la medida y no tendrían un origen fisiológico de la propia óptica del cristalino. Además, la extrapolación de datos entre meridianos tomados cada 10° presenta dificultades y posiblemente generaría también artefactos en una eventual reconstrucción geométrica. Es por ello que se ha optado por tomar de cada meridiano un volumen de revolución y calcular las aberraciones (puesto que es simétrico únicamente estimamos la aberración esférica) de dicho

crystalino como la media de la aberración esférica tomada en todos los meridianos. La segunda simplificación asume que el cristalino se comporta como una lente de índice de refracción constante. En la literatura no se han encontrado datos sobre bovinos que permitan introducir este parámetro en los modelos de revolución. Si bien, hay estudios que han intentado determinar el gradiente de índice del cristalino del bovino, éstos hacen referencia al gradiente a lo largo del eje óptico [Pierscionek, 1995] y, en otros casos, a lo largo del plano ecuatorial del cristalino [Pierscionek, 1995b]. Estos resultados pueden ser útiles en óptica paraxial, pero no se pueden utilizar en un estudio de aberraciones debido a que en este caso hay que tener en cuenta todo el cristalino y no sólo la zona cercana al eje óptico o un sólo plano del cristalino. Sin embargo, es de esperar que, al igual que en el cristalino humano, que exista una potencial contribución de un posible gradiente a la aberración esférica del cristalino [Birkenfeld et al., 2013; Birkenfeld et al., 2014] aunque el porcentaje es desconocido.

En general, la aberración esférica de una lente gruesa como es el caso del cristalino, o de un sistema óptico en general (ojo completo), está generada por una combinación de la curvatura (básicamente su factor de forma) y la asfericidad de las caras de sus componentes. Debido a ello es interesante determinar cuál es el peso de la asfericidad en el cálculo de la aberración esférica tanto del cristalino como del ojo en su conjunto. Para ello se ha realizado el cálculo de la aberración esférica con Zemax de dos formas distintas: (1) teniendo en cuenta la asfericidad obtenida a partir del procesado de las imágenes de retro-iluminación descrito en el apartado 2.1.3 y (2) asumiendo únicamente superficies esféricas (es decir, fijando como nula la asfericidad de ambas caras en los datos de la Tabla 2.2). Al obtener estos dos resultados de aberración esférica se puede calcular el porcentaje de cambio que sufre este valor al añadir la asfericidad a las superficies que forman el sistema óptico. El cambio que se produce en la aberración esférica (CAE, en %) cuando se elimina la asfericidad de las caras se obtiene como:

$$CAE = 100 \cdot \frac{AE_k - AE_{k=0}}{AE_{k=0}} \quad (2.4)$$

donde AE_k es la aberración esférica con su asfericidad y $AE_{k=0}$ es el valor de dicha aberración con la asfericidad forzada a cero.

La pupila del bovino en condiciones de iluminación mesópica tiene unas dimensiones de 9-11 mm en su dirección vertical y 14-17 mm en su dirección horizontal [Tanimura, 1977; Aly, 2003]. Sabiendo esto y teniendo en cuenta que las imágenes del cristalino analizadas tienen una anchura de 9 mm, se ha calculado la aberración esférica para pupilas de 4, 6 y 8

mm con la finalidad de ver el cambio que experimenta este valor al aumentar el tamaño pupilar.

2.2. Sistema y procedimiento experimental para la córnea

Este segundo bloque se centra en la descripción de los métodos usados tanto para el cálculo del radio de curvatura de la córnea, como de sus aberraciones ópticas. El procedimiento se basa en el análisis de topografías corneales proporcionadas por un topógrafo comercial. Por limitaciones en los datos proporcionados por el topógrafo (está diseñado para medidas en córneas humanas), todo el estudio se ha limitado a la primera superficie, que es la más importante desde el punto de vista óptico. A continuación se detallará el procedimiento de registro de imágenes de las córneas y posterior procesado, que servirá para determinar tanto el radio de curvatura (medio, máximo y mínimo) y/o la queratometría de la primera cara, como las aberraciones ópticas de ésta. El cálculo de las aberraciones se realizará mediante un trazado de rayos similar al expuesto en el apartado 2.1.5.2 pero con algunas diferencias que se explicarán aquí. También se describirá cómo determinar la refracción a partir de las aberraciones ópticas.

2.2.1. Muestras

Para el estudio de las córneas se han utilizado 55 ojos de 27 animales obtenidos de manera exactamente igual a la descrita anteriormente (apartado 2.1.1). La edad de los animales estuvo en el rango entre 20 y 61 meses. De nuevo, este extenso rango de edades nos permitirá hacer un estudio de la posible relación entre los parámetros geométricos y ópticos de la córnea con la edad. Los grupos de edad #1 (N=14), #2 (N=12) y #3 (N=29) se definieron igual que para los cristalinos, aunque el número de muestras para cada grupo difirió.

Tras ser enucleados, los globos oculares se depositaron de forma individual en contenedores con solución salina y se trasladaron inmediatamente al LO·UM para su medida. La minimización del tiempo entre la enucleación y la medida es importante para evitar posibles cambios en la córnea por diversos factores como pueden ser las variaciones en la presión intraocular, pérdida de rigidez corneal o generación de edema, entre otros. La Figura 2.11 muestra un ejemplo de dos globos oculares antes de ser medidos.

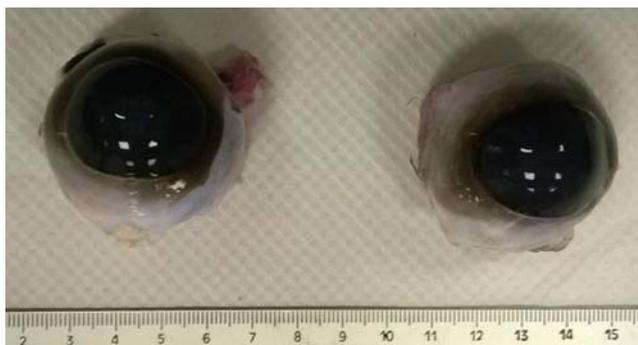


Figura 2.11. Globos oculares de toro de lidia listos para ser medidos con el topógrafo.

2.2.2. Sistema experimental para el registro de topografías corneales

Las medidas de la córnea se llevaron a cabo con el topógrafo de proyección comercial Atlas9000 (Carl Zeiss Meditec, Jena, Alemania) como el que se muestra en la Figura 2.12. Para el registro de imágenes con el instrumento, el globo ocular ha de estar en posición horizontal (como lo está el ojo en vivo en su posición natural). Para ello se diseñó un soporte utilizando una impresora 3D. El ojo se apoyó sobre dicho soporte y éste a su vez se adaptó a la mentonera del topógrafo utilizando una pieza de acople también diseñada *ad hoc* para el presente experimento. De esta forma, el movimiento vertical de la propia mentonera junto con el XYZ del propio topógrafo nos permitió centrar y alinear el globo ocular para la medida.



Figura 2.12. Topógrafo corneal Atlas9000 utilizado para las medidas de la córnea (www.zeiss.com).

El topógrafo dispone de una serie de anillos concéntricos, llamados anillos de Plácido (véase la Figura 2.13), que se iluminan de manera alternante (uno sí, uno no), frente a los cuales se coloca el ojo del cual se quiere estudiar la córnea. La reflexión de los anillos en la primera superficie de dicha córnea es la imagen que se registra (Figura 2.13). Esta imagen de los anillos sobre la cara anterior de la córnea da una idea cualitativa del estado de dicha superficie. Si la forma es aproximadamente esférica, probablemente sea una superficie sin

muchas alteraciones. Sin embargo, si tiene una deformación de tal forma que en un meridiano los radios parecen ser más grandes que en el meridiano perpendicular a él, puede deberse a la presencia de astigmatismo. Si tenemos un caso con muchas irregularidades, es probable que la alteración en la primera superficie corneal sea mayor o que la cantidad de lágrima sea insuficiente y por ello se ven los anillos “rotos”.

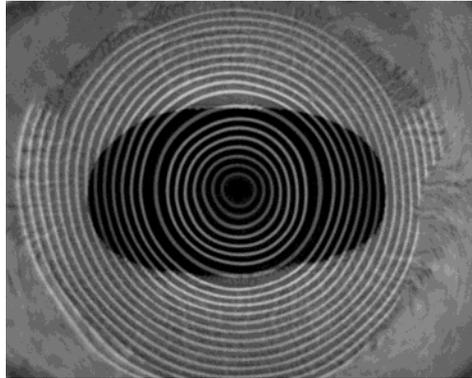


Figura 2.13. Anillos de Plácido del topógrafo reflejados en la superficie corneal. La forma ovalada de la pupila del bovino es claramente visible. También se aprecia cómo el anillo de enfoque está situado a una distancia mayor de sus anillos adyacentes y que el resto de anillos entre sí.

En este tipo de topógrafos la calidad de la imagen depende mucho de la calidad de la lágrima. Tal es así que antes de cada registro, la córnea se hidrata con solución salina utilizando una jeringuilla y evitando en todo momento el contacto de ésta con la superficie corneal. Esta hidratación evita irregularidades en su superficie y por tanto minimiza artefactos. Para cada córnea se tomaron al menos 4 imágenes de forma secuencial.

Los anillos del topógrafo están dispuestos en forma de cono para que la distancia de dichos anillos al vértice (ápex) de la córnea sea similar. Sólo hay un anillo, el denominado anillo de enfoque, cuya distancia al vértice es menor que la del resto de anillos. Esto está diseñado así para que con un pequeño movimiento el anillo de enfoque cambie de tamaño y se confunda con los anillos cercanos. Los anillos contiguos a este anillo de enfoque están más alejados que la distancia que hay entre el resto de anillos. Esto sirve para comprobar con facilidad si la distancia al vértice es la misma al realizar medidas de distintos ojos, simplemente situando el anillo de enfoque a la misma distancia con respecto a sus anillos contiguos, es decir, centrándolo bien.

Conociendo el tamaño de los anillos del topógrafo y la distancia al ojo, el sistema es capaz de calcular el radio de curvatura en cada punto de la córnea iluminado por los anillos. Esta operación se basa en la comparación del tamaño real de cada anillo con el tamaño de la imagen reflejada en la córnea. Concretamente realiza este cálculo en 45 meridianos corneales

espaciados 2° . A partir de esta información el instrumento también calcula la potencia en cada uno de esos puntos suponiendo un índice de refracción corneal de 1.3376 (Figura 2.14).

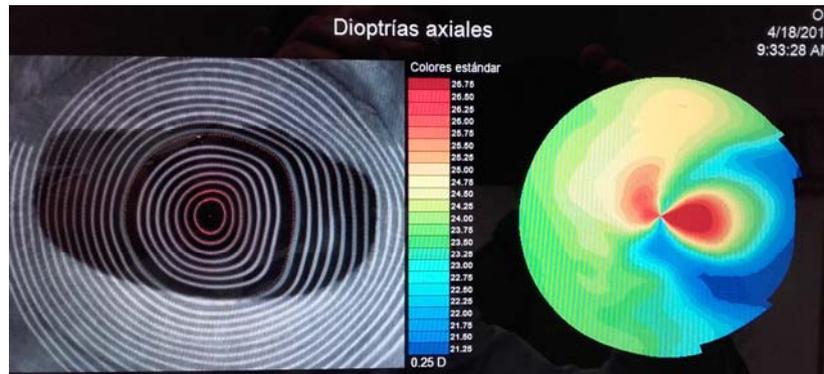


Figura 2.14. Imagen de la proyección de los anillos de Plácido sobre la primera cara de la córnea (izquierda) y el correspondiente mapa de potencia corneal calculado (derecha).

Puesto que el Atlas9000 es un topógrafo de proyección, además de dar un mapa de curvaturas o de potencias como el mostrado en la Figura 2.14, también puede determinar la elevación de cada punto de la superficie corneal con respecto al iris y representarlo en un mapa de elevación (Figura 2.15) Este mapa da una idea precisa de la forma que tiene dicha superficie y, por lo tanto, de sus irregularidades, que en definitiva son las que determinan las aberraciones corneales que se verán en el siguiente apartado.

De forma breve, el topógrafo determina el mapa de elevaciones a partir de los cálculos que el *software* interno realiza, conociendo tanto el ángulo de incidencia de la luz en un punto determinado de la córnea, como la zona donde dicha luz se refleja en el iris tras atravesar la córnea. Esto permite hallar la altura con respecto al iris del punto de la córnea donde incide la luz. El topógrafo realiza un barrido en horizontal mediante 20 secciones cónicas verticales a lo largo de la superficie corneal. Los valores obtenidos en cada sección dan un mapa bidimensional y uniendo dichos mapas se obtiene un mapa tridimensional de la primera superficie corneal.

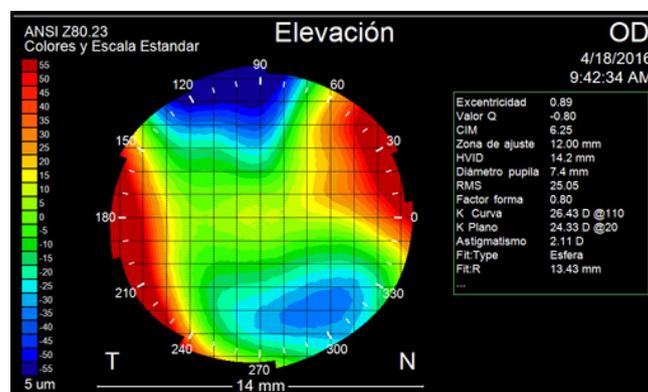


Figura 2.15. Mapa de elevaciones de la córnea calculado por el propio instrumento (véanse los detalles sobre dicho cálculo en el texto).

2.2.3. Trazado de rayos y cálculo de aberraciones

Los ficheros proporcionados por el topógrafo contienen la información sobre el mapa de elevaciones de cada córnea, pero tienen un formato propio no compatible con Zemax. Es por ello que cada fichero necesita una conversión particular que se lleva a cabo con Mathematica. Una vez hecho esto, los datos se trasladan a Zemax para ser procesados como ya se hizo con los datos geométricos de los cristalinos (apartado 2.1.5). La diferencia fundamental entre la forma de procesar los datos del cristalino y las córneas radica en que en este caso no se introducen los valores de radio de curvatura y asfericidad (véase Tabla 2.2), sino que Zemax carga el mapa de elevaciones (en el formato compatible previamente preparado) para trabajar directamente con él. Una vez el *software* reconoce la matriz numérica que contiene la elevación en cada punto, el procedimiento de obtención de las aberraciones ópticas es idéntico al del apartado 2.1.5. Las aberraciones se obtienen en forma de coeficientes de Zernike (hasta 4º orden) para los mismos tamaños de pupila que se usaron con el cristalino (4, 6 y 8 mm). En particular, a partir de estos coeficientes se puede determinar la ecuación esfero-cilíndrica del astigmatismo (es decir, potencias y eje) con las expresiones que se muestran el siguiente apartado.

A partir de los datos numéricos de los mapas de elevaciones topográficas también se han calculado los radios de curvatura máximo y mínimo (con las correspondientes asfericidades) de la superficie anterior de la córnea. Estos valores y su orientación nos permiten una forma alternativa de determinar la cantidad de astigmatismo corneal existente y su orientación (que es la que se ha usado con los cristalinos).

El procedimiento para ello se basa en un ajuste a una curva cónica mediante un procedimiento de mínimos cuadrados usando la función "*FindFit*" de Mathematica. Esta operación es similar a la empleada en el ajuste de las superficies del cristalino expuesto anteriormente, aunque esta vez se ha realizado en 180 meridianos de la córnea (uno cada grado, entre 0º y 179º). Tras esto se guardan tanto los valores máximo y mínimo de los 180 ajustes realizados, como la dirección en la que se encuentran ambos valores (dichos meridianos deben estar aproximadamente a 90º). También se guarda la gráfica donde se representan los 180 valores de radio de curvatura obtenidos para cada topografía (Figura 2.16). Dicha gráfica se analiza forma cualitativa posteriormente para descartar topografías irregulares y cerciorarse tanto de que los valores máximo y mínimo se encuentran aproximadamente a 90º entre sí, como que la variación geométrica sigue un patrón progresivo desde el máximo al mínimo, sin saltos ni singularidades.

De forma adicional también se ha calculado tanto el radio de curvatura promedio de la superficie anterior de cada córnea como la asfericidad media.

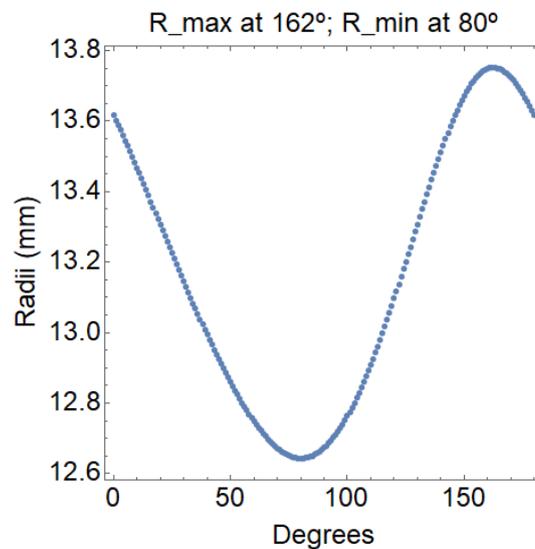


Figura 2.16. Valores del radio de curvatura corneal para cada uno de los 180 meridianos (separados 1° entre sí). Se observa la curva típica de una superficie astigmática con sus valores máximo y mínimo separados aproximadamente 90°. Las orientaciones correspondientes a dichos valores máximo y mínimo se muestran en la parte superior.

2.3. Combinación córnea-cristalino: Procedimiento para modelar el ojo completo

Una vez se conocen los datos geométricos de la córnea y el cristalino, éstos se pueden combinar para obtener información del ojo completo como sistema óptico formado por ambos elementos refractivos. Con este objetivo se han utilizado los datos de 20 ojos pertenecientes a 12 animales de los cuales se han estudiado ambos elementos (Capítulos 3 y 4). Por edades la distribución del número de ojos fue de 4 pertenecientes al grupo #1, 5 al #2 y 11 al #3. Los datos utilizados (previamente calculados en este trabajo o haciendo uso de la literatura existente) para reconstruir el modelo de ojo completo en función de la edad son los siguientes:

- Valores de los radios de curvatura, el espesor y la asfericidad de ambas caras del cristalino calculados según se ha descrito en el apartado 2.1.3. También valores máximos y mínimos de los radios.
- Valores de los radios de curvatura y la asfericidad de la cara anterior de la córnea (también radios máximos y mínimos) calculados siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 2.2.3.
- De un modelo de ojo de bovino anteriormente publicado [Coile and O’Keefe, 1988] se ha tomado el espesor de la córnea y el radio de la cara posterior de la córnea, además de los índices de refracción de la córnea, el cristalino y los humores acuoso y vítreo. En particular,

el espesor corneal y el radio de la segunda superficie corneal tienen valores de 0.85 mm y 15 mm respectivamente. La inclusión de estos dos valores tiene un efecto poco significativo en el cálculo de las aberraciones ópticas realizado en Zemax. Esto se debe al pequeño salto de índice de refracción que hay entre la cara posterior de la córnea y el humor acuoso, en comparación con el que existe en la primera superficie, que separa el aire de la propia córnea.

- Para determinar los valores medios en función de la edad del espesor de la cámara anterior y la longitud axial del vítreo (distancia entre la segunda cara del cristalino y la retina) se ha comprobado el porcentaje que suponen estas dos distancias con respecto a la longitud axial total del ojo en el modelo de ojo previamente mencionado [Coile and O’Keefe, 1988]. Dicho porcentaje se ha aplicado a la longitud axial media medida experimentalmente en un estudio previo en el LO·UM para los tres grupos de edad objeto de estudio [Lo Sapiro, 2015]. Los valores obtenidos son los siguientes:
 - Grupo #1 (<30 meses): cámara anterior 4.61 mm; longitud del vítreo 14.67 mm.
 - Grupo #2 ([30, 50] meses): cámara anterior 4.81 mm; longitud del vítreo 15.79 mm.
 - Grupo #3 (>50 meses): cámara anterior 4.95 mm; longitud del vítreo 16.29 mm.

2.3.1. Trazado de rayos: cálculo de aberraciones y refracción ocular

Todos los parámetros de las superficies oculares descritos arriba se han introducido en Zemax para calcular las aberraciones ópticas de cada ojo completo individual expresadas de forma de polinomios de Zernike. Para ello se ha operado de manera similar a la descrita en el apartado 2.1.5.2 (Figura 2.17).

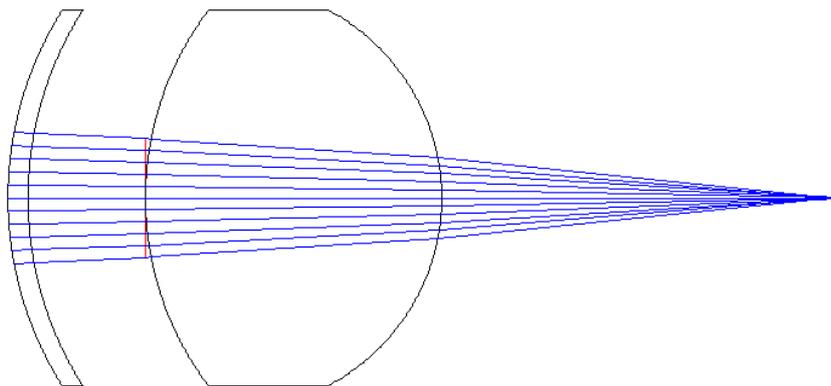


Figura 2.17. Ejemplo de trazado de rayos al combinar córnea y cristalino en Zemax. La pupila se ha representado en rojo. Los rayos de luz en azul atraviesan córnea y cristalino, focalizando “aparentemente” sobre un punto.

Cuando la cara anterior de la córnea y las dos del cristalino se consideran esféricas el procedimiento no entraña ninguna dificultad. Sin embargo, si el ojo completo se modela utilizando superficies tóricas (como realmente son) hay algunas salvedades que hay que tener en cuenta y que se describen a continuación.

Cuando las superficies que componen un sistema óptico no tienen simetría de revolución se ha usado la opción “*Biconic*”. Esta opción considera las superficies con geometría toroidal y por tanto permite introducir los radios de curvatura máximo y mínimo. Además, el *software* permite asignar a cada uno de esos radios una asfericidad determinada. Esta asfericidad se calculó también experimentalmente por lo que se utilizaron esos datos reales de asfericidad para asignarlos a los dos radios de curvatura de cada superficie tórica.

Por otra parte, como ya se ha comentado anteriormente, se desconoce la “orientación rotacional” relativa entre córnea y cristalino. Debido a ello, en esta parte del estudio se ha fijado la orientación de la córnea según se ha descrito en el apartado 2.2.2 (su posición “natural”). Cabe decir que en la mayoría de ojos estudiados (83%) el meridiano de mayor potencia dióptrica ha sido el vertical (como se verá en los resultados del Capítulo 4).

Una vez fijada la orientación corneal, se ha procedido a colocar el cristalino correspondiente a cada ojo con su meridiano de mayor potencia total paralelo al meridiano corneal de mayor potencia (posición 0°; Figura 2.18). Tras ello, las superficies del cristalino se han rotado 45° (Figura 2.19) y 90° (Figura 2.20). De esta forma el meridiano de mayor potencia total del cristalino pasa de ser paralelo al de mayor potencia corneal a situarse oblicuamente con respecto a este (45°) y posteriormente perpendicular a dicho meridiano (90°).

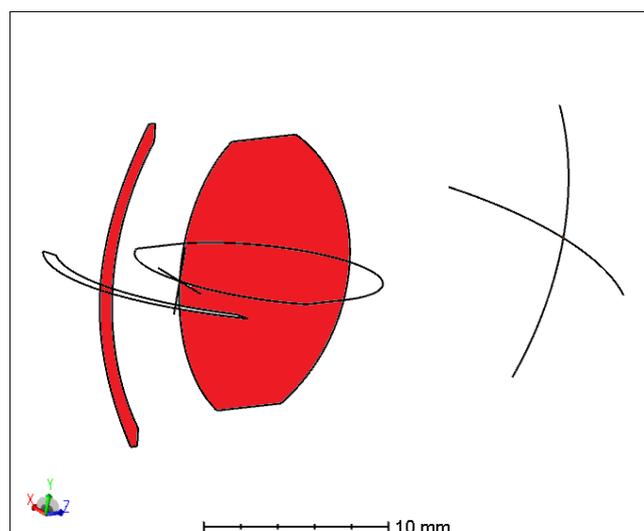


Figura 2.18. Modelo de ojo completo donde el meridiano de mayor potencia total del cristalino coincide con el meridiano de mayor potencia corneal (posición denominada 0°).

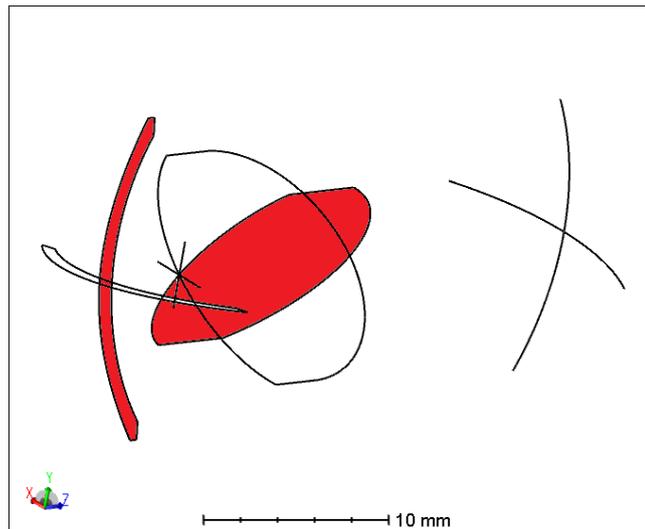


Figura 2.19. Modelo de ojo de bovino en el que el meridiano de mayor potencia total del cristalino está girado 45° con respecto al meridiano de mayor potencia corneal.

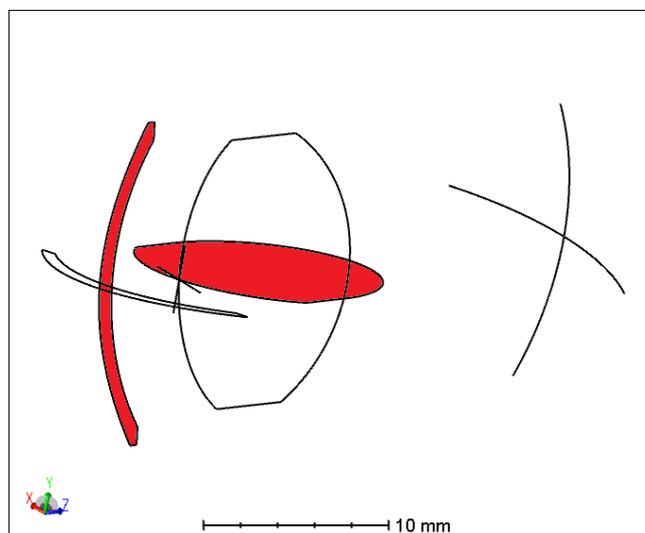


Figura 2.20. Modelo de ojo cuyo meridiano de mayor potencia total del cristalino es perpendicular al meridiano de mayor potencia corneal (posición 90°).

Para cada una de estas tres configuraciones, se han calculado los distintos valores de aberraciones de la combinación córnea-cristalino en los 20 ojos utilizados con la finalidad de determinar de manera correcta la posición relativa del cristalino con respecto a la córnea. Todo ello se expondrá detalladamente en los resultados del Capítulo 5.

Para poder realizar esta operación de girado de superficies ópticas, se ha usado una opción de Zemax denominada “*Coord Break*”. Esta herramienta permite asignar un valor de giro en torno al eje óptico de Zemax de la superficie que esté dentro de dos superficies “*Coord Break*”. Puesto que en este estudio se giró el cristalino al completo, dichas superficies se situaron en el modelo delante de la primera superficie del cristalino y detrás de la segunda.

Una vez conocida la orientación córnea-cristalino “óptima”, todos los cálculos de aberraciones en Zemax se han obtenido para pupilas circulares de 4, 6 y 8 mm de diámetro, lo

cual nos permite explorar la influencia que tiene el cambio de tamaño pupilar en las aberraciones del ojo completo.

Una vez conocidos los valores de los diferentes términos de Zernike se puede obtener la refracción clínica expresada en forma esfero-cilíndrica (es decir, esfera, cilindro y eje). La refracción se obtiene mediante una serie de expresiones matemáticas que tienen en cuenta los coeficientes de Zernike correspondientes al desenfoque (c_2^0) y al astigmatismo (c_2^2 y c_2^{-2}) [Salmon et al., 2003].

Si tenemos en cuenta que la ecuación esfero-cilíndrica tiene la forma $(S)(C)\alpha^\circ$ donde S es la esfera (en dioptrías), C la potencia del cilindro (en dioptrías) y α el eje del cilindro (en $^\circ$), se obtiene:

$$S = M - \frac{C}{2} \quad (2.5)$$

con
$$M = -\frac{2}{R^2} (2\sqrt{3} \cdot c_2^0) \quad (2.6)$$

y
$$C = -2\sqrt{J_0^2 + J_{45}^2} \quad (2.7)$$

donde
$$\begin{cases} J_0 = -\frac{2}{R^2} (\sqrt{6} \cdot c_2^2) \\ J_{45} = -\frac{2}{R^2} (\sqrt{6} \cdot c_2^{-2}) \end{cases} \quad (2.8)$$

Por su parte, la orientación del eje se calcula como:

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{J_0}{J_{45}} \right) \quad (2.9)$$

2.3.2. Pupila circular vs. pupila elíptica

De forma adicional a todo lo explicado en el apartado precedente, se han calculado también las aberraciones oculares para el caso de pupilas elípticas. Cada pupila elíptica se ha diseñado no sólo para tener el mismo área que la correspondiente circular (para, si fuera el caso, poder igualar valores de iluminación retiniana), sino para que además se mantenga la proporción del tamaño pupilar medio del bovino entre el eje vertical y el eje horizontal (10x15.5 mm) (datos medios de tamaño pupilar medidos en un estudio previo en el LO·UM).

Una pupila elíptica es la más parecida a la forma ovalada de pupila que permite utilizar Zemax (Figura 2.21). El objetivo de esta parte del experimento será estudiar qué efecto tiene dicho cambio en la forma de la pupila tanto en las aberraciones como en la refracción ocular.

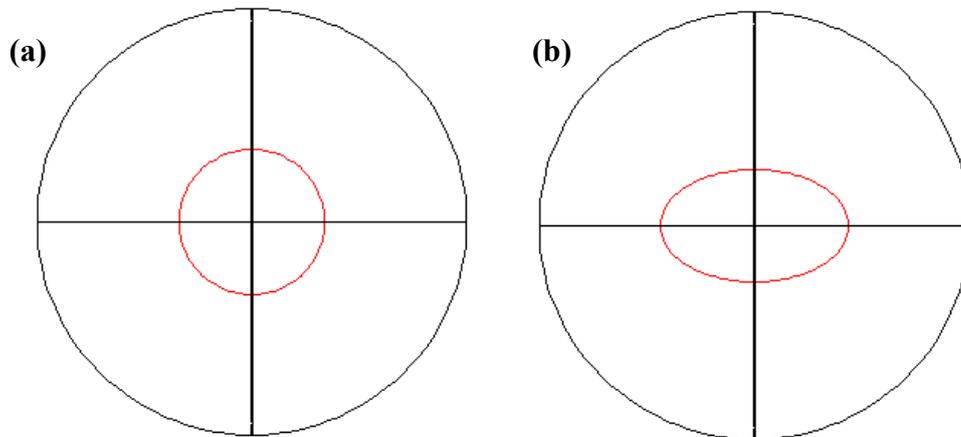


Figura 2.21. (a) Pupila circular de 6 mm de diámetro (en rojo). (b) Pupila elíptica (en rojo) con el eje mayor horizontal y con un área igual a la de la pupila circular mostrada en (a).

2.3.3. Ángulo de incidencia de la luz

Se analizarán también los efectos ópticos al cambiar la dirección de incidencia de la luz sobre la superficie de la córnea (Figura 2.22). Para ello, a la hora de realizar los cálculos de las aberraciones o la refracción se han abarcado un total de 90° en dirección horizontal (45° nasal y 45° temporal) y otros 90° en dirección vertical (45° superior y 45° inferior) en pasos de 1° . De esta manera se podrá observar la calidad visual periférica del ojo del toro de lidia en función de la excentricidad retiniana, aspecto interesante debido tanto a la forma alargada de su pupila como a la disposición de sus fotorreceptores en la dirección horizontal del *visual streak* (apartado 1.1.4).

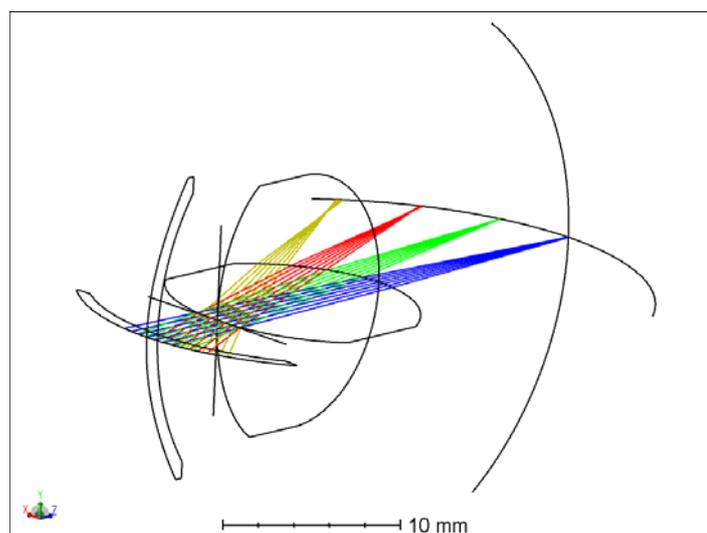


Figura 2.22. Trazado de rayos que muestra la incidencia de la luz en el ojo del bovino a distintas excentricidades en el plano horizontal.

2.3.4. Profundidad de foco

Conocida la óptica del sistema ojo completo (aberraciones, refracción), se procederá a analizar su profundidad de foco utilizando los parámetros de calidad óptica para distintos desenfoques.

Para ello se utilizará una herramienta que proporciona Zemax denominada radio-RMS (del inglés *RMS-ratio*). Este parámetro es una medida realista de la resolución de una imagen al incluir el efecto de las aberraciones. Esencialmente mide cuán eficiente es la concentración de la luz en la imagen. Se calcula como una desviación cuadrática media entre la posición de los rayos que forman la imagen y el centro geométrico de ésta. Así, cuanto más nítida sea una imagen (y por tanto más concentrada esté la luz) menor será el valor del radio-RMS. Por el contrario, para una imagen de baja calidad (i.e. desenfocada, aberrada, poco nítida,...) la luz tendrá “mucho dispersión” y el valor del parámetro será mayor.

También se utilizará la MTF (del inglés *Modulation Transfer Function*) que informa sobre cómo pasan los contrastes del objeto a la imagen a través del sistema óptico, en función de las distintas resoluciones (Figura 2.23). Concretamente se calculará el área bajo la MTF para obtener un único valor numérico que nos informe cuantitativamente y de manera sencilla sobre la calidad óptica del ojo para cada una de las condiciones experimentales de trabajo. El área bajo la MTF se calculará hasta unas resoluciones máximas de 6 y 12.4 ciclos/grado. Estos valores se corresponden respectivamente con los valores de la agudeza visual en el ojo del bovino reportados en la literatura: 0.41 [Heffner and Heffner, 1992] y 0.2 [Lo Sapio, 2015].

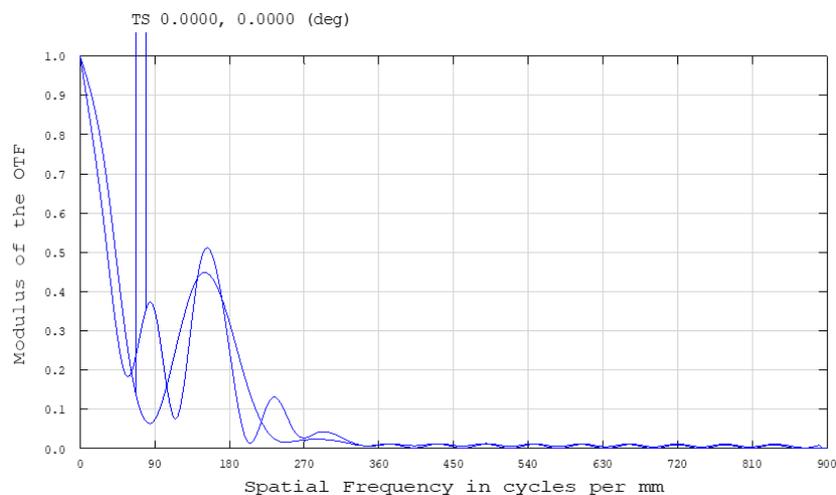
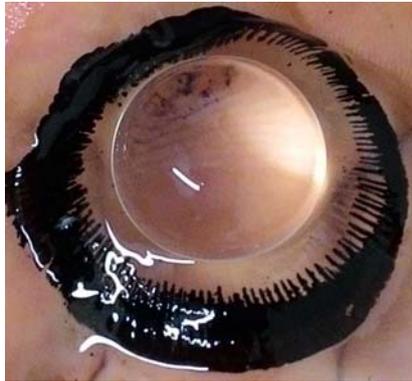


Figura 2.23. Ejemplo de MTF obtenida en Zemax.

Resultados I



CAPÍTULO 3

Resultados I. Cristalino del Toro de Lidia

Este capítulo se centra en los resultados correspondientes al cristalino y su relación con la edad. Por una parte se presentan los datos geométricos obtenidos a partir del procesado digital de las imágenes del cristalino. Éstos incluyen radios de curvatura, espesores y asfericidades. Por otra parte también se muestran los resultados obtenidos tanto para aberraciones de bajo orden (astigmatismo) como de alto orden (aberración esférica). Los datos aquí expuestos proporcionan información para entender la calidad óptica del cristalino del toro de lidia y su evolución con la edad. También permitirán estimar la influencia de dichos parámetros fisiológicos y ópticos tanto en la correspondiente formación de imagen como en la refracción ocular.

3.1. Geometría del cristalino

3.1.1. Radios, espesor y potencia

La Figura 3.1 muestra los valores medios del radio de curvatura de las caras anterior (Figura 3.1a) y posterior (Figura 3.1b) del cristalino en función de la edad para todas las muestras medidas. Los datos muestran un aumento lineal significativo para el anterior ($R=0.53$, $p<0.0001$). En el posterior hay cambios, pero no son tan marcados ($R=0.43$, $p=0.002$). Los valores del primero oscilaron entre 10.25 y 15.92 mm (media: 12.86 mm; desviación estándar: ± 1.40 mm). Para la cara posterior, los datos se agrupan en un rango entre

-8.18 mm y -9.70 mm (media: -8.96 ± 0.38 mm). Nótese que en la Figura 3.1b los valores aparecen en valor absoluto. En ambas gráficas se puede observar que hay una mayor variabilidad interindividual en los cristalinos correspondientes a animales de mayor edad.

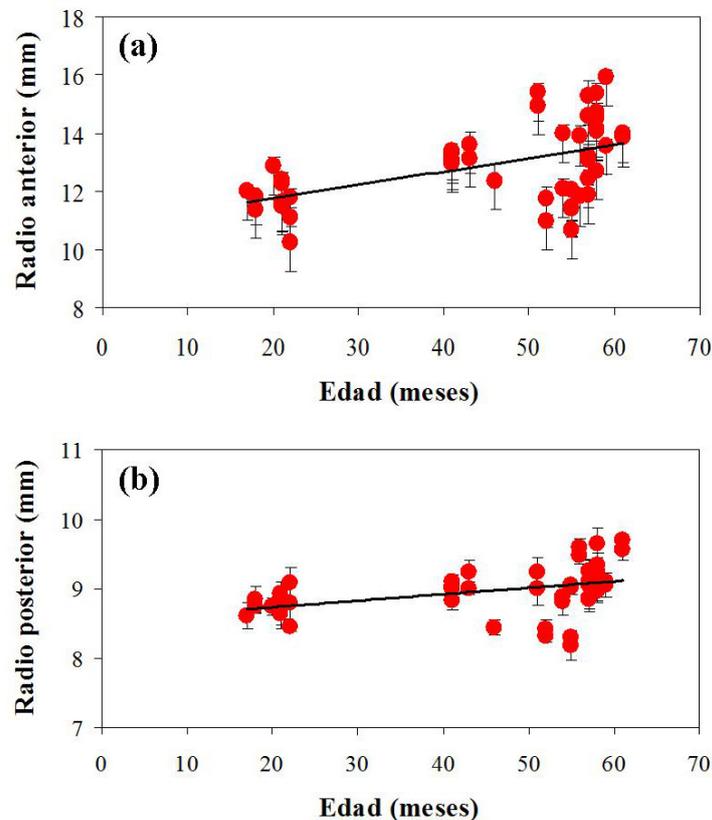


Figura 3.1. Valores del radio de la primera (a) y de la segunda cara (b) del cristalino en función de la edad para los 49 ojos analizados. Cada símbolo es el promedio para todas las proyecciones del cristalino y las barras de error corresponden a la desviación estándar. La línea continua de cada gráfica representa el mejor ajuste lineal ($R_1=0.05*Edad+10.86$; $R_2=0.01*Edad+8.54$).

La Figura 3.2 presenta los espesores centrales en función de la edad para los mismos cristalinos que en la figura anterior. Se observa un aumento con la edad que vuelve a ser significativo ($R=0.53$, $p<0.0001$).

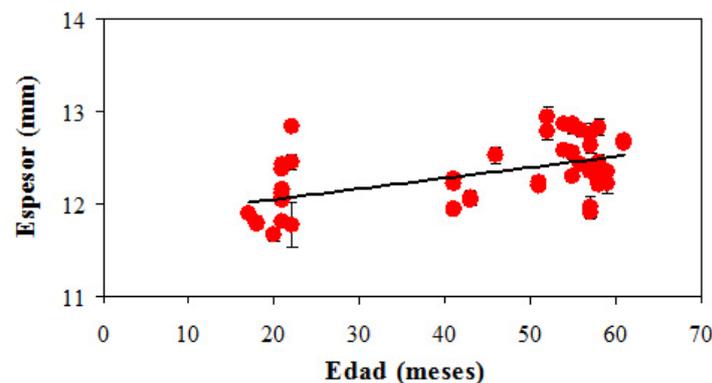


Figura 3.2. Espesor del cristalino en función de la edad. Los símbolos y las barras de error representan lo mismo que en la Figura 3.1. Mejor ajuste lineal: $E=0.01*Edad+11.82$.

Para profundizar un poco más en el posible efecto de la edad, en la Figura 3.3 se han representado los valores medios del radio anterior y del espesor para los tres grupos de edad definidos en el Capítulo 2. El análisis de la varianza muestra que tanto el radio de curvatura como el espesor son estadísticamente diferentes entre el grupo más joven y el de más edad ($p=0.009$ para el radio; $p=0.043$ para el espesor). En particular, la dispersión encontrada para el radio de curvatura en el grupo de mayor edad es claramente mayor que en los otros dos grupos, posiblemente debido a que el número de cristalinicos analizados es bastante superior.

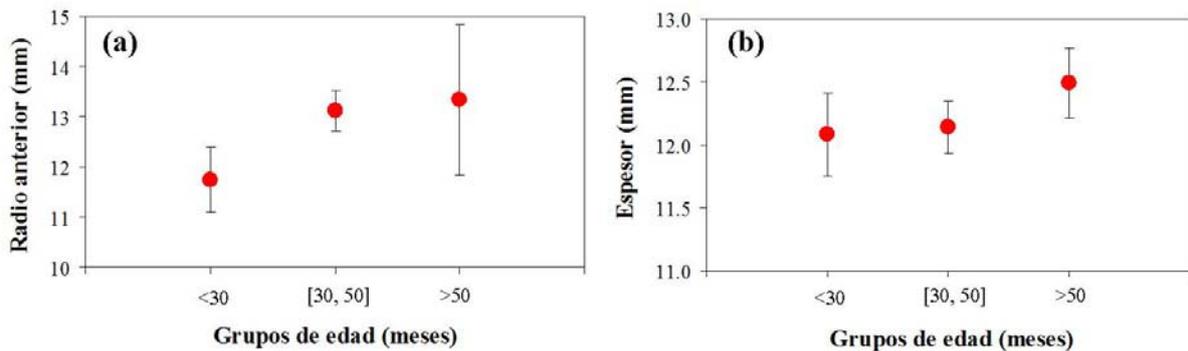


Figura 3.3. Valores promedio del radio de la primera cara (a) y del espesor (b) del cristalino para los tres grupos de edad.

Con el objeto de analizar la posible simetría entre el OD y el OI, la Figura 3.4 compara los valores de espesor y radio de la cara posterior entre ambos ojos. Los datos muestran una correlación lineal significativa ($R=0.88$, $p<0.0001$ y $R=0.95$, $p<0.0001$, respectivamente). El comportamiento de la cara anterior fue similar ($R=0.79$, $p<0.0001$). En estas gráficas solamente se han representado los datos correspondientes a los 21 pares de cristalinicos de ojos contralaterales.

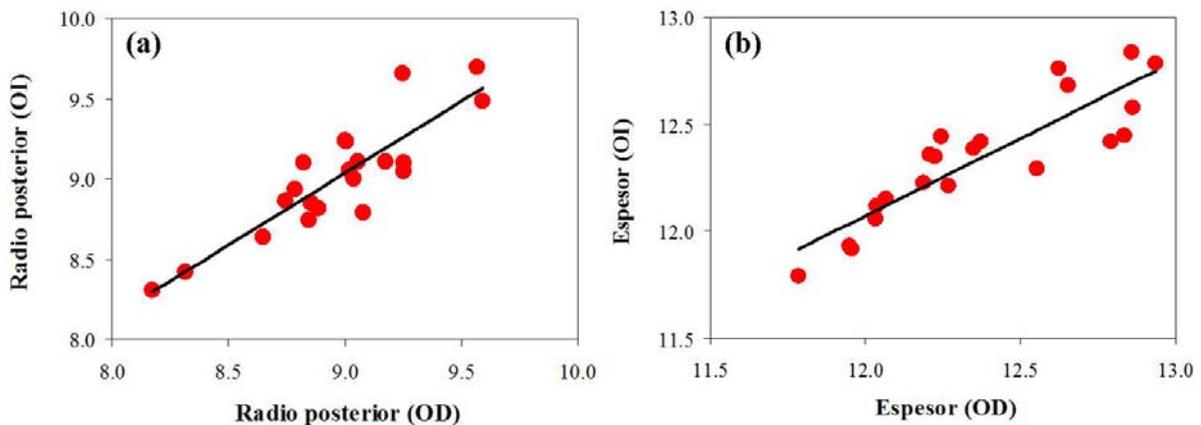


Figura 3.4. Comparación entre cristalinicos de ojos contralaterales. Radio de la cara posterior (a); espesor (b). Las líneas representan el mejor ajuste lineal para cada conjunto de datos ($R_{2OI}=0.90*R_{2OD}+0.97$; $E_{OI}=0.72*E_{OD}+3.39$).

Como ya se indicó en el Capítulo 2, utilizando los datos geométricos de los cristalinos medidos (radios y espesores) y suponiendo un índice de refracción constante, se puede calcular la potencia total del cristalino para cada meridiano. Aunque esa potencia total depende del meridiano (véase apartado 3.2), un valor medio nos puede dar una idea sobre la relación entre la “potencia global” de ambos cristalinos de un mismo animal. En ese sentido la potencia media total para parejas de cristalinos se ha representado en la Figura 3.5, donde se observa que existe una correlación lineal estadísticamente significativa ($R=0.88$, $p<0.0001$). Esta relación es esperable debido a las correlaciones de los diferentes parámetros geométricos (véase la Figura 3.4).

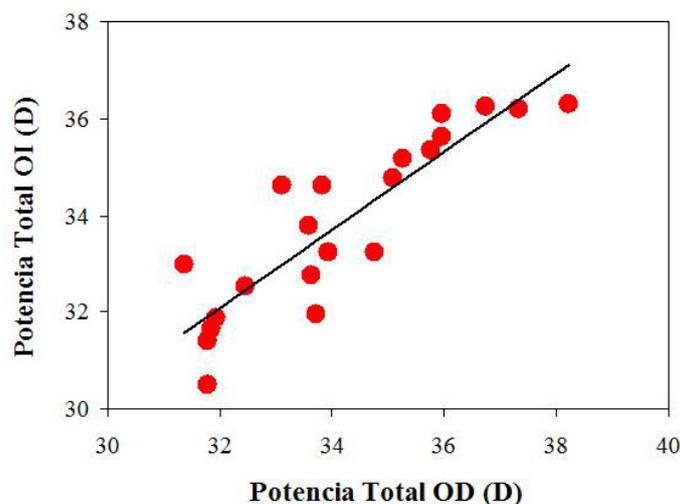


Figura 3.5. Potencia total media del OD y OI. El mejor ajuste lineal es $P_{T-OI}=0.81*P_{T-OD}+6.32$.

3.1.2. Asfericidad

Los resultados de asfericidad para ambas caras del cristalino se han representado en la Figura 3.6. Aunque la asfericidad de la cara anterior aumenta ligeramente con la edad, este cambio no es estadísticamente significativo ($p=0.08$). Sin embargo, en la cara posterior hay una disminución lineal y significativa ($R=0.40$, $p=0.005$).

Los valores para la primera cara fueron siempre positivos, oscilando entre $+0.08$ y $+2.02$, con una media de $+1.04\pm 0.57$ (superficie oblata). Por su parte la reducción de asfericidad de la cara posterior con la edad hace que pase de un valor positivo en los animales más jóvenes ($+0.10\pm 0.18$ en media) hasta un valor ligeramente negativo en animales adultos (media: -0.07 ± 0.15), es decir, está evolucionando de una forma oblata hacia una prolata. Los valores medios de ambas caras del cristalino para los tres grupos de edad se muestran en la Figura 3.7.

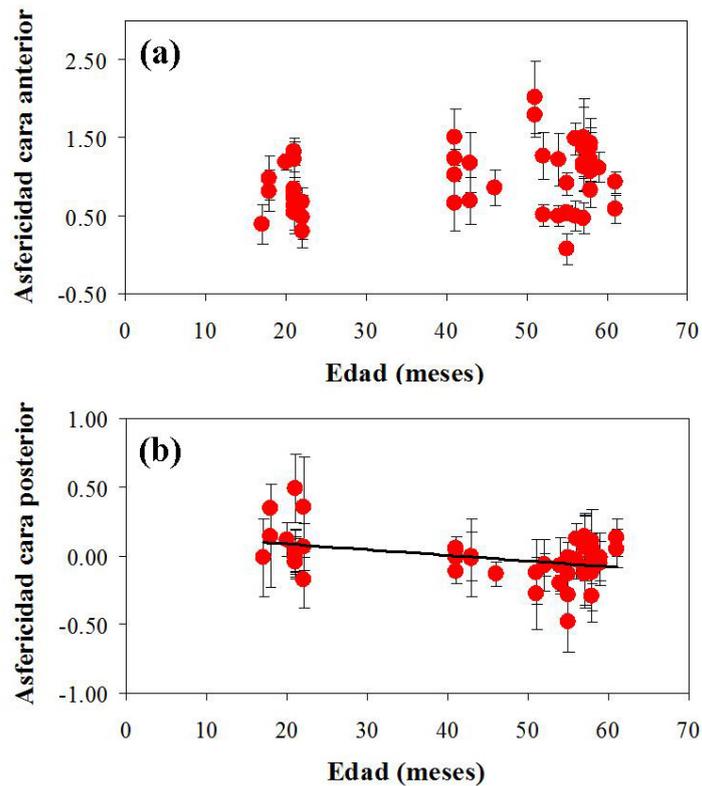


Figura 3.6. Valores de asfericidad para las dos caras del cristalino (anterior (a); posterior (b)) en función de la edad. Los símbolos representan lo mismo que en las figuras anteriores. La línea continua es el mejor ajuste lineal ($k_2 = -0.004 * \text{Edad} + 0.167$).

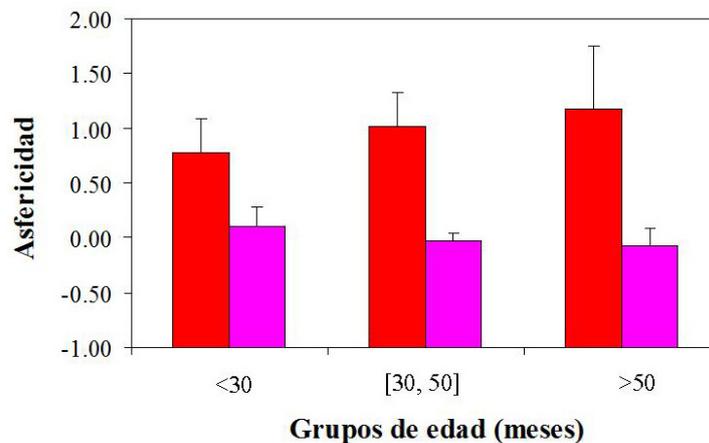


Figura 3.7. (a) Valores medios de asfericidad de las caras anterior (rojo) y posterior (magenta) del cristalino en función de los grupos de edad. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de todas las muestras de cada grupo.

La asfericidad de los ODs y los OIs también presenta una relación lineal significativa ($R=0.44$, $p=0.04$). Como ejemplo de este hecho en la Figura 3.8 se presenta dicha relación para la cara posterior del cristalino.

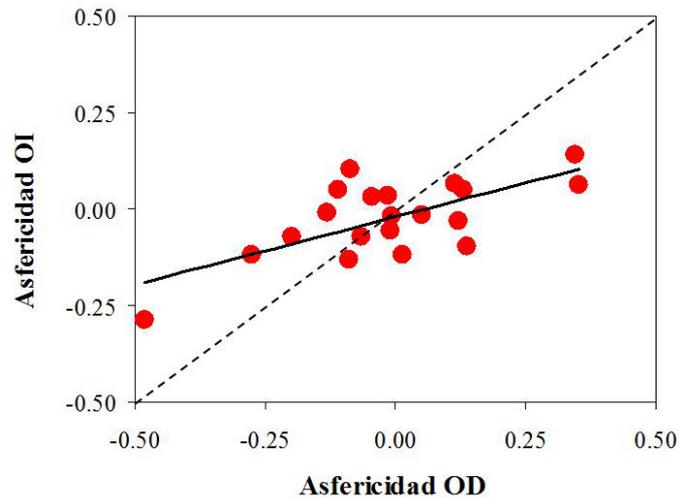


Figura 3.8. Asfericidad de la cara posterior del OI en función de la del OD. El mejor ajuste lineal es: $k_{OI}=0.349*k_{OD}+0.004$. La línea discontinua representa 1:1.

3.1.3. Radios y asfericidades máximos y mínimos

El radio de curvatura de las superficies del cristalino no es constante en todos sus meridianos sino que, al igual que sucede con la asfericidad de dichas superficies, va cambiando progresivamente desde un máximo hasta un mínimo. Ambos valores extremos están situados a lo largo de meridianos que forman aproximadamente 90° entre sí. Además, la dirección del meridiano correspondiente al radio máximo de la cara anterior es cercana ($\sim\pm 20^\circ$) a la del radio máximo en valor absoluto de la cara posterior (Figura 3.9). Algo similar se ha encontrado también para los radios mínimos de ambas superficies.

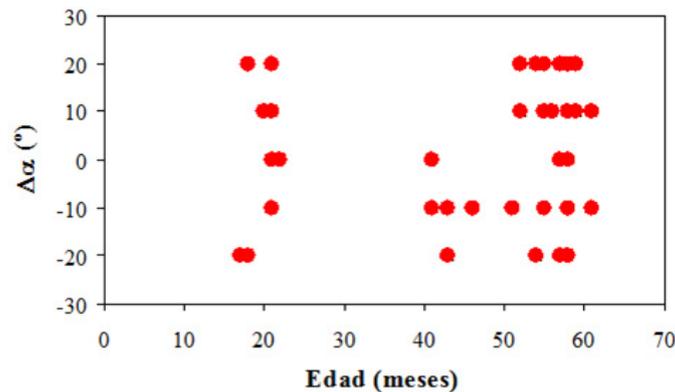


Figura 3.9. Ángulo entre el meridiano con el radio de curvatura máximo de la cara anterior del cristalino y de la cara posterior.

El valor medio del radio de curvatura máximo de la cara anterior (posterior, en valor absoluto) del cristalino es de 13.33 ± 1.46 mm (9.23 ± 0.35 mm), mientras que el mínimo tiene un valor de 12.41 ± 1.34 mm (8.69 ± 0.36 mm). Divididos por grupos de edad (Figura 3.10) los valores del radio de curvatura máximo de la superficie anterior del cristalino (posterior, en

valor absoluto) son los siguientes: 12.07 ± 0.63 mm (9.05 ± 0.19 mm) para el grupo #1; 13.62 ± 0.39 mm (9.12 ± 0.28 mm) para el grupo #2 y 13.89 ± 1.54 mm (9.35 ± 0.39 mm) para el grupo #3.

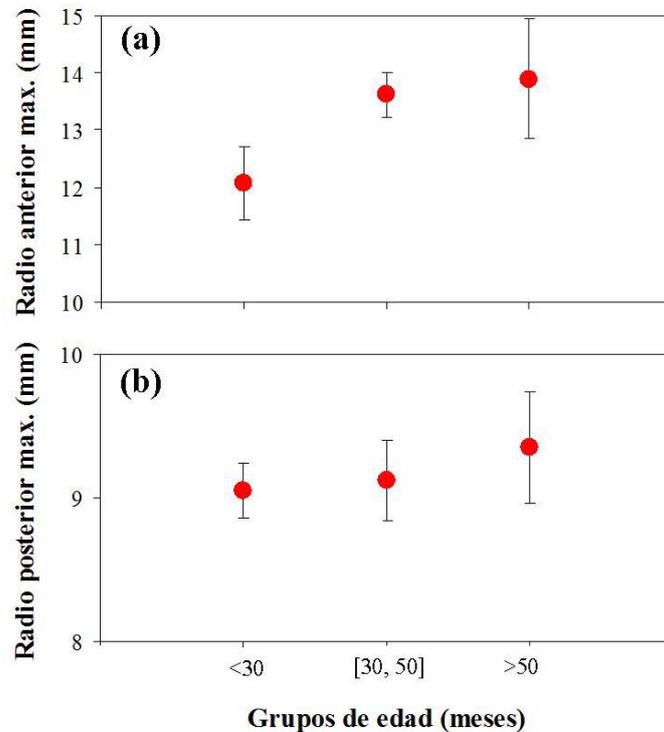


Figura 3.10. Valores promedio de los radios de curvatura máximo de la cara anterior (a) y posterior del cristalino (b) para los distintos grupos de edad. Las barras de error representan la desviación estándar.

Por su parte, la distribución por grupos de edad para el radio de curvatura mínimo de la cara anterior del cristalino (posterior, en valor absoluto) han sido los siguientes: 11.37 ± 0.65 mm (8.46 ± 0.18 mm) para el grupo #1; 12.68 ± 0.51 mm (8.77 ± 0.25 mm) para el grupo #2 y 12.87 ± 1.46 mm (8.79 ± 0.41 mm) para el grupo #3 (no mostrados).

En cuanto a la asfericidad, el valor máximo promedio de la cara anterior (posterior) del cristalino es de $+1.49 \pm 0.71$ ($+0.28 \pm 0.22$), mientras que la asfericidad mínima tiene un valor medio de $+0.63 \pm 0.49$ (-0.35 ± 0.25). Divididos por grupos de edad los valores medios de asfericidades máximas para la cara anterior (posterior) del cristalino son los siguientes: $+1.16 \pm 0.30$ ($+0.43 \pm 0.29$) para el grupo #1; $+1.63 \pm 0.44$ ($+0.16 \pm 0.10$) para el grupo #2 y $+1.62 \pm 0.85$ ($+0.23 \pm 0.17$) para el grupo #3 (Figura 3.11). En cuanto a la asfericidad mínima, los valores medios separados en los tres grupos de edad fueron respectivamente: $+0.39 \pm 0.39$ (-0.23 ± 0.18), $+0.55 \pm 0.29$ (-0.29 ± 0.22) y $+0.77 \pm 0.53$ (-0.42 ± 0.26).

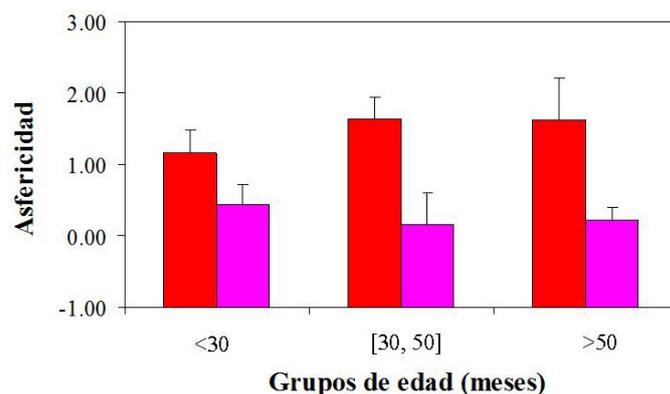


Figura 3.11. Valores promedio de la asfericidad máxima de la cara anterior (rojo) y posterior del cristalino (magenta) para los distintos grupos de edad. Las barras de error representan la desviación estándar.

En la primera superficie del cristalino la asfericidad máxima es positiva y coincide con el radio máximo (el más plano) por lo que dicha asfericidad tiende a compensar la diferencia en curvatura con respecto al radio más curvado, en el cual se sitúa la asfericidad más pequeña (que también es positiva). En la cara posterior del cristalino, la asfericidad máxima (>0) también coincide con el radio de curvatura más plano (el mayor en valor absoluto) y la asfericidad mínima (este caso negativa) con el radio más curvado (el menor en valor absoluto). Como era de esperar, los valores de asfericidad y de radio de curvatura máximos y mínimos siguen un patrón similar a los valores medios globales de dichos parámetros con respecto a la edad.

3.2. Aberraciones

3.2.1. Aberraciones de bajo orden: Astigmatismo

La potencia total del cristalino se ha calculado para cada meridiano utilizando las ecuaciones 2.1 y 2.2. La Figura 3.12 muestra las potencias para todos los meridianos en dos de los cristalinios estudiados, con 21 y 61 meses de edad respectivamente. Debido a la manipulación del cristalino para realizar el presente experimento, se desconoce la orientación natural de éste y por tanto la orientación del eje del astigmatismo. Es por ello que se ha hecho coincidir el origen de los ángulos con el valor mínimo de potencia para así poder hacer comparaciones directas.

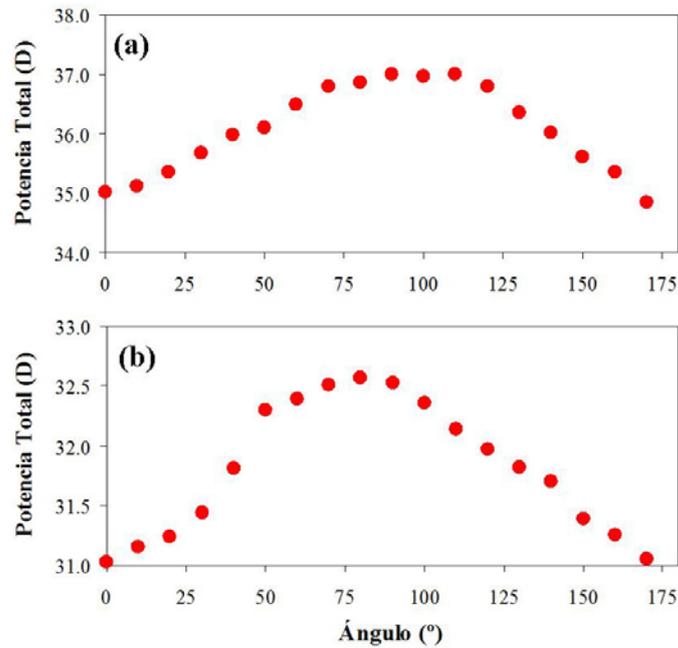


Figura 3.12. Potencia total del cristalino para cada uno de los meridianos medidos. Las muestras corresponden a cristalinos de 21 (a) y 61 meses (b).

Se puede apreciar cómo la potencia de los diferentes meridianos se sitúa entre un máximo (aproximadamente a 90°) y dos mínimos (0/170°). Éste es el típico patrón de potencias de un sistema astigmático, donde el astigmatismo se obtiene a partir de la diferencia entre los valores de potencia máximo y mínimo. El astigmatismo así calculado para todos los cristalinos medidos en este estudio se muestra en la Figura 3.13. Este parámetro no mostró ninguna relación significativa con la edad. Se obtuvieron valores entre un mínimo de 0.54 D y un máximo 2.68 D, con una media de 1.48 ± 0.57 D. Por su parte, en la Figura 3.13b se muestran las medias para los tres grupos de edad antes citados, donde el análisis de la varianza corrobora la ausencia de cambios en el astigmatismo del cristalino con la edad.

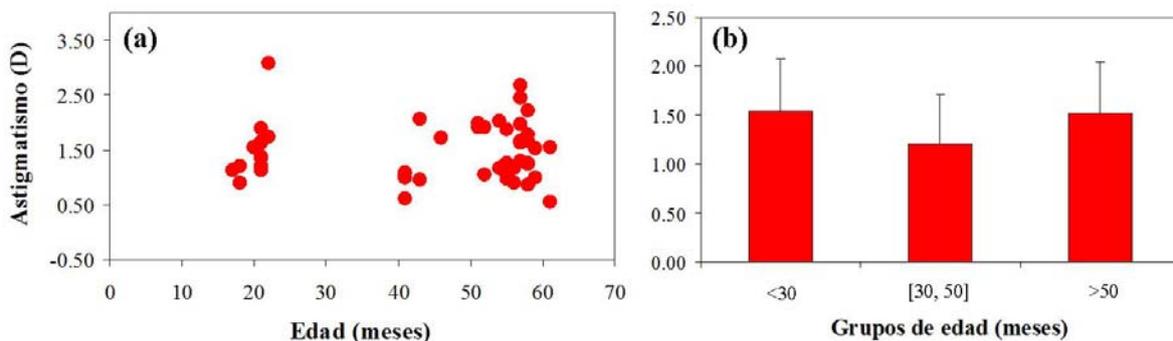


Figura 3.13. Valores individuales (a) y promedio (b) del astigmatismo del cristalino en función de la edad.

3.2.2. Aberraciones de alto orden: Aberración esférica

A partir también de los datos geométricos de curvatura, espesor y asfericidad del cristalino mostrados en el apartado 3.1, se calculó la aberración esférica para cada cristalino con el método descrito extensamente en el Capítulo 2. Dicho término de aberración se calculó para tres tamaños de pupila (4, 6 y 8 mm). Los resultados para una pupila de 6 mm están mostrados en la Figura 3.14. De nuevo se puede observar que hay una relación entre la aberración esférica y la edad, de forma que ésta se reduce de forma lineal y significativa ($R=0.63$, $p<0.0001$). Los valores se extienden en el rango entre $+0.28$ y $+0.53$ μm (media: 0.39 ± 0.05 μm). El comportamiento fue similar para 4 y 8 mm ($R=0.63$, $p<0.0001$), aunque la reducción con la edad con 4 mm no es tan pronunciado (valores entre $+0.05$ y $+0.10$ μm). Para el caso de 8 mm el cambio es más pronunciado ($AE_{8\text{mm}}=-0.008*\text{Edad}+1.675$), con valores que se situaron entre un máximo y un mínimo de 1.90 y 0.97 μm , respectivamente.

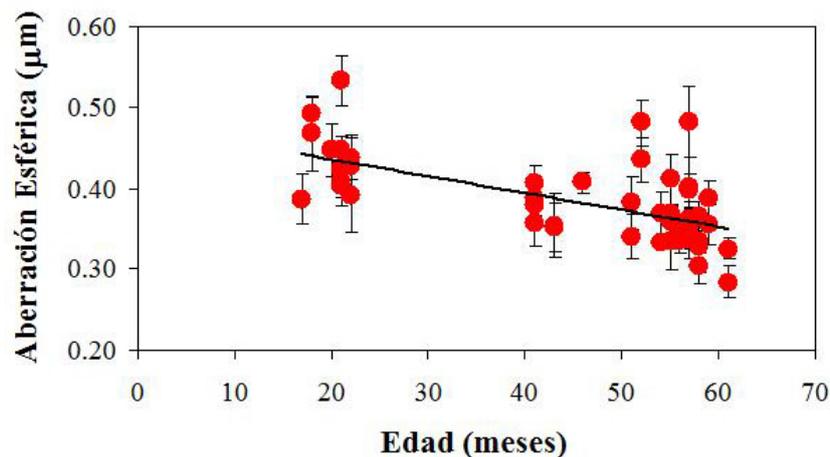


Figura 3.14. Aberración esférica del cristalino en función de la edad para una pupila de 6 mm. Cada símbolo es el promedio para todas las proyecciones del cristalino y las barras de error corresponden a la desviación estándar. La línea continua representa el mejor ajuste lineal ($AE_{6\text{mm}}=-0.002*\text{Edad}+0.477$).

Al igual que ocurre con los radios de curvatura y el espesor, en el caso de la aberración esférica existe también simetría entre ojos contralaterales, como muestra la Figura 3.15. La correlación vuelve a ser lineal y significativa ($R=0.67$, $p<0.001$). El comportamiento de las pupilas de 4 y 8 mm fue similar.

Hay que destacar que en todos los casos e independientemente de la edad, el valor de la aberración esférica fue positivo (véase Figura 3.16a). Es decir, los rayos que atraviesan la periferia del cristalino focalizan antes sobre el eje óptico que los rayos que atraviesan la parte central de éste. Además, y como era de esperar hay un aumento en la aberración con el tamaño de la pupila. Como ya indicaban los valores individuales, los cambios con la edad son

tanto más pronunciados cuanto mayor es el tamaño de pupila, lo cual queda reflejado en la Figura 3.16b.

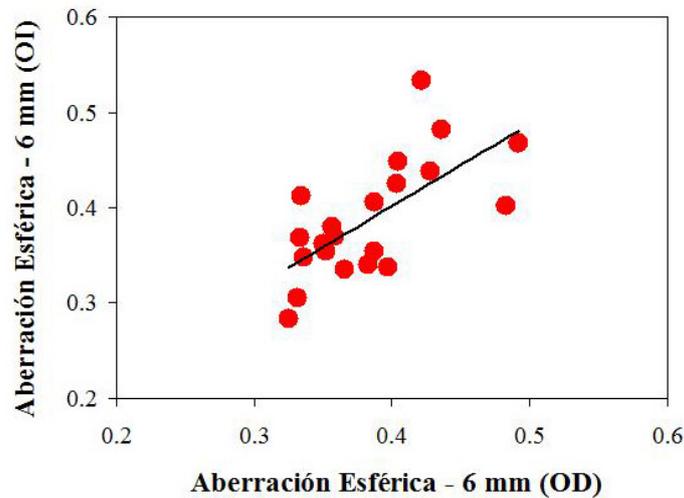


Figura 3.15. Relación entre la aberración esférica del OD y del OI. El mejor ajuste lineal corresponde a la línea continua ($AE_{OI}=0.86*AE_{OD}+0.06$).

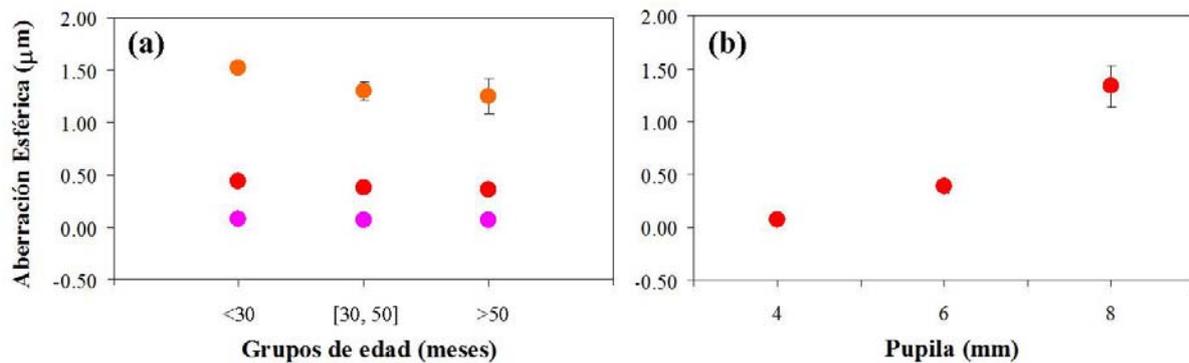


Figura 3.16. (a) Promedios de la aberración esférica en los tres grupos de edad para 4 (magenta), 6 (rojo) y 8 mm (naranja). (b) Valores medios de la aberración esférica para los mismos tres tamaños de pupila.

Una vez conocida la aberración esférica en función de la edad y del tamaño de la pupila, la Figura 3.17 presenta el CAE. Como ya se dijo en el Capítulo 2, este parámetro representa el cambio en la aberración esférica cuando se considera nula la asfericidad de ambas caras del cristalino, es decir, cuando se suponen puramente esféricas en lugar de asféricas.

Este CAE tiene variaciones individuales (entre 3 y 38%) pero es positivo en todos los casos, indicando que el efecto de añadir la asfericidad de las caras del cristalino provoca un aumento de la aberración esférica a valores más positivos.

Finalmente, aunque en este trabajo no se entrará en detalles sobre el resto de las aberraciones del cristalino, es interesante destacar que para una pupila de 6 mm la aberración esférica representa el 18% del total y el astigmatismo (bajo orden) representa el 80%.

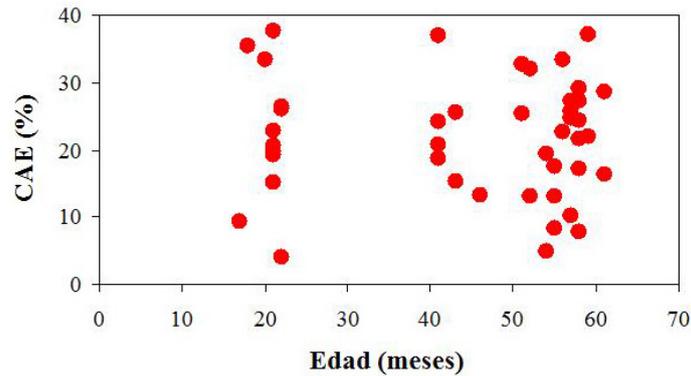


Figura 3.17. Porcentaje de variación de la aberración esférica (pupila de 6 mm de diámetro), cuando se tiene en cuenta la asfericidad de las superficies.

3.3. Discusión

En este primer capítulo de resultados se han utilizado imágenes de retro-iluminación para analizar tanto la geometría como las aberraciones ópticas del cristalino del toro de lidia en función de la edad. Hasta donde el autor de esta Tesis Doctoral sabe, hasta ahora no se habían realizado estudios de este tipo en el cristalino del bovino de lidia. Los estudios sobre el cristalino de bovinos en general son escasos y nunca tan detallados como lo que aquí se muestra. Los posibles cambios con la edad tampoco se han explorado anteriormente. Es por ello que algunos de los resultados aquí presentados no se pueden comparar de forma precisa con literatura previa. Sin embargo la comparación de forma puntual con el cristalino humano puede aportar información sobre la evolución de esta estructura ocular para lograr una calidad visual del ojo completo que, en principio y de forma natural se podría suponer optimizada.

Las muestras aquí estudiadas muestran que con la edad el radio de la primera cara del cristalino del toro de lidia tiende a hacerse más plano, es decir aumenta (del orden de 0.05 mm/mes). Los cambios más notables tienen lugar entre los grupos #1 y #2, donde hay un aumento del 13% (de 12.07 a 13.62 mm). Entre los grupos #2 y #3 la diferencia es solamente del 2% (la variabilidad interindividual en el grupo #3 es también bastante mayor). En la cara posterior la variación con la edad es menor (0.01 mm/mes) y los valores entre los grupos #1 y #3 aumentan un 3.3%. Para ambas caras se ha encontrado una relación lineal significativa entre ODs y OIs.

En concreto, en el presente trabajo los valores medios fueron 12.86 ± 1.40 mm para la cara anterior y -8.96 ± 0.38 mm para la posterior. Estos valores son similares a los obtenidos en cristalinos de vaca: 12.98 ± 0.72 y -9.22 ± 10.64 mm para la 1ª y 2ª superficie respectivamente [Sivak and Kreuzer, 1983]. Otra fuente los establece como 11.3 y -9.7 mm [Sisson et al., 1975]. En ninguno de ellos se aportan datos sobre la edad de los animales. Estos valores

promedio de los radios del cristalino nos indican que al igual que en el humano, la segunda cara del cristalino es más curvada que la primera (es decir, la superficie posterior tiene un radio de curvatura claramente menor que la primera).

Como cabe esperar, el espesor del cristalino del bovino de lidia también aumenta de forma significativa con la edad (0.01 mm/mes). Los valores medios van desde 12.08 ± 0.33 mm en el grupo #1 hasta 12.49 ± 0.28 mm en el #3. En la literatura se han usado diferentes técnicas para medir el espesor del cristalino (histología, fotografías ex-vivo, ultrasonidos). Aunque el rango se sitúa habitualmente entre 12 y 15 mm [Sivak and Kreuzer, 1983, Samuelson, 1999], otros autores obtienen valores más bajos: 8.2-9.4 mm [El-Maghraby et al., 1995]. También se ha mostrado que para edades similares este espesor depende de la raza de bovino estudiada (17.8-19.2 mm) [Potter et al., 2008].

De forma general y comparando estos datos con la geometría del cristalino humano, se puede afirmar que la cara posterior del cristalino del bovino es claramente “más plana” que la del humano (6 mm en media). Además, el espesor puede llegar incluso a triplicarse [Brown, 1974].

La asfericidad de la primera cara del cristalino es positiva (elipse oblata) y no muestra una dependencia significativa con la edad (valor medio: $+1.04 \pm 0.57$). Por su parte, en la segunda cara pasa de un valor positivo ($+0.10 \pm 0.18$ en el grupo #1) hasta uno negativo (forma prolata) en el grupo #3 (media: -0.07 ± 0.15). Esto indica que la geometría de la cara posterior es cercana a una esfera.

En la literatura no se han encontrado datos sobre la asfericidad del cristalino del bovino, pero en humanos se ha reportado que no cambia con la edad y que es negativa en ambas superficies. De hecho, estos valores negativos son mucho más altos en humanos (-4 y -3 respectivamente) [Dubbelman and van der Heijde, 2001] que los encontrados aquí para el bovino. Esto indica que las caras del cristalino del bovino están notablemente más cerca de tener una geometría esférica que lo que lo están las del humano, cuya forma es claramente una hipérbola.

Aunque se ha aludido a valores promedios de radios y asfericidades, las superficies del cristalino no tienen geometría de revolución. Éstas presentan radios máximo y mínimo que son los responsables del astigmatismo. En cada cara, las direcciones de estos valores extremos son aproximadamente cruzadas. Además, es interesante también destacar que las direcciones de estos radios extremos de ambas caras tienden a ser paralelas. El astigmatismo medio del cristalino resultó ser 1.48 ± 0.57 D y sin dependencia con la edad.

Por su parte, la aberración esférica del cristalino del toro de lidia fue positiva para todos los ojos analizados (promedios de $+0.07 \pm 0.01$, $+0.39 \pm 0.06$ y $+1.33 \pm 0.20$ μm para 4, 6 y 8 mm de pupila respectivamente). Entre ojos contralaterales se encontró una correlación significativa. Además esta aberración esférica disminuye con la edad, y la variación es más pronunciada para 8 mm (aproximadamente -0.1 $\mu\text{m}/\text{año}$).

Una aberración esférica positiva implica que los rayos que atraviesan la parte central del cristalino focalizan sobre el eje óptico detrás de los rayos que atraviesan la periferia de éste. Esto es acorde con las asfericidades encontradas (positiva en una cara y próxima a cero en la otra), pues esa geometría oblata presentará más curvatura en la zona de la periferia que en el centro.

El estudio de la influencia de la asfericidad de las caras del cristalino en la aberración esférica ha mostrado que el CAE es siempre positivo. Es decir, la inclusión de la asfericidad hace que la aberración esférica total se haga más positiva. Este CAE es más bien moderado (17% en media) como se podría esperar de unas superficies en las que la asfericidad en media es pequeña (ligeramente positiva en la cara anterior y prácticamente nula en la posterior).

El único experimento que muestra medidas de aberración esférica en bovinos es el de Sivak y Kreuzer [Sivak and Kreuzer, 1983]. Estos autores utilizaron una técnica de trazado de rayos “real” (*laser ray tracing*) para calcular la aberración esférica del cristalino de vaca (aislado y en condiciones experimentales similares a las aquí utilizadas). Según dicho estudio, dicha aberración es nula, hecho que contrasta en gran medida con los resultados aquí expuestos. Nuestros resultados muestran que tanto los radios de curvatura como las asfericidades dependen tanto del meridiano elegido como de la edad. Es por ello que el desconocimiento de la edad de la muestra y la elección al azar de un único meridiano podría haber subestimado esos resultados.

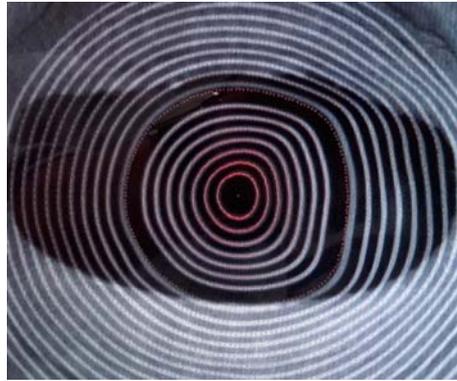
Es de interés destacar que ya Sivak y Kreuzer en su publicación de 1983 indicaron que los posibles cambios que se producen con la edad podrían ser de utilidad en el análisis de la progresión de la calidad óptica del ojo completo. También apuntaron al tamaño de la pupila ligado a las condiciones ambientales de iluminación como aspecto relevante. Finalmente, indicaron que la asimetría en la forma de la pupila era un hecho sin explorar que podría ser de importancia en la combinación de las aberraciones de la córnea con las del cristalino. Todos estos aspectos se han abordado extensamente en este trabajo como se irá viendo en los capítulos sucesivos.

A diferencia del bovino, los cambios en las aberraciones del cristalino humano con la edad (en especial la esférica) se han explorado ampliamente en diferentes condiciones

experimentales, aunque la esférica siempre se ha mostrado dominante [Roorda and Glasser 2003]. En particular, en cristalinos aislados (condiciones ex-vivo), Glasser y Campbell reportaron que con la edad los cambios en la esférica son muy pronunciados, pasando de ser negativa en sujetos jóvenes a positiva en sujetos de edad avanzada [Glasser and Campbell, 1999]. Sin embargo, medidas en vivo (diferencia entre el ojo completo y la córnea) indican que la aberración esférica del cristalino adulto tiende a ser claramente negativa [Taberner et al., 2007].

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

Resultados II



CAPÍTULO 4

Resultados II. Córnea del Toro de Lidia

En este segundo capítulo de resultados nos vamos a ocupar de los parámetros geométricos de la córnea (radio de curvatura y asfericidad), así como de las aberraciones (bajo y alto orden). Como ya se explicó en el Capítulo 2, la información se obtendrá a partir del procesado de las topografías corneales exclusivamente de la primera cara de dichas córneas. Para todos los parámetros se analizará su dependencia con la edad.

4.1. Geometría de la córnea

4.1.1. Radios y potencia

La Figura 4.1a presenta los valores del radio de curvatura promedio de la primera superficie corneal en función de la edad para todos los ojos medidos. Como se verá posteriormente la cornea presenta astigmatismo, pero en primera instancia este “valor promedio” aporta información global sobre los cambios que la córnea sufre con la edad. Se observa un aumento con la edad que es estadísticamente significativo ($R=0.62$, $p<0.0001$). Los valores oscilan entre 13.09 y 16.44 mm (media: 14.72 ± 0.65 mm). De forma adicional, en la Figura 4.1b se han representado los radios medios para los tres grupos de edad previamente definidos. El análisis de los datos muestra que este radio de curvatura es estadísticamente diferente tanto entre el grupo #1 (el más joven) y el #3 (el de más edad) ($p=0.001$), como entre el #2 y el #3 ($p=0.012$). Nótese que la variabilidad interindividual es similar en todos los grupos de edad (véanse las barras de error).

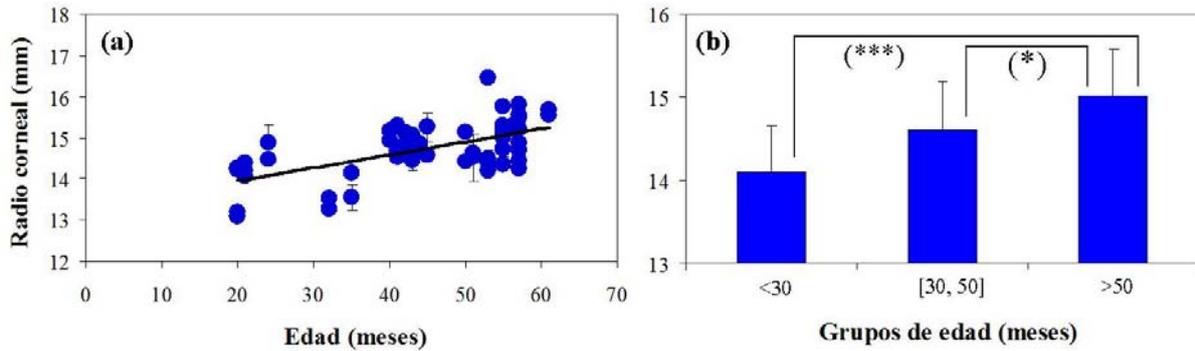


Figura 4.1. (a) Radios promedio de la cara anterior de la córnea en función de la edad. La línea muestra el mejor ajuste lineal ($R_{CO}=0.03*Edad+13.31$). (b) Valores medios de dicho radio para los tres grupos de edad definidos anteriormente. Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

La simetría entre ojos contralaterales se muestra en la Figura 4.2. Los radios de curvatura muestran una correlación lineal significativa ($R=0.54$, $p<0.0001$) entre el OD y el OI, aunque la pendiente de la recta de ajuste (0.42) indica que la relación entre los radios del OI y del OD no es 1:1.

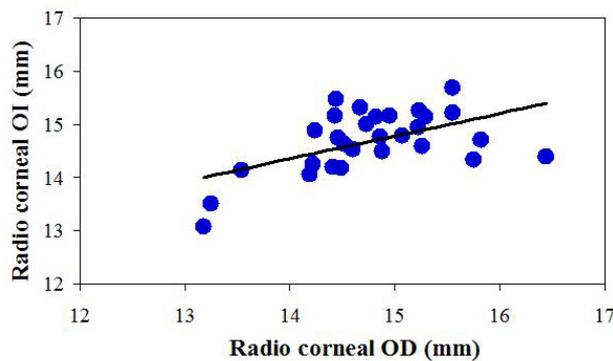


Figura 4.2. Comparación de los radios de curvatura promedio de la cara anterior de la córnea entre ODs y OIs. La línea continua representan el mejor ajuste lineal que verifica la ecuación $R_{CO-OI}=0.42*R_{CO-OD}+8.4$.

De forma similar a lo que se hizo con el cristalino, a partir del radio y suponiendo un índice de refracción de 1.382 [Coile and O’Keefe, 1988], se puede calcular la potencia de la cara anterior de la córnea. Esta “potencia promedio” informa sobre la evolución con la edad de dicha potencia corneal. Como se puede esperar por los resultados del radio, la potencia se reduce de forma lineal ($P_{CO}=-0.06*Edad+28.56$) y significativa ($R=0.62$, $p<0.0001$) al avanzar la edad del animal. La Figura 4.3 representa los valores medios para todas las córneas utilizadas, donde se pone de manifiesto la relación con la edad.

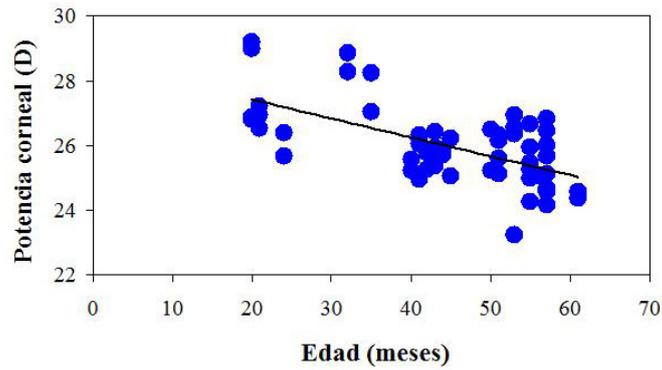


Figura 4.3. Potencia corneal media de la cara anterior de la córnea en función de la edad.

4.1.2. Asfericidad

Los resultados de asfericidad media de la cara anterior de la córnea se han representado en la Figura 4.4a. Dicha asfericidad presenta valores en un rango entre -0.33 y -3.41 con un valor medio de -1.54 ± 0.55 . Además, cambia de forma significativa con la edad, haciéndose más negativa ($R=0.39$, $p=0.002$). Por grupos de edad (Figura 4.4b), la menor dispersión corresponde al grupo de edad más joven. Al igual que ocurre con el radio de curvatura, las asfericidades entre el grupo #1 y el #3 y entre el #2 y el #3 también difieren significativamente ($p=0.003$ y 0.007 respectivamente).

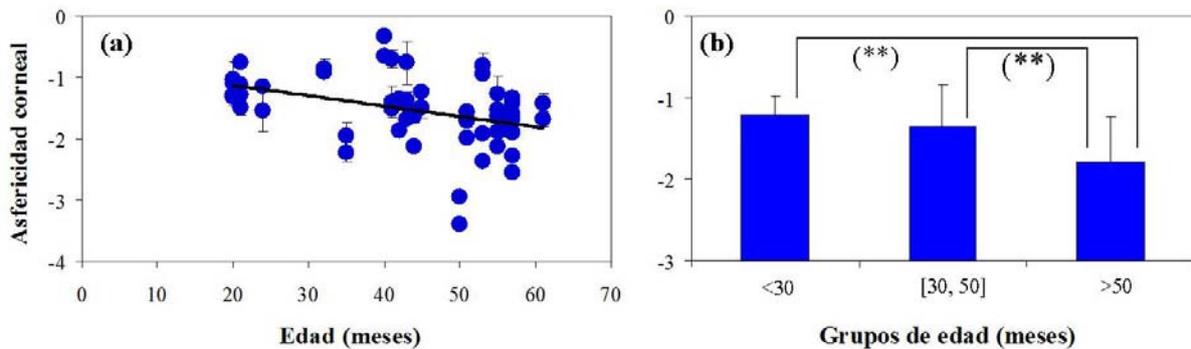


Figura 4.4. (a) Valores medios de asfericidad de la cara anterior de la córnea en función de la edad. La línea muestra el mejor ajuste lineal ($k_{CO}=-0.017 \cdot \text{Edad}-0.79$). (b) Valores medios de dicha asfericidad para los tres grupos de edad. Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

Por su parte, las asfericidades de los ODs y los OIs tienen una relación lineal significativa ($R=0.71$, $p<0.0001$), como se puede observar en la Figura 4.5. Incluso sin tener en cuenta la pareja de córneas con los valores extremos, la relación lineal se conserva ($R=0.58$, $p=0.001$).

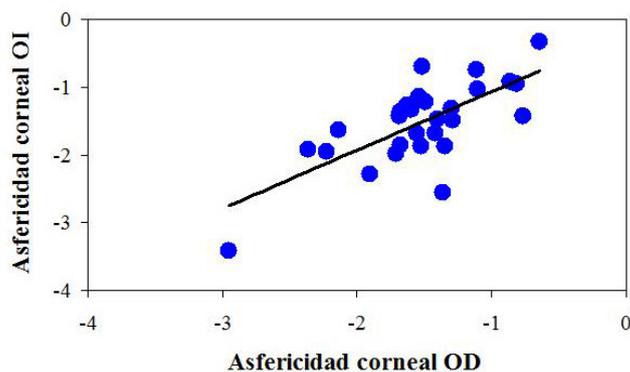


Figura 4.5. Asfericidad de la cara anterior de la córnea del OI en función de la del OD. La línea continua representa le mejor ajuste lineal ($k_{OI}=0.86*k_{OD}-0.21$).

4.1.3. Radios y asfericidades máximos y mínimos

El radio de curvatura de la superficie anterior de la córnea no es constante en todos sus meridianos sino que, al igual que sucede con la asfericidad de dicha superficie, va cambiando progresivamente entre un máximo y un mínimo.

En función de la edad, los valores del radio de curvatura y asfericidad máximos y mínimos seguirán unos patrones similares a los valores medios de dichos parámetros recogidos en los apartados anteriores. En la Figura 4.6, a modo de ejemplo se presentan los valores medios mínimos para cada grupo de edad, tanto de radio de curvatura como de asfericidad (los máximos se comportan de forma similar).

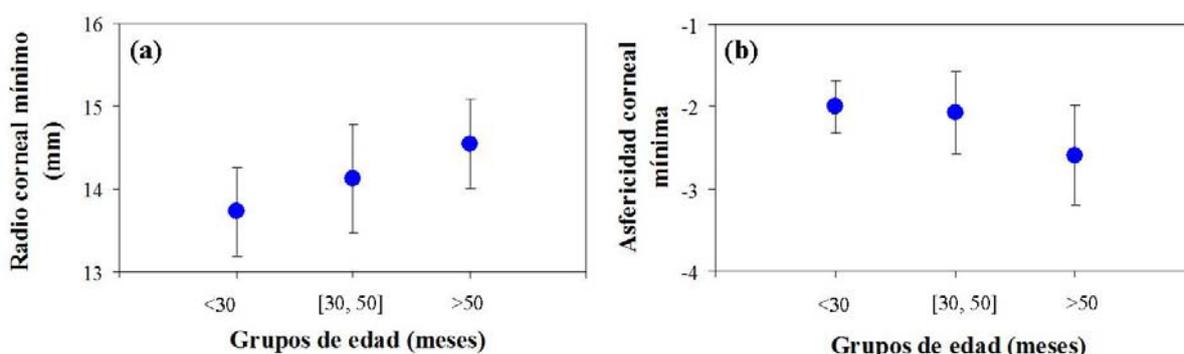


Figura 4.6. (a) Promedios del radio de curvatura mínimo (a) y de asfericidad mínima (b) de la cara anterior de la córnea para los diferentes grupos de edad. Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

El radio de curvatura medio mínimo de la cara anterior de la córnea es de 14.26 ± 0.65 mm (15.18 ± 0.74 mm es la media de los máximos). Por grupos de edad (Figura 4.6a) los valores son 13.73 ± 0.54 mm para el grupo #1; 14.13 ± 0.66 mm para el grupo #2 y 14.55 ± 0.54 mm para el grupo #3 (los máximos son 14.43 ± 0.59 , 15.12 ± 0.62 y 15.50 ± 0.67 mm respectivamente).

Las asfericidades máximas (es decir, mayor valor algebraico) y mínimas presentan valores medios de -0.44 ± 0.57 y -2.31 ± 0.59 respectivamente. El comportamiento con la edad se muestra en la Figura 4.6b con los valores mínimos: -2.00 ± 0.32 , -2.08 ± 0.50 y -2.59 ± 0.61 para

los grupos #1, #2 y #3 (valores medios máximos -0.08 ± 0.37 , -0.30 ± 0.51 y -0.67 ± 0.58 , respectivamente).

Para cada ojo los valores extremos del radio de curvatura están situados en meridianos que forman aproximadamente 90° entre sí (también para las asfericidades), lo que da lugar a que la superficie de la córnea se comporte ópticamente como dos cilindros cruzados (apartado 4.2). En particular, en el 80% de los casos, el radio de curvatura de la cara anterior de la córnea tiene su valor máximo (radio más plano) en el meridiano horizontal y su valor mínimo (radio más curvado) cerca del meridiano vertical (Figura 4.7).

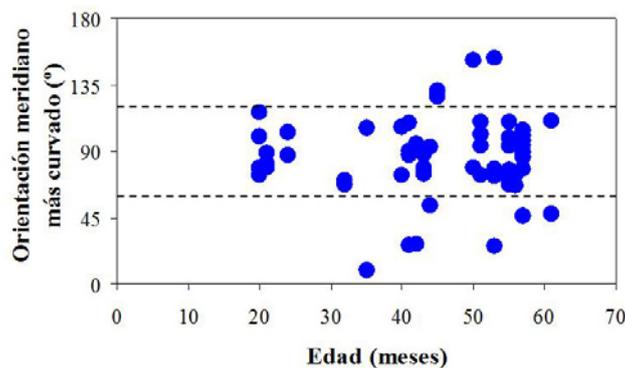


Figura 4.7. Orientación del meridiano más curvado de la superficie corneal anterior. Las líneas discontinuas limitan los meridianos verticales a $90 \pm 30^\circ$.

Por su parte, la asfericidad más negativa (menor valor algebraico) coincide con el radio de curvatura más curvado (\sim vertical), por lo que dicha asfericidad compensaría en parte la curvatura mayor que tiene dicho radio, ya que la asfericidad negativa suaviza la curva en la periferia. El valor menos negativo de asfericidad coincide con el radio de curvatura más plano (\sim horizontal).

4.2. Aberraciones

4.2.1. Variabilidad experimental

Como se indicó en el apartado 2.2, para cada córnea se tomaron varias imágenes de forma secuencial. Con el objeto de comprobar la variabilidad experimental dentro de cada ojo, la Figura 4.8 muestra un ejemplo ilustrativo de los mapas de aberración de onda corneal calculado a partir de los coeficientes de Zernike obtenidos de dos topografías de la misma córnea. Con una simple visualización se corrobora que ambos mapas son similares. En concreto los valores de RMS total fueron 3.43 y $3.47 \mu\text{m}$ (1.19 y $1.08 \mu\text{m}$ para las aberraciones de alto orden).

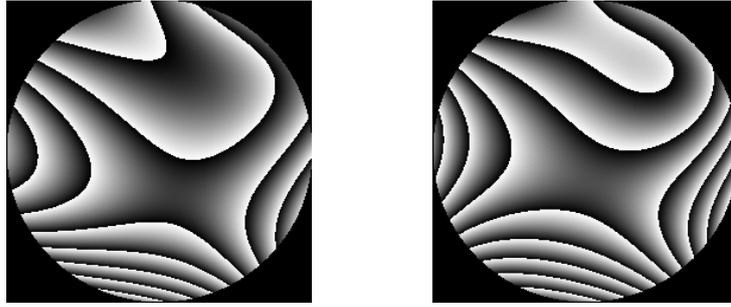


Figura 4.8. Mapas de aberración de onda total (8 mm de pupila) obtenidos a partir de dos topografías corneales registradas secuencialmente. La córnea corresponde al OD de un animal de 43 meses.

Durante todo el experimento, las topografías corneales siempre se registraron colocando el ojo del bovino en su posición natural. Puesto que el iris no es simétrico, la zona nasal es fácilmente distinguible de la temporal (también se puede usar como pista la posición de la salida del nervio óptico de las parte posterior del globo ocular). A pesar de ello, se hizo una prueba auxiliar: se registraron topografías con el ojo en su posición natural (posición “UP”) y girado 180° (posición “DOWN”) y se calcularon las aberraciones en ambas posiciones. Este giro, en principio, debería modificar las orientaciones de las aberraciones asimétricas (coma, trefoil), pero ni el RMS total de la aberración corneal ni el eje del astigmatismo. En la Figura 4.9 se pueden ver los resultados de este experimento adicional, donde las barras de error corresponden a las desviaciones estándar de los datos obtenidos a partir de diferentes topografías.

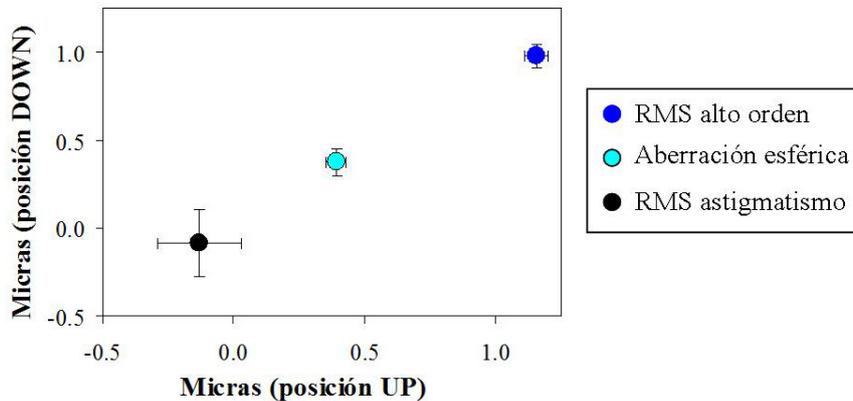


Figura 4.9. Comparación de diferentes aberraciones (pupila de 8 mm) obtenidos a partir de topografías registradas con el ojo colocado en su posición natural (UP) y girado 180° (DOWN).

Por su parte, para cada posición también se calcularon las ecuaciones esfero-cilíndricas asociadas al astigmatismo refractivo. Los resultados indican que dicha refracción se mantiene aproximadamente constante: $(+1.58)(-2.38)178^\circ$ para la posición “UP” y $(+1.13)(-2.30)169^\circ$ para la posición “DOWN”.

4.2.2. RMS total y edad

Un análisis global del comportamiento óptico de la córnea en cuanto a aberraciones se puede llevar a cabo usando el correspondiente valor de RMS. Se ha encontrado que las aberraciones de bajo orden representan el 87% del total. Por su parte, dentro de las aberraciones de alto orden, la aberración esférica para una pupila de 6 mm supone el 49%.

En función de la edad, el RMS de alto orden presentó una gran variabilidad (sin relación significativa alguna), con valores que oscilaron entre 0.21 y 2.11 μm para 6 mm de pupila. La Figura 4.10 representa los valores medios de RMS de alto orden para los tres grupos de edad.

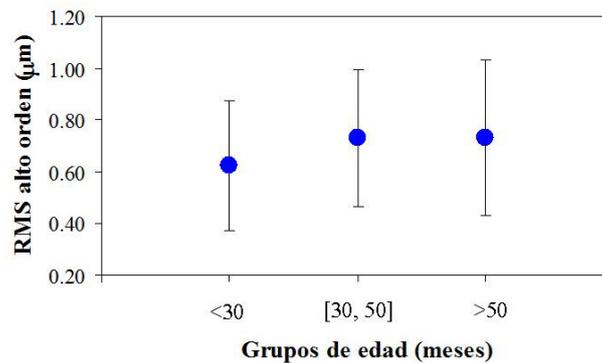


Figura 4.10. RMS medio de alto orden agrupado por edades. Las barras de error representan la desviación estándar.

El cambio en el valor de RMS de alto orden con el tamaño de la pupila se puede observar en la Figura 4.11. Para 8 mm de pupila el RMS corneal es el doble que para 6 mm. También la variabilidad es tanto mayor cuanto mayor es la pupila.

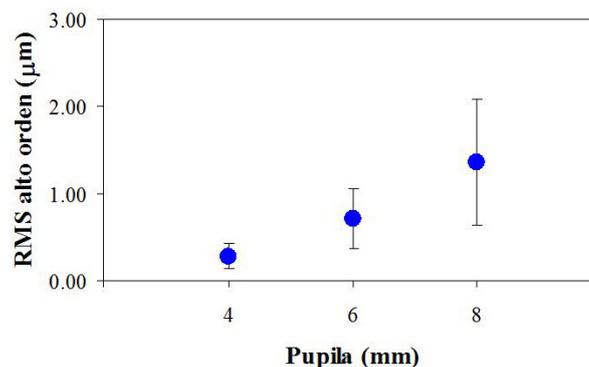


Figura 4.11. Valores promedio de RMS corneal de alto orden para pupilas de 4, 6 y 8 mm.

4.2.3. Astigmatismo corneal

El astigmatismo corneal se ha obtenido utilizando los coeficientes de Zernike (véase el Capítulo 2). Se calcularon los valores de esfera, cilindro y eje para cada córnea. Este valor del cilindro es propiamente el astigmatismo de la superficie, es decir, la diferencia entre las potencias a lo largo de los dos meridianos principales. La Figura 4.12a presenta los valores de

astigmatismo corneal en función de la edad para una pupila de 6 mm. Al igual que para el cristalino, en la cornea este parámetro tampoco muestra una relación significativa con la edad. Para esta pupila se obtuvieron valores entre 0.03 y 2.73 D, con una media de 1.21 ± 0.68 D.

El eje correspondiente de este astigmatismo se muestra en la Figura 4.12b. Para una mejor visualización, en lugar de usar la nomenclatura optométrica TABO, se han representado los valores ajustados al rango $[-90^\circ, 90^\circ]$. Se puede observar que a pesar de la dispersión interindividual, el 66% de las córneas presentó un eje situado entre -30° y $+30^\circ$, es decir “en torno” al eje horizontal. Esto podrá estar relacionado no sólo con el hecho de que la pupila del bovino es alargada y en esa dirección, sino también con la estructura retiniana en forma de franja alargada horizontal (véase el Capítulo 1).

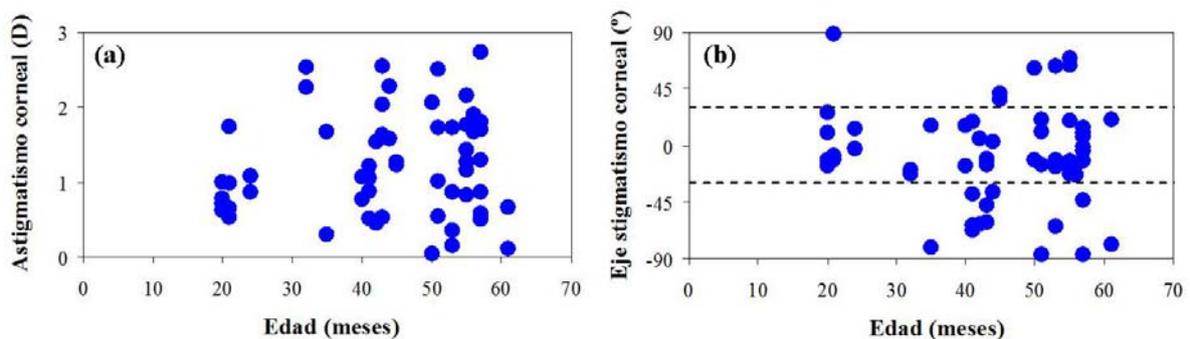


Figura 4.12. Valores de astigmatismo corneal (a) y eje (b) en función de la edad para todas las córneas involucradas en el presente estudio. Las líneas discontinuas en la Figura 4.12b delimitan el intervalo entre -30° y $+30^\circ$.

Para comprobar si el tamaño de pupila tiene alguna influencia sobre el astigmatismo corneal, éste se ha calculado para también para 4 y 8 mm. En concreto, la relación entre los valores obtenidos para 6 y 8 mm se ha representado en la Figura 4.13. Aparece una relación lineal significativa ($R=0.98$, $p<0.0001$) que indica que el astigmatismo corneal es independiente del tamaño pupilar.

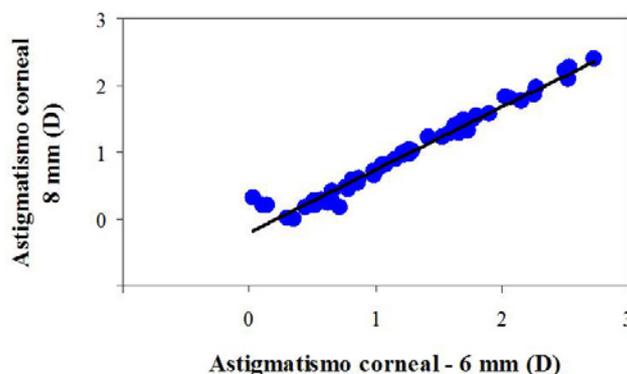


Figura 4.13. Relación entre los valores de astigmatismo corneal para pupilas de 6 y 8 mm. La línea continua representa el mejor ajuste lineal ($Ast_{8mm}=0.94*Ast_{6mm}-0.21$).

De forma adicional (no mostrado aquí) también se encontró que entre ojos contralaterales y para todos los tamaños de pupila el astigmatismo corneal estaba correlacionado linealmente, aunque no de forma estadísticamente significativa ($R=0.29$ y $p=0.02$ para una pupila de 8 mm).

4.2.4. Aberración esférica corneal

Puesto que la aberración esférica es el término de alto orden dominante, se ha decidido hacer un análisis en una sección aparte. En la Figura 4.14a se han representado los valores de aberración esférica de todas las córneas para 6 mm de pupila en función de la edad. Al contrario que en el cristalino, en la córnea no se ha encontrado ninguna relación significativa. Los valores son negativos o muy cercanos a cero, oscilando entre 0.01 y $-0.21 \mu\text{m}$ (valor medio: $-0.08 \pm 0.05 \mu\text{m}$). Además, la variabilidad interindividual es baja, hecho que se puede apreciar en la Figura 4.14b, donde se muestran los valores medios de aberración esférica para los tres grupos de edad.

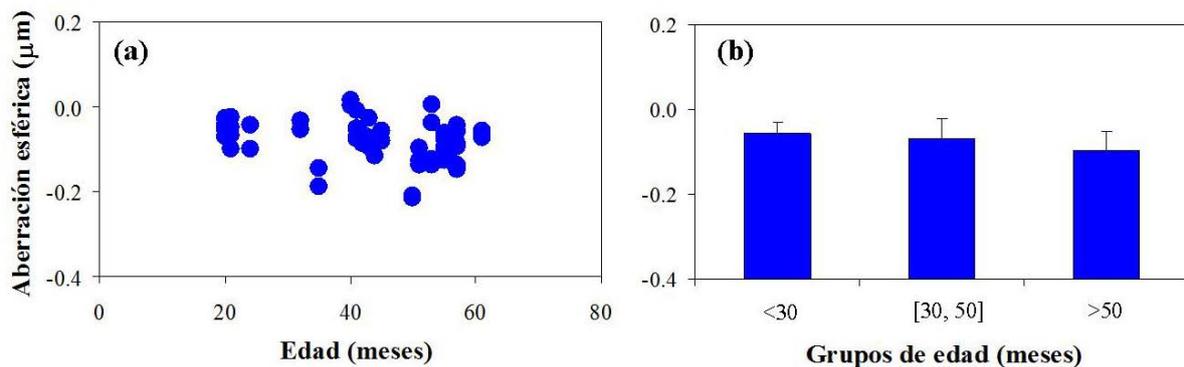


Figura 4.14. (a) Aberración esférica de la córnea en función de la edad para una pupila de 6 mm. (b) Valores de aberración esférica medios para los tres grupos de edad.

En la Figura 4.15 se representa la relación entre OD y OI para 6 mm. De nuevo se aprecia que existe un comportamiento simétrico entre ojos contralaterales del mismo animal. La correlación vuelve a ser significativa ($R=0.67$, $p<0.0001$). La pendiente de la recta de ajuste (0.68) indica que el OI tiende a presentar una aberración esférica menor que el OD contralateral.

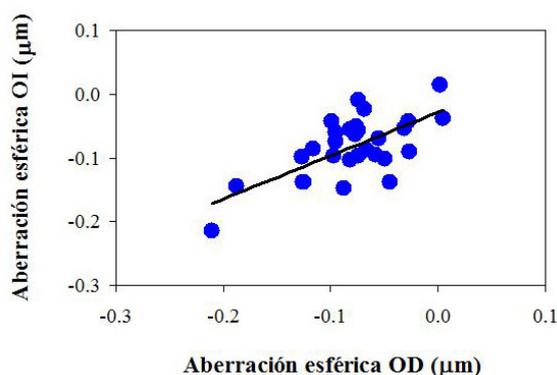


Figura 4.15. Correlación lineal entre la aberración esférica corneal de pares de ojos contralaterales. El mejor ajuste lineal ($AE_{OI}=0.68*AE_{OD}-0.03$) corresponde a la línea continua.

Además de para 6 mm, este término de aberración también se calculó para diámetros pupilares de 4 y 8 mm. El comportamiento para estos tamaños de pupila fue similar y tampoco se encontró relación alguna con la edad de animal. Los valores interindividuales fueron menores para 4 (variaciones entre -0.04 y $0 \mu\text{m}$) que para 8 mm (entre -0.65 y $+0.05 \mu\text{m}$). Los valores medios para cada tamaño de pupila se han representado en la Figura 4.16. Mientras que para 4 mm la aberración esférica es prácticamente nula ($-0.02 \pm 0.01 \mu\text{m}$), ésta se hace claramente negativa cuando el tamaño de pupila aumenta ($-0.65 \pm 0.05 \mu\text{m}$ para 8 mm).

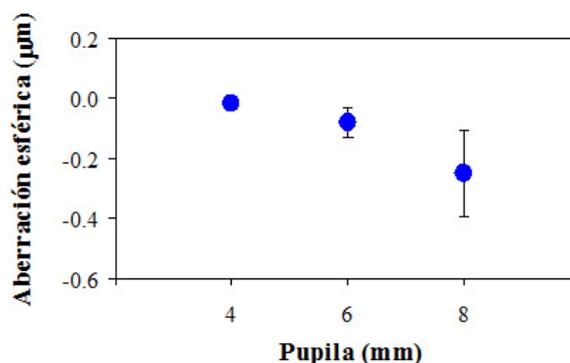


Figura 4.16. Valores medios de la aberración esférica corneal para tres tamaños diferentes de pupila (4, 6 y 8 mm).

4.3. Discusión

La parte del estudio presentada en este Capítulo 4 se ha centrado en el análisis geométrico y las aberraciones de la córnea del toro de lidia. Para ello se ha partido de los datos topográficos de la primera superficie y se ha utilizado un método de trazado de rayos. De forma similar a lo hecho para los cristalinos (Capítulo 3), aquí también se ha hecho especial hincapié en los cambios que se producen con la edad.

Puesto que la literatura prácticamente no recoge estudios sobre la óptica de la córnea del bovino (salvo algunos datos geométricos donde no sólo se omite el procedimiento

experimental sino también los detalles sobre la muestra (edad, raza,...), a lo largo de esta discusión, cuando sea posible, se hará alusión a resultados en humanos. Es obvio que una comparación cuantitativa directa es imposible, pero al menos una observación cualitativa nos aportará una idea sobre cómo son los cambios ópticos con la edad (obviando los rangos de tiempos).

Al ser la córnea el primer elemento óptico que se encuentra la luz al llegar al ojo, la regularidad de la superficie frontal va a ser crucial tanto en la determinación de la refracción ocular como en la calidad óptica de las imágenes proporcionadas (más allá del simple desenfoque). Aunque la córnea tiene también una superficie posterior, el efecto desde el punto de vista óptico es mucho menor, por lo cual en este trabajo se han utilizado solamente los datos de la primera superficie corneal.

Los resultados aquí expuestos muestran que el radio corneal medio no se mantiene constante con la edad, sino que aumenta, es decir tiende a hacerse más plano. De hecho, hay una diferencia de un 26% entre el valor mínimo y el máximo (para animales de 20 y 53 meses respectivamente). Los cambios son más notables entre los grupos #2 y #3, que entre el #1 y el #2. Además hay una relación lineal significativa entre ojos contralaterales. Aunque no se han encontrado estudios previos para poder comparar estos datos, el valor medio obtenido para toda la muestra (14.72 ± 0.65 mm) es coherente con los 15.8 mm reportados por Coile y O'Keefe para la primera cara de la córnea [Coile and O'Keefe, 1988].

Un aumento en los radios promedio con la edad lleva asociada una reducción de la potencia corneal. Así la comparación entre el grupo más viejo (#3, >50 meses) y el más joven (#1; <30 meses) muestra que hay una reducción de un 6% en dicha potencia corneal, valor que está en concordancia con la variación en el radio de curvatura promedio para dichos grupos de edad.

Sin embargo, la forma de la córnea del bovino no es esférica sino que presenta un radio máximo y otro mínimo. Las medias de dichos radios para todos los ojos fueron 14.26 ± 0.65 y 15.18 ± 0.74 mm respectivamente. Aunque el primero es similar a lo encontrado en la literatura (14.7 mm), el segundo es claramente inferior (16.8 mm -no es posible discutir esta diferencia puesto que se desconoce tanto la edad como la raza de bovino-) [Sisson et al., 1975]. Las direcciones de estos valores extremos forman aproximadamente 90° , tendiendo el radio mínimo (meridiano más curvo) a estar en la dirección vertical, hecho que corrobora algo ya reportado anteriormente [Sisson et al., 1975]. Además, esta diferencia en radios conduce a una diferencia en potencia de 1.21 D, valor que nos da una idea sobre el astigmatismo medio que presentaría la córnea.

Como se podría esperar, dichos valores extremos también cambian de forma lineal y significativa con la edad ($R=0.58$ para los mínimos y $R=0.61$ para los máximos; $p<0.001$ para ambos). Sin embargo, a pesar de esto, el astigmatismo corneal calculado a partir de los polinomios de Zernike no presenta cambios con la edad ($R=0.09$). Recordemos que se han usado los Zernikes porque de esa forma se puede obtener también el eje exacto del astigmatismo (fórmula esfero-cilíndrica) usando las expresiones expuestas en el Capítulo 2.

Este hecho podría parecer contradictorio a primera vista. Es por ello que para corroborarlo se ha realizado un cálculo simple del astigmatismo como diferencia de potencias máxima y mínima para cada córnea (obviando la dirección exacta de los meridianos principales). Los resultados muestran que, efectivamente, el astigmatismo corneal no presenta dependencia con la edad. Por tanto, a pesar de que de forma global los radios máximos y mínimos tienden a aumentar con la edad, para cada ojo individual este hecho no tiene porqué tener lugar, es decir, los cambios en ambas direcciones no van siempre emparejados. Mientras que en algunas córneas ocurre esto, en otras no. Debido a ello la esperada relación entre astigmatismo y edad desaparece. Parece interesante destacar que medidas en córneas humanas tampoco mostraron relación alguna entre el astigmatismo corneal y la edad de los sujetos [Artal et al., 2002].

La asfericidad corneal es negativa (prolata) para toda la muestra, encontrándose una relación lineal entre pares de ojos del mismo animal. Con la edad, esta asfericidad se hace más negativa (casi un 50% entre los grupos #1 y #3). No existen datos en la literatura sobre la asfericidad corneal en el ojo del bovino, pero en humanos se ha mostrado no sólo que la córnea es también prolata (se abre hacia la periferia), sino que su valor se hace más negativo con la edad [Hashemi H, et al., 2015].

Las aberraciones corneales (en términos de RMS global) no presentan ninguna relación con la edad (algo similar se ha reportado para humanos [Artal et al., 2002]). Los términos de bajo orden fueron dominantes (el 87% para una pupila de 6 mm). Dentro de las aberraciones de alto orden, el peso de la esférica representa prácticamente la mitad. A diferencia del cristalino (Capítulo 3), donde la aberración esférica era claramente positiva, en la córnea dicho parámetro es negativo ($-0.65\pm 0.05 \mu\text{m}$ en media para 8 mm) para todos los ojos salvo para tres (0.00 ($n=1$) y $+0.01$ ($n=2$)). Tampoco presentan cambios con la edad.

Estos valores negativos de la aberración esférica indican que los rayos que atraviesan la periferia de la córnea focalizan sobre el eje óptico detrás de los rayos que atraviesan la parte central de ésta. Esto es completamente coherente con los valores de asfericidad negativos

encontrados, que van asociados a una superficie prolata, es decir, que presenta más curvatura en la zona central que en la periferia.

En la córnea humana, hay también autores que no encontraron cambios en la aberración esférica con la edad [Oshika et al., 1999], aunque otros afirman que entre sujetos jóvenes y en edad madura hay un ligero aumento para luego mantenerse [Guirao et al., 2000]. Experimentos posteriores de estos mismos autores afirmaron que los posibles cambios con la edad en las aberraciones corneales no son suficientes para justificar la reducción de la calidad de imagen del ojo completo con la edad [Artal et al., 2002].

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

Resultados III



CAPÍTULO 5

Resultados III. Combinación de córnea y cristalino

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la combinación de córnea y cristalino para formar un sistema óptico conjunto (ojo completo). Dicha combinación permitirá explorar cómo se comporta globalmente el ojo del toro de lidia desde el punto de vista óptico. Concretamente se analizará tanto la aberración esférica como la refracción ocular. Ambas se obtendrán mediante el procesado de los datos en Zemax, como ya se describió anteriormente en el Capítulo 2.

5.1. Orientación relativa córnea-cristalino: minimización del astigmatismo

Puesto que el cristalino y la córnea se han estudiado de forma individual, al acoplarlos es necesario conocer la orientación correcta del cristalino con respecto a la córnea (pues ésta “se pierde” al extraer los cristalinos para su estudio). Con ese objetivo se ha modelado el ojo del bovino de lidia acoplando la córnea, que permanece fija, con el cristalino en tres orientaciones distintas (véase la sección 2.3.1). Para cada una de las tres posiciones y con el sistema completo en foco, primeramente se han calculado las aberraciones. A partir de ellas se ha extraído el astigmatismo, por ser éste el término sobre el que más influye la posición relativa de los dos elementos ópticos.

Las orientaciones del cristalino se describen de nuevo a continuación. La denominada 0° corresponde a aquella en la que el meridiano de mayor potencia del cristalino es paralelo al

meridiano de mayor potencia corneal. Cuando ambos meridianos son perpendiculares, la orientación se ha denominado 90°. Finalmente se ha designado por 45° a aquella en la que el ángulo relativo entre ambos es de 45°.

En la Figura 5.1 se presentan los resultados del astigmatismo ocular con una pupila de 6 mm para las tres orientaciones descritas. Estos cambios en el astigmatismo global es una consecuencia directa de la diferencia relativa en la orientación de los meridianos principales (el de mayor y el de menor potencia) de los elementos refractivos del ojo del bovino. Se observa que el astigmatismo es máximo para la posición 0° en la que los meridianos de mayor potencia de ambos elementos oculares son paralelos y verticales (1.98±0.82 D). Esto es coherente si se tiene en cuenta que en casi el 70% de las córneas el meridiano de mayor potencia es también vertical (apartado 4.2) y la capacidad refractiva corneal es notablemente mayor que la del cristalino. Por su parte, el valor de astigmatismo más pequeño se obtiene para la orientación 90° (0.67±0.69 D). Para 45° el astigmatismo se sitúa entre ambos (1.51±0.69 D).

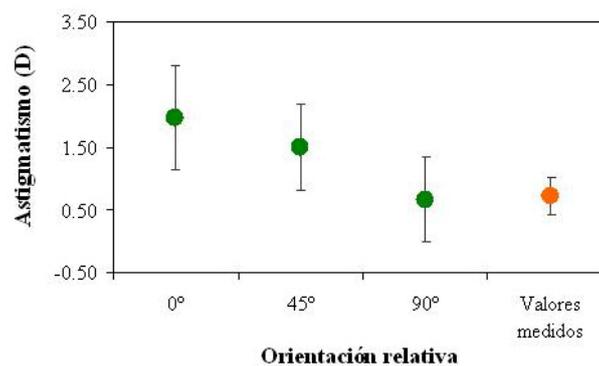


Figura 5.1. Astigmatismo del ojo del bovino para tres orientaciones distintas del cristalino con respecto a la córnea fija (verde). Se incluye también el resultado experimental medido directamente en animales utilizando retinoscopia (naranja) [Bueno et al. 2017].

Medidas reales en bovinos de lidia usando retinoscopia han mostrado un astigmatismo promedio de 0.73±0.31 D [Bueno et al., 2017] (dato en naranja en Figura 5.1). En el acoplamiento córnea-cristalino el resultado más próximo a éste es el que corresponde a 90° (meridianos de mayor potencia cruzados).

En esta posición de acoplamiento, la córnea y el cristalino tienden a compensar (al menos parcialmente) el astigmatismo ocular total. Desde un punto de fisiológico este hecho sería coherente y lógico porque esa combinación particular tiende a minimizar la refracción, hecho esperable de un elemento óptico natural cuya finalidad es conseguir, dentro de unos límites, una calidad visual optimizada.

5.2. Aberración esférica del ojo completo

5.2.1. Dependencia con la edad y el tamaño de pupila

Una vez conocido que la orientación que más se acerca a la realidad es aquella en la que los meridianos más potentes de la córnea y el cristalino forman 90° entre sí, se ha procedido a calcular la aberración esférica total del ojo con esa disposición de los elementos refractivos.

La aberración esférica total ocular para una pupila circular de 6 mm tiene unos valores que van desde -0.02 hasta $0.10 \mu\text{m}$ (media: $0.02 \pm 0.03 \mu\text{m}$) (Figura 5.2a). A pesar de esta dispersión interindividual, no se ha encontrado una relación significativa con la edad ($p=0.04$). Los valores medios de aberración esférica para los grupos de edad descritos en el Capítulo 2 se muestran en la Figura 5.2b. Los resultados han sido $0.05 \pm 0.04 \mu\text{m}$ para el grupo #1, $0.04 \pm 0.04 \mu\text{m}$ para el grupo #2 y $0.01 \pm 0.02 \mu\text{m}$ para el grupo #3 (Figura 5.2b).

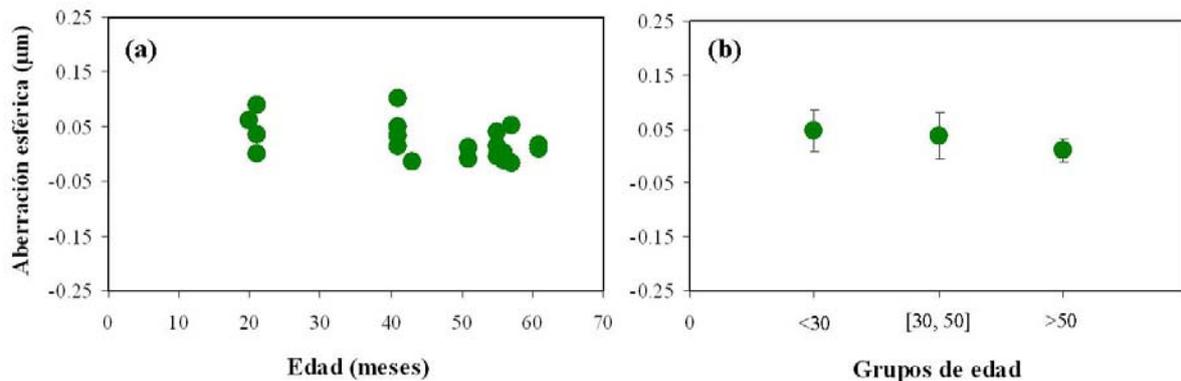


Figura 5.2. (a) Aberración esférica del ojo completo con una pupila circular de 6 mm para toda la muestra de ojos involucrados. (b) Valores medios de aberración esférica separados por grupos de edad.

Para el Grupo #1, la Figura 5.3 presenta el cambio que se produce en la aberración esférica al aumentar el tamaño pupilar.

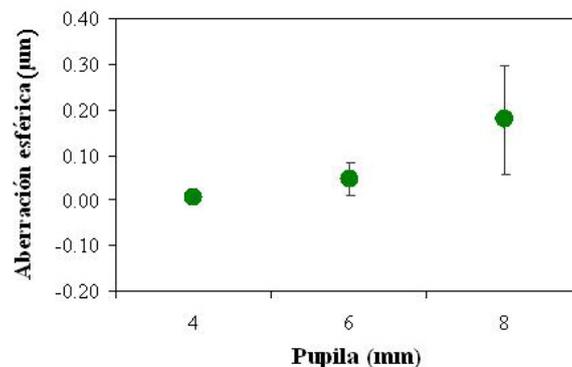


Figura 5.3. Cambio en la aberración esférica ocular total con el tamaño pupilar (circular) para el grupo de edad #1.

Como es de esperar, la cantidad de aberración aumenta con la pupila siendo de 0.01 ± 0.01 μm para 4 mm, 0.05 ± 0.04 μm para 6 mm y 0.18 ± 0.12 μm para 8 mm. Es decir, duplicar el tamaño de la pupila aumenta 18 veces la aberración esférica para este grupo de edad. Cambios similares se producen en el resto de grupos de edad.

5.2.2. Efecto sobre la aberración esférica de una pupila elíptica

A lo largo de este trabajo siempre se ha trabajado con pupila circular. Sin embargo la pupila del ojo del bovino no es circular. Resultaría pues de interés estudiar cuál es el efecto real que una pupila no circular tiene sobre la calidad óptica del ojo completo. Es por ello que en este apartado se analiza el efecto que la forma geométrica de la pupila tiene sobre la aberración esférica del ojo del bovino de lidia.

Se han llevado a cabo los cálculos de aberración esférica total para pupilas con forma elíptica (similar a la pupila del bovino) con áreas equivalentes a las circulares de 4, 6 y 8 mm de diámetro (véase apartado 2.3.2). La comparación entre ambas formas de pupila para los ojos del grupo #1 se recogen en la Figura 5.4.

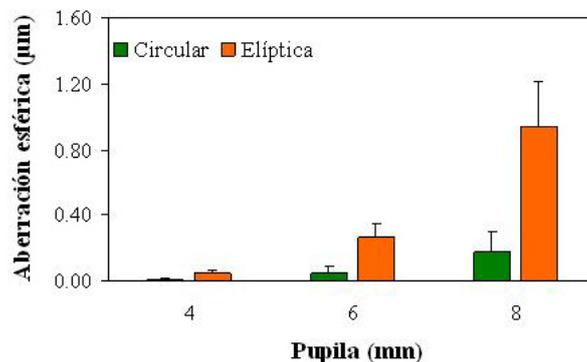


Figura 5.4. Comparación de los valores de aberración esférica entre pupila circular (barras verdes) y elíptica (barras naranjas) para tres tamaños de pupila en los ojos del grupo de edad #1.

En concreto, para una pupila elíptica de área igual a la pupila circular de 4 mm la aberración esférica es de 0.05 ± 0.02 μm . Este valor crece hasta 0.26 ± 0.08 μm (0.94 ± 0.27 μm) para la pupila elíptica de área igual a la circular de 6 (8) mm. Estos resultados indican que una pupila con forma elíptica aumenta más de 5 veces (en promedio) el valor de aberración esférica asociada a la pupila circular. Los resultados fueron similares con el resto de grupos de edad.

5.2.3. Aberración esférica, ángulo de incidencia y forma de pupila

En este apartado se analizará cómo cambia la aberración esférica total del ojo para distintos ángulos de incidencia del haz de luz sobre la córnea. Con estos datos se puede estudiar cómo sería la imagen que forma el ojo a distintas excentricidades retinianas. Para ello se han hecho cálculos similares a los expuestos en los párrafos anteriores pero en lugar de utilizar un haz paralelo al eje, se han usado distintos ángulos de incidencia. En concreto, como ya se indicó en el apartado 2.3.3 los ángulos de incidencia de la luz en el ojo se han ido variando en pasos de 1° , abarcando un total de 90° en dirección horizontal (45° nasal y 45° temporal) y otros 90° en dirección vertical (45° superior y 45° inferior). Los resultados a lo largo del meridiano horizontal serán interesantes puesto que esta dirección coincide con el eje mayor de la pupila y con la dirección del *visual streak* retiniano (zona donde se sitúan la mayor parte de los fotorreceptores de la retina del bovino -véase el apartado 1.1.4-).

Para el grupo de edad #1 la Figura 5.5 muestra los resultados de aberración esférica media en función del ángulo de incidencia para una pupila circular de 6 mm de diámetro. Para esta pupila circular y un ángulo de 0° (incidencia normal sobre la superficie córnea) la aberración esférica fue de $0.05 \mu\text{m}$, como ya se representó en la figura anterior. Este valor se mantiene aproximadamente constante con la excentricidad en la dirección horizontal (valor medio= $0.06\pm 0.01 \mu\text{m}$). Sin embargo, en la dirección vertical hay un cambio muy pronunciado, aumentando su valor hasta $0.19 \mu\text{m}$.

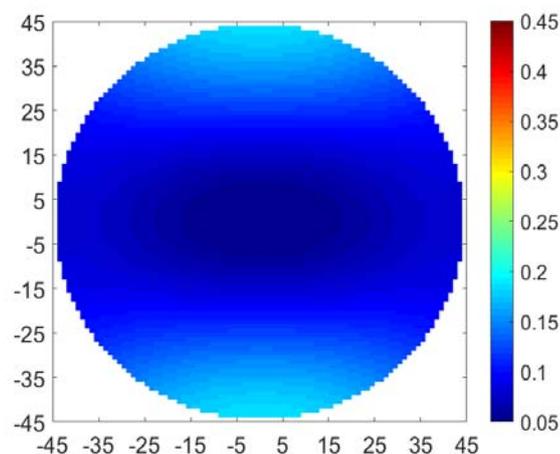


Figura 5.5. Aberración esférica (en μm) para distintos ángulos de incidencia y una pupila circular de 6 mm de diámetro en los ojos del grupo de edad #1.

Los valores para una pupila con forma elíptica con el mismo área que la circular de 6 mm se presentan en la Figura 5.6. En este caso las variaciones en la aberración esférica en la franja

horizontal también son mínimas (entre 0.26 y 0.29 μm). Para la dirección vertical, los valores pasar a ser 0.32 μm a 20° y 0.45 μm a 45°.

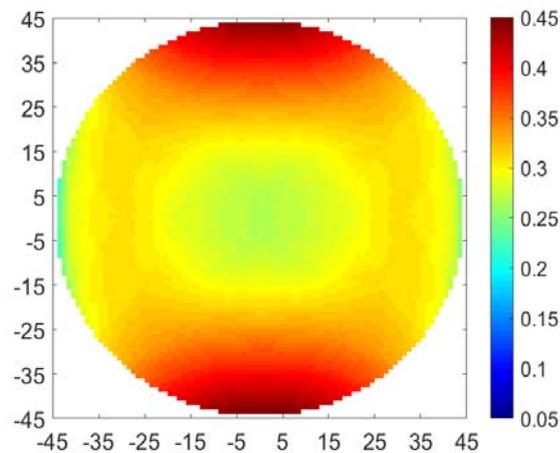


Figura 5.6. Aberración esférica (en μm) para distintos ángulos de incidencia y una pupila elíptica equivalente a una circular de 6 mm, en los ojos del grupo de edad #1. Para una comparación directa la escala de color es la misma que en la figura precedente.

Para ambas geometrías pupilares la zona donde el valor de aberración esférica se mantiene aproximadamente constante es $\pm 15^\circ$. Sin embargo, en la dirección vertical el cambio es más pronunciado al salir de esa zona, aumentando su valor hasta casi 4 veces con una pupila circular, pero sólo $\sim 2x$ cuando es elíptica.

5.2.4. Efecto de la asfericidad sobre la aberración esférica

Para ver el efecto de la asfericidad tanto de la cara anterior de la córnea como de ambas superficies del cristalino en la aberración esférica ocular total, se ha calculado dicha aberración esférica sin usar la asfericidad, es decir, suponiendo que las superficies son puramente esféricas y no asféricas. Esto permite observar la diferencia que hay entre un ojo con asfericidad (real) y el mismo ojo sin tener en cuenta la asfericidad de las superficies ópticas de los componentes. Además, se ha calculado la aberración esférica total aplicando la asfericidad por separado, primero en la córnea y luego en el cristalino. Esto servirá para analizar el efecto sobre la aberración esférica del ojo completo que tiene la asfericidad de cada elemento refractivo.

En la Figura 5.7 se muestra la aberración esférica para los 4 casos descritos anteriormente en los ojos del grupo de edad #1 y una pupila circular de 6 mm. Concretamente los valores obtenidos son los siguientes: para el ojo con asfericidad en córnea y cristalino (ojo real) se ha obtenido un valor de $0.05 \pm 0.04 \mu\text{m}$ (Figuras 5.2b y 5.3). Al eliminar la contribución de las asfericidades de las superficies de ambos componentes fisiológicos, la aberración esférica

aumenta hasta $0.20 \pm 0.03 \mu\text{m}$. Cuando solamente se deja la asfericidad del cristalino (es decir, córnea sin asfericidad) se obtiene un valor aún superior de $0.26 \pm 0.02 \mu\text{m}$ (este hecho es coherente con lo mostrado anteriormente en la Figura 3.17). Por último para el caso en el que es la córnea la única con asfericidad (i.e. las dos superficies del cristalino esféricas) se obtiene un valor cercano a cero e inferior al caso real ($-0.01 \pm 0.02 \mu\text{m}$).

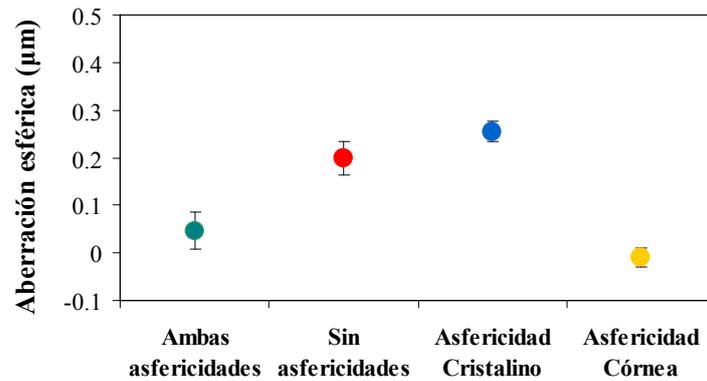


Figura 5.7. Valores de aberración esférica total (pupila circular de 6 mm) para los ojos del grupo de edad #1, teniendo en cuenta todas las asfericidades (verde), ninguna (rojo), sólo la asfericidad del cristalino (azul) y sólo la asfericidad corneal (amarillo).

Por lo tanto, la asfericidad de los componentes individuales del ojo del bovino reduce el valor de la aberración esférica del conjunto del ojo. En concreto, al pasar de un ojo sin asfericidad en ninguna de sus superficies (símbolo rojo) a un ojo real con las correspondientes asfericidades de sus superficies (símbolo verde), la aberración esférica se reduce al 25%. Además, es la asfericidad corneal la que básicamente lleva el peso de esta disminución en la aberración esférica, como se puede observar en la Figura 5.7 (símbolo amarillo). Por otro lado, la asfericidad del cristalino tiende a aumentar la aberración esférica total, ya que en el caso en el que dicho elemento tiene asfericidad y la córnea no, el ojo tiene una aberración esférica superior a la de ambos elementos sin asfericidad (símbolo azul).

De todo ello se deduce que la aberración esférica global del ojo tiene un valor moderado no sólo debido a la compensación entre la córnea y el cristalino, sino también a la contribución de sus asfericidades, siendo la influencia de la córnea la dominante.

La Figura 5.8 muestra el efecto de las asfericidades en la aberración esférica global en el caso de una pupila elíptica en lugar de una circular. Como se puede esperar a raíz de lo expuesto en el apartado 5.2.2, aunque el comportamiento en las cuatro condiciones experimentales es similar a lo obtenido para una pupila circular, los valores de esférica son notablemente más altos.

Este aumento con el cambio de forma en la pupila es mucho mayor en el ojo completo (>5x) que cuando todas las superficies se consideran esféricas (aumento del 80%) o sólo se

considera la contribución de las asfericidades de las dos caras del cristalino (78% mayor). En el caso de tener solamente en cuenta la asfericidad corneal, la aberración esférica pasa de un valor nulo hasta $0.17 \pm 0.06 \mu\text{m}$.

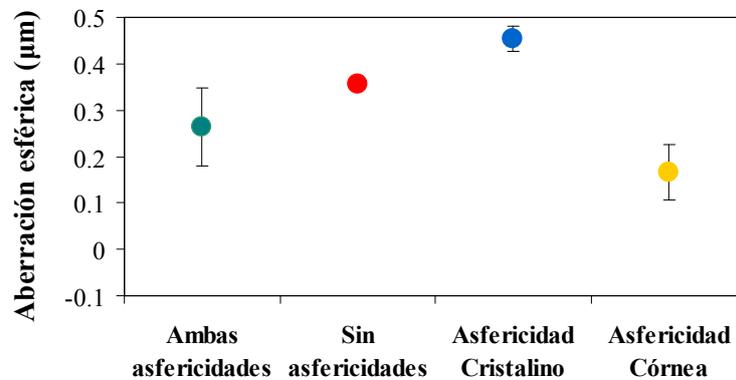


Figura 5.8. Valores de aberración esférica total (pupila elíptica equivalente en área a una circular de 6 mm) para los ojos del Grupo #1. Los códigos de color son los mismos que en la figura anterior.

5.3. Refracción ocular

5.3.1. Esfera equivalente y astigmatismo

La refracción ocular del ojo del toro de lidia se puede determinar a partir de las aberraciones ópticas calculadas previamente en Zemax (véase el Capítulo 2). Puesto que la refracción depende de la longitud axial del ojo, el estudio se hará teniendo en cuenta dicha longitud axial en los tres grupos de edad, tal y como se detalló en el apartado 2.3.

La esfera equivalente nos dará una idea general de cuál es el comportamiento general de la refracción ocular en función de la edad. En particular, los valores individuales variaron en un rango de entre -1.14 y +3.42 D (para una pupila de 6 mm de diámetro). No se encontró ninguna relación con la edad, hecho que se puede observar en la Figura 5.9, donde se presentan los valores medios de equivalente esférico para los tres grupos de edad. Los valores promedio fueron +1.13 D para el grupo #1, +0.98 D para el grupo #2 y +1.03 D para el grupo #3).

Esta refracción objetiva no sufre cambios con el tamaño de pupila, como muestra la Figura 5.10, donde se comparan los valores de esfera equivalente obtenidos con 6 y 8 mm de pupila. Debido a ello en los resultados que siguen nos limitaremos a presentar los datos obtenidos para una pupila de 6 mm.

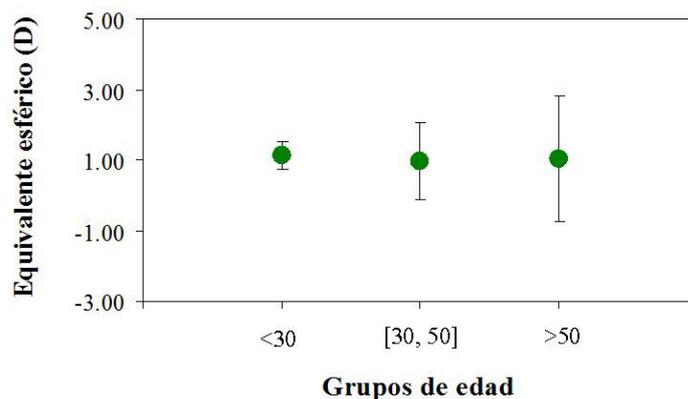


Figura 5.9. Valores promedio de esfera equivalente para cada grupo de edad.

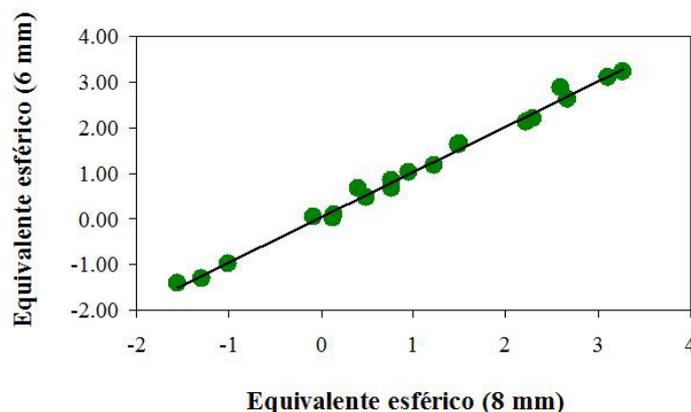


Figura 5.10. Relación entre los valores de esfera equivalente entre 6 y 8 mm de tamaño de pupila en todos los ojos completos involucrados en el estudio. La línea continua representa el mejor ajuste lineal ($EE_{6mm}=0.99*EE_{8mm}-0.05$; $R=0.99$).

Como las superficies oculares no tienen simetría de revolución, para ahondar más en la caracterización de la refracción se han analizado los meridianos horizontal y vertical por separado. En particular, la refracción en el meridiano horizontal para todos los ojos involucrados estuvo en el rango entre -1.38 y +3.53 D (Figura 5.11a), con un valor medio de $+1.43\pm 1.42$ D. No se encontró ninguna relación con la edad, aunque aparece una mayor dispersión en los ojos de animales de mayor edad. De los 20 ojos medidos hay 17 cuyos valores de refracción en el meridiano horizontal son positivos (hipermétropes). Divididos por grupos de edad (Figura 5.11b), las refracciones medias fueron $+1.42\pm 0.22$ D para el grupo #1, $+1.36\pm 1.10$ D para el grupo #2 y $+1.48\pm 1.82$ D para el grupo #3.

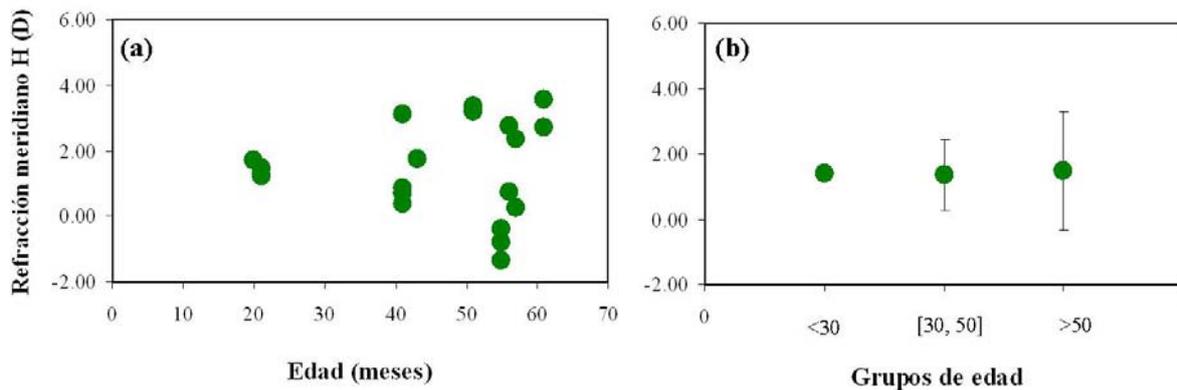


Figura 5.11. (a) Refracción ocular en el meridiano horizontal del ojo del toro de lidia en función de la edad para una pupila de 6 mm. (b) Valores promedio de dicha refracción para los tres grupos de edad.

En el meridiano vertical la refracción media fue de $+0.64 \pm 1.47$ D (dispersión mayor que en el meridiano horizontal), variando entre -1.81 y $+3.04$ D (Figura 5.12a). En este caso, 15 de los 20 ojos resultaron ser hipermétropes en ese meridiano. Para todos los ojos, este meridiano vertical fue siempre “más miope” que el horizontal (ver resultados de astigmatismo en la Figura 5.13). Por grupos de edad, los valores fueron $+0.86 \pm 0.72$ D para el grupo #1, 0.61 ± 1.24 D para el grupo #2 y 0.59 ± 1.82 D para el grupo #3 (Figura 5.12b).

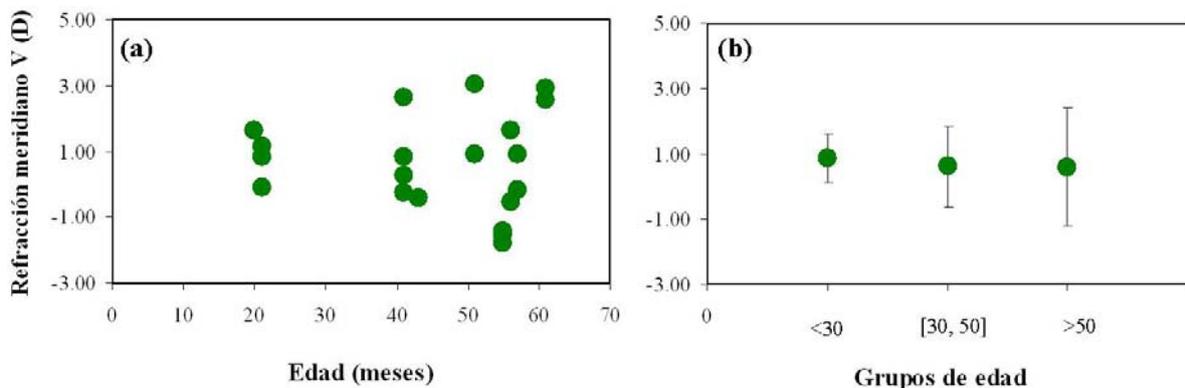


Figura 5.12. (a) Refracción ocular en el meridiano vertical del ojo de toro para una pupila de 6 mm en función de la edad. (b) Valores promedio de dicha refracción para los tres grupos de edad.

Los valores de astigmatismo ocular (calculado como diferencia entre los meridianos de mayor y menor potencia total, vertical y horizontal respectivamente) variaron entre 0.02 y 2.43 D. Estos valores fueron siempre positivos, lo que indica como se dijo en el párrafo anterior que para todos los ojos el meridiano vertical es más “potente” que el horizontal. El valor promedio para toda la muestra fue de 0.79 ± 0.71 D. No se encontró relación del astigmatismo con la edad, como se puede observar en la Figura 5.13. Los valores medios fueron 0.54 ± 0.69 D para el grupo #1, 0.75 ± 0.83 D para el grupo #2 y 0.90 ± 0.71 D para el grupo #3 (no se muestran).

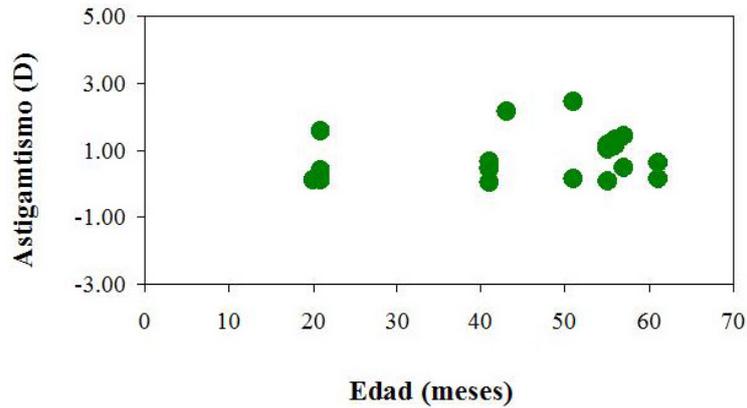


Figura 5.13. Valores de astigmatismo para una pupila de 6 mm.

5.3.2. Refracción ocular, ángulo de incidencia y forma de la pupila

Al igual que se ha hecho con la aberración esférica, en este apartado también se analizan los cambios en la refracción periférica al cambiar el ángulo de incidencia de la luz incidente de la forma ya descrita anteriormente. Este cálculo se ha hecho situando el sistema en foco con incidencia a 0° , pues lo que interesa es comprobar cómo cambia el equivalente esférico y el astigmatismo al aumentar el ángulo de incidencia de la luz fuera de eje, es decir, el cambio centro-periferia.

En la Figura 5.14, para el grupo de edad #1 y una pupila circular de 6 mm se presenta el mapa del cambio relativo en el equivalente esférico para diferentes ángulos de incidencia de la luz (con respecto al sistema en foco para incidencia a 0°). En estas condiciones los valores no sufren apenas variaciones en la dirección horizontal, aunque el sistema presenta una ligera tendencia hacia la miopía al aumentar la excentricidad (rango entre -0.06 y -0.26 D, media: -0.11 ± 0.11 D). Sin embargo, hacia los extremos superior e inferior los cambios son mucho más acusados, aumentado claramente hacia valores hipermétropes (de 0 a $+1.28$ D).

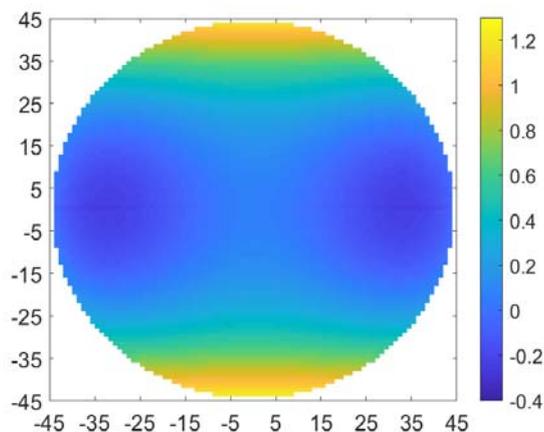


Figura 5.14. Cambios relativos promedio en el equivalente esférico (en D) para distintos ángulos de incidencia de la luz (grupo de edad #1, pupila circular de 6 mm de diámetro).

El comportamiento de la esfera equivalente para una pupila con forma elíptica se muestra en la Figura 5.15. En este caso en la franja horizontal los valores van desde -0.05 hasta -0.41 (media: -0.24 ± 0.13 D). Para la dirección vertical, los valores son hipermétropes, llegando hasta +1.12 D.

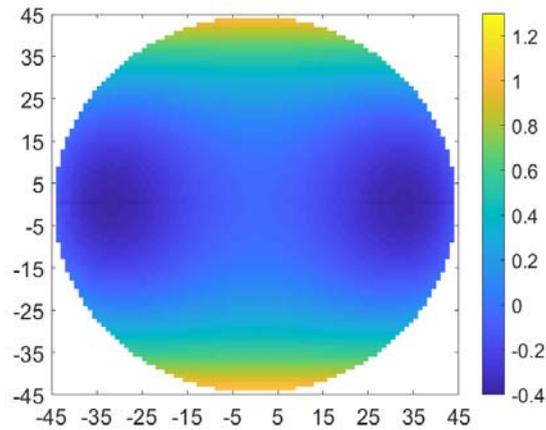


Figura 5.15. Cambios relativos promedio en el equivalente esférico (en D) para distintos ángulos de incidencia y una pupila elíptica equivalente a una circular de 6 mm, en los ojos del grupo de edad #1. Para una comparación directa la escala de color es la misma que en la figura precedente.

Los cambios relativos en el astigmatismo en función de la excentricidad se muestran en la Figura 5.16. En la franja horizontal aumenta del centro hacia los extremos nasal y temporal, pasando de de 0.54 D a 4.49 D. Este cambio es menos marcado en la dirección vertical donde en los extremos superior e inferior toma un valor de 3.55 D.

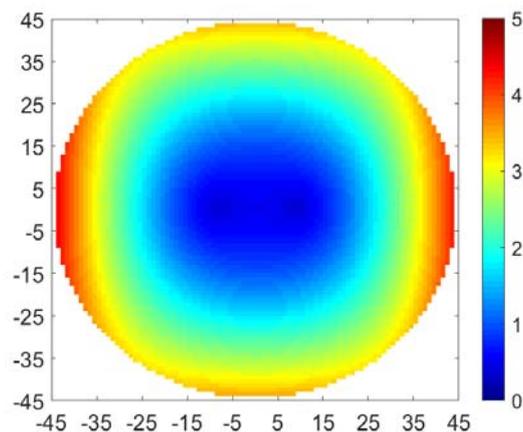


Figura 5.16. Cambios relativos en el astigmatismo ocular (en D) para distintos ángulos de incidencia en el grupo de edad #1 (pupila circular de 6 mm de diámetro).

En la Figura 5.17 se presentan los resultados de astigmatismo cuando la pupila circular de 6 mm se cambia por una elíptica equivalente. Los valores a lo largo de la dirección horizontal están en el rango entre 0.67 y 4.88 D. En la dirección vertical, los valores sólo llegan hasta 3.52 D.

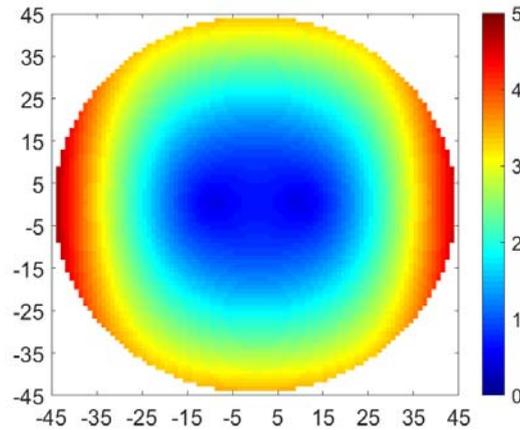


Figura 5.17. Cambios relativos en el astigmatismo ocular (en D) para distintos ángulos de incidencia y una pupila elíptica equivalente a una circular de 6 mm, en los ojos del grupo de edad #1. Para una comparación directa la escala de color es la misma que en la figura precedente.

5.4. Profundidad de foco

En esta última sección de resultados se analizará la profundidad de foco del ojo (entendida como tolerancia al desenfoque) como sistema óptico, mediante el estudio de la calidad óptica de las imágenes de objetos situados a distintas distancias. También se compararán dichos resultados para las dos formas de pupila utilizadas a lo largo de este trabajo.

En un ojo emétrope “enfocado” al infinito (objeto lejano) la luz que llega focalizará sobre la retina. Si el objeto se sitúa a 33 cm (3 D de vergencia), el ojo necesitará aumentar su potencia en 3 D para verlo nítidamente. En el caso del bovino, no sólo el ojo es amétrope (hipermétrepe en particular), sino que el cambio de potencia de la acomodación no existe [Sivak, 1980; Baldwin, 1981]. En esas condiciones, con una hipermetropía de +1.00 D, un objeto alejado se verá con un desenfoque de 1 D. Pero además, si dicho objeto se acerca por ejemplo a 1 m de distancia (1 D de vergencia), el desenfoque sobre la retina será de 2 D.

Según lo expuesto en el apartado anterior, el equivalente esférico no cambia con la edad (véase la Figura 5.9) y el valor promedio para todas las edades sería de +1.04 D. Además, la aberración esférica también se mantiene (Figura 5.2). Así, suponiendo que las distancias a las que el toro de lidia observa el mundo que le rodea están entre el infinito y 50 cm (desenfoque de 2 D con respecto a objetos lejanos), el desenfoque al que está sometido su ojo estaría aproximadamente entre 1 y 3 D.

Teniendo en cuenta esto y usando los coeficientes de Zernike, se ha construido un ojo modelo “promedio” para el grupo de edad #1. Para un pupila circular de 6 mm los valores promedio de equivalente esférico, astigmatismo y aberración esférica fueron +1.13 D, 0.54 D y 0.05 μm . En los cálculos hechos para una elíptica equivalente, el valor promedio de la

aberración esférica utilizado fue de $0.26 \mu\text{m}$. Las imágenes retinianas que de un objeto puntual alejado forma dicho ojo para desenfoques entre $+1.00$ y $+3.00$ D y ambas formas de pupila se presentan en la Figura 5.18.

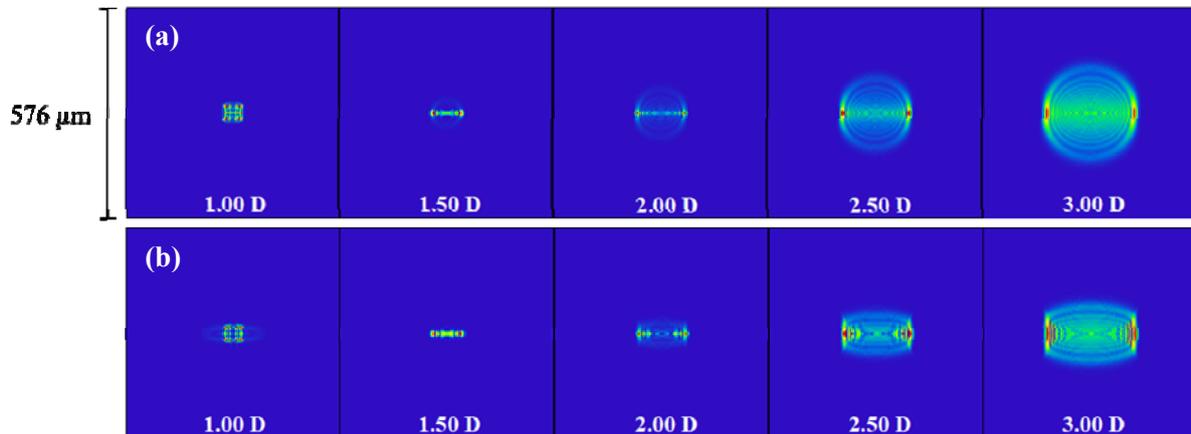


Figura 5.18. Ejemplo de imágenes retinianas en el ojo del bovino de lidia de un objeto puntual alejado para desenfoques entre 1 y 3 D. (a) Pupila circular de 6 mm; (b) pupila elíptica equivalente.

En esta figura se aprecia que para un objeto puntual, las imágenes generadas con ambas pupilas son similares para desenfoques entre 1.00 y 1.50 D (objetos entre el infinito y 2 m de distancia). Sin embargo, entre 2.00 y 3.00 D, con una pupila elíptica la imagen en dirección horizontal “se achata” perdiéndose la simetría que tiene con pupila circular. Es decir, el efecto del astigmatismo es más acusado en presencia de una pupila elíptica. Así, entre 2.00 y 3.00 D, la imagen de objetos horizontales debería ser más nítida. Debido a ello es interesante analizar qué pasa con la imagen y el desenfoque para ambas pupilas cuando los objetos están en posiciones horizontal y vertical.

Las imágenes retinianas correspondientes a objetos en forma de línea horizontal y vertical se muestran en la Figura 5.19. Las líneas objeto subtenden 2.44 minutos de arco, tamaño equivalente a la agudeza visual del bovino: 0.41 [Heffner and Heffner, 1992]. Con una simple visualización no se aprecia la posible mejora que podría tener lugar con una pupila elíptica. Es por ello que hemos de utilizar métricas cuantitativas de calidad de imagen.

Una de ellas es el denominado radio-RMS de Zemax cuyo valor numérico va asociado a una concentración de la luz más (o menos) efectiva. Como ya se indicó en el apartado 2.3.4, dicho parámetro proporciona información sobre la dispersión de la luz y el propio *software* lo calcula como una desviación cuadrática media entre la posición geométrica de los rayos que forman la imagen y el centro de ésta. En términos generales, la imagen será tanto mejor cuanto menor sea el radio-RMS. En la Figura 5.20 se muestra dicho parámetro para ambas formas pupilares con distintos desenfoques en el caso de una línea horizontal.

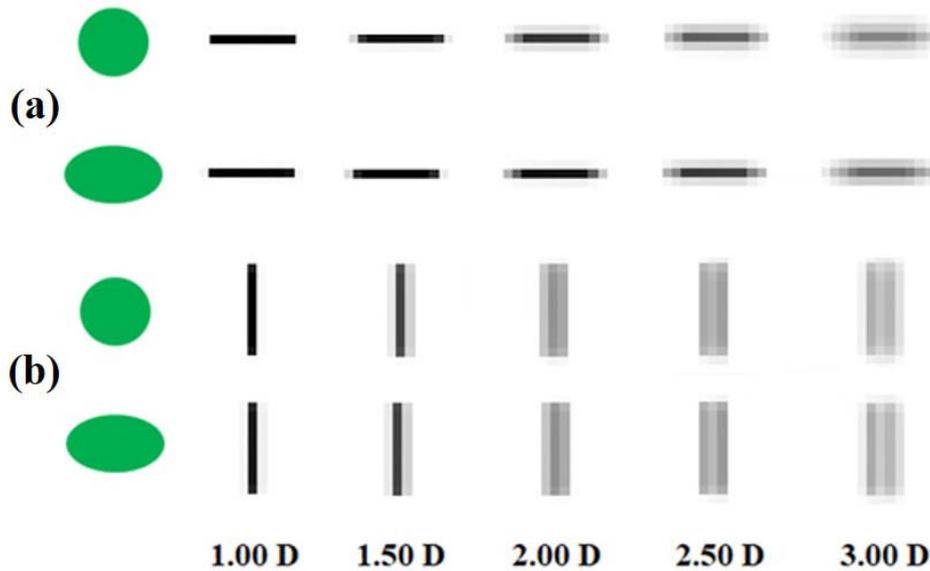


Figura 5.19. Imágenes retinianas que de líneas horizontales (a) y verticales (b) forma el ojo del bovino de lidia con dos formas de pupila diferentes. Los valores de desenfoque y de tamaño de pupila son los mismos que en la figura anterior.

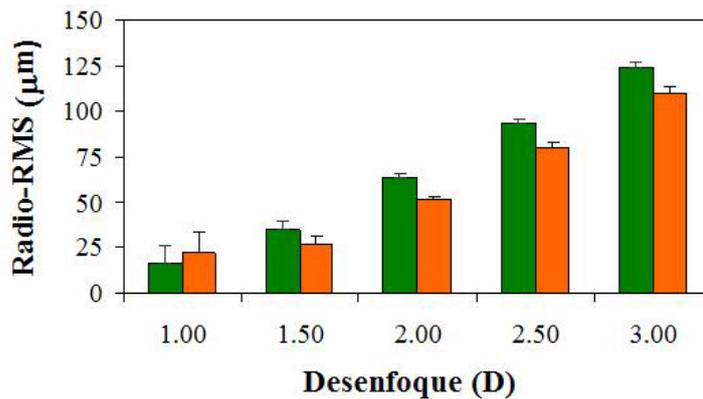


Figura 5.20. Radio-RMS para distintos desenfoques de una línea horizontal en el grupo de edad #1. Pupila circular (verde) y pupila elíptica (naranja).

Como se puede esperar, para ambas formas de pupila, el radio-RMS crece con el desenfoque. Esta reducción en la calidad de imagen es más acusada con una pupila circular (x7.5 de 1.00 a 3.00 D) que con una elíptica (x5). Además, hasta 1.50 D de desenfoque, los valores de radio-RMS no difieren significativamente entre ambas pupilas. Sin embargo, para desenfoques a partir de 2.00 D, el parámetro es ~20% menor para la pupila elíptica y esta diferencia es significativa. Estos hechos implican una mejora en la calidad de imagen y por tanto una mayor la profundidad de foco al usar una pupila elíptica con respecto a la circular.

Para el análisis de este aumento en la profundidad de foco se ha utilizado también un parámetro más estandarizado (y no tan particular del *software* Zemax) como es el área bajo la MTF. Para cada ojo del grupo #1 se calcularon las MTF correspondientes (desenfoques y pupilas) y el área bajo éstas para dos frecuencias de corte distintas: 6 y 12.3 ciclos/grado. Los

resultados para ésta última se muestran en la Figura 5.21. El comportamiento es similar para 6 ciclos/grado.

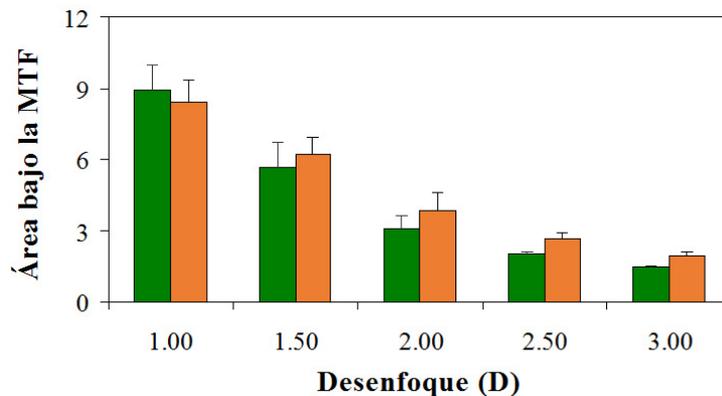


Figura 5.21. Área bajo la MTF (frecuencia de corte 12.3 ciclos/grado) para distintos desenfoques en el grupo de edad #1. Pupila circular (verde) y pupila elíptica (naranja).

El área bajo la MTF se reduce con el desenfoque (esperable por la pérdida de calidad óptica que se produce) para ambas pupilas (y frecuencias de corte). Entre 1 y 3 D hay una disminución del área bajo la MTF de un 84% para pupila circular pero sólo del 76% para la elíptica. De nuevo se observa que para 1.00 y 1.50 D de desenfoque, los valores de la métrica son similares con ambas pupilas. Sin embargo, para desenfoques por encima de 2.00 D, el área para la pupila elíptica es entre un 24 y un 34% mayor que para pupila circular. Este hecho vuelve de nuevo a corroborar una mayor tolerancia al desenfoque para el caso de una pupila elíptica.

En este punto es importante destacar que al contrario que para objetos horizontales, para verticales no se encontraron diferencias significativas en la calidad de imagen entre ambas geometrías de pupila.

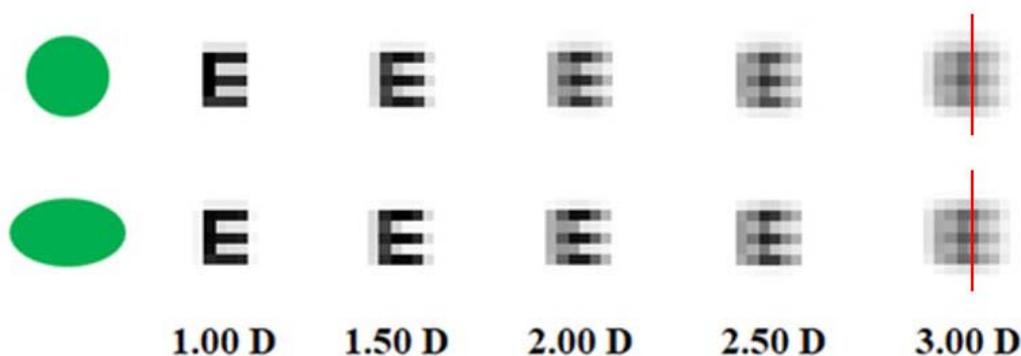


Figura 5.22. Imágenes retinianas de la E de Snellen sobre la retina del toro de lidia en función del desenfoque para ambas geometrías pupilares.

Finalmente, la Figura 5.22 muestra los resultados tomando como objeto la E de Snellen, con un tamaño acorde a la misma agudeza visual de las figuras precedentes. Para apreciar las diferencias entre ambas formas de pupila, los perfiles de intensidad a lo largo de las líneas

verticales rojas (3.00 D de desenfoque) se han representado en la Figura. 5.23. Se observa que para una pupila elíptica los valores de intensidad en los tres brazos de la E de Snellen están por encima de los correspondientes a la pupila circular. Puesto que los mínimos son también más bajos, esto conduce a un aumento del contraste del 25%, a una mejor imagen retiniana y por tanto a un incremento de la profundidad de foco, o dicho de otra forma, de la tolerancia al desenfoque. Si en lugar de 6 mm, la pupila es de 8 mm (con sus correspondientes valores de ametropía y aberración esférica), este aumento en el contraste llega hasta el 33%.

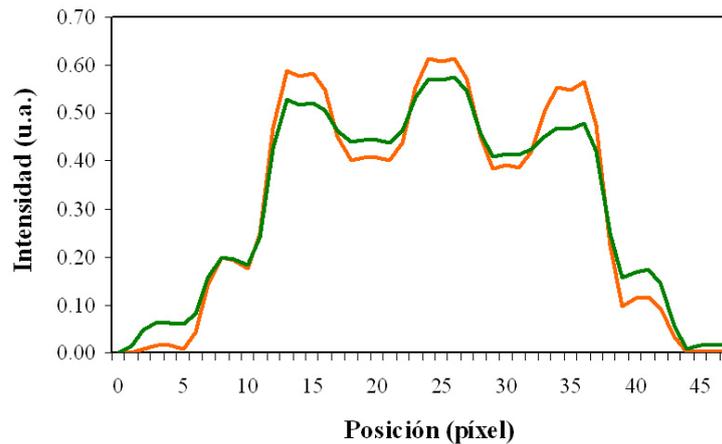


Figura 5.23. Perfiles de intensidad a lo largo de las líneas rojas de la Figura 5.22. Verde, pupila circular; naranja, pupila elíptica.

En los ejemplos anteriores se han usado figuras geométricas sencillas como objetos. Como ejemplo final, en la Figura 5.24 se comparan las imágenes retinianas para las dos formas pupilares de una escena típica del mundo del toro (torero enfrontilado en la suerte de matar) donde los detalles están asociados a frecuencias espaciales altas.

En las imágenes se puede apreciar cómo para un desenfoque bajo las imágenes son muy similares (incluso algo peor la de pupila circular). Sin embargo, para pupila elíptica y 2.00 o 3.00 D de desenfoque la imagen tiene mejor calidad que la que corresponde a una pupila circular.

Para eliminar la posible componente subjetiva del observador, se ha verificado cuantitativamente este hecho usando la acutancia como parámetro objetivo de calidad. Esta métrica se basa en el análisis de los contrastes locales de la imagen y proporciona información sobre la diferencia de intensidades asociada a la visualización de detalles [Hunter et al., 2007]. Así cuanto mayor es esta diferencia mayor será el valor del parámetro y más nítida la imagen. Si la imagen es uniforme, la acutancia será nula independientemente del nivel de gris que presente.

Los resultados muestran que efectivamente, la razón entre las acutancias con pupila elíptica y circular es menor que la unidad para 1.00 D de desenfoque. Sin embargo toma valores de 1.19 y 1.37 para 2.00 y 3.00 D respectivamente.

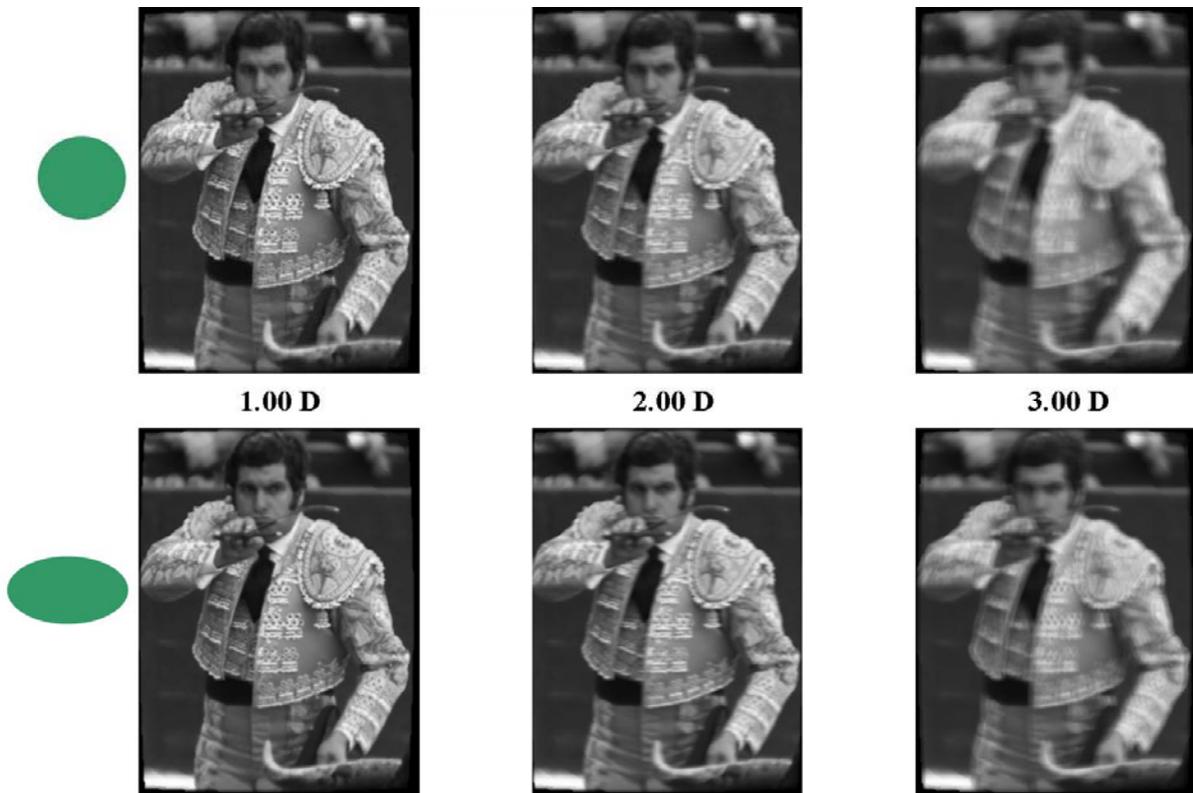


Figura 5.24. Imágenes retinianas en el ojo del toro de lidia con distintos desenfoques y geometrías de pupila (circular y elíptica). Se aprecia un mayor número de detalles en la imagen formada por la pupila elíptica para 2.00 y 3.00 D debido a la mayor profundidad de foco.

Todos estos últimos resultados se refieren a la calidad de imagen en visión central. Sin embargo, puesto que se tienen también datos sobre la óptica ocular para diferencias excentricidades (apartados 5.2.3 y 5.3.2), se ha realizado la misma operación para 45° de excentricidad. Como era de esperar, la calidad de la imagen retiniana es notablemente peor debido fundamentalmente al aumento tanto del astigmatismo como de la aberración esférica. Sin embargo, al comparar las dos geometrías pupilares, la elíptica sigue proporcionando imágenes con un mejor contraste (>30%).

5.5. Discusión

En este capítulo último de resultados se ha descrito la óptica del ojo del bovino de lidia a partir de la combinación de las geometrías y las aberraciones de la córnea y del cristalino expuestos en los Capítulos 3 y 4. Todos los resultados de este capítulo se han obtenido mediante modelos de simulación óptica basados en trazado de rayos.

En concreto se ha analizado la rotación relativa entre ambos elementos ópticos y su efecto en la minimización de astigmatismo ocular total. Se ha calculado la aberración esférica del ojo completo y sus posibles cambios con la edad, con el ángulo de incidencia de la luz sobre el ojo y cuando en lugar de una pupila circular se considera una elíptica. También se han explorado los efectos de las asfericidades de las superficies de los elementos oculares sobre la aberración esférica total. Además, se ha estudiado la refracción ocular (en términos de esfera equivalente y astigmatismo) y los cambios que ésta sufre con la forma de la pupila y el ángulo de incidencia. Finalmente se ha analizado el aumento de la profundidad de foco en el ojo del bovino de lidia cuando se compara una pupila elíptica (como la que tiene de forma natural) con una circular.

5.5.1. Orientación relativa córnea-cristalino

Los resultados muestran que la orientación relativa córnea-cristalino que hace que el astigmatismo ocular sea similar al medido con retinoscopía es aquella en la que el meridiano de mayor potencia del cristalino se encuentra girado 90° con respecto al meridiano de mayor potencia corneal (que suele ser el vertical). Además, esta configuración también minimiza el astigmatismo ocular total (y por tanto la refracción ocular). Este hecho implica que al menos en lo que a astigmatismo se refiere, esta aberración de bajo orden en la córnea podría estar parcialmente corregida por el cristalino. No se ha encontrado bibliografía sobre el bovino a este respecto, pero esto es coherente con lo que ocurre en el ojo humano, donde se produce una compensación de los coeficientes de Zernike del astigmatismo (C_2^2 , C_2^{-2}) entre córnea y cristalino [Artal et al., 2001; Kelly et al., 2004].

5.5.2. Aberración esférica

En lo que a la aberración esférica total se refiere, en este trabajo se ha mostrado que no cambia con la edad. Además, su valor es muy bajo (y ligeramente positivo, +0.02 μm de media para una pupila circular de 6 mm), lo que hace también pensar en una combinación

optimizada de las contribuciones individuales de la córnea y del cristalino. En términos generales, para una pupila circular de 6 mm la aberración esférica corneal tiene un valor de $-0.08 \pm 0.05 \mu\text{m}$ como se ha visto en el Capítulo 4. Por el contrario, en el cristalino, tiene un valor medio de $+0.39 \pm 0.05 \mu\text{m}$ como se expuso en el Capítulo 3. Estos valores promedio tal cual no justifican comportamientos individuales, pero al menos indican que los signos de las esféricas son opuestos en la córnea y el cristalino.

La falta de literatura sobre la óptica del ojo del bovino hace que no podamos comparar estos resultados con otros publicados previamente. Sin embargo, en el ojo humano el mecanismo de compensación está muy estudiado. En particular en ojos de sujetos jóvenes la aberración esférica de la córnea (positiva) es compensada parcialmente por el cristalino (negativa) dejando una aberración esférica del conjunto del ojo ligeramente positiva [Artal et al., 2001; Taberero et al., 2007]. Sin embargo, con la edad, esta compensación se reduce y las aberraciones del ojo completo aumentan [Artal et al., 2002; Brunette et al., 2003]. Esto ocurre no sólo para la esférica sino también para el astigmatismo y el coma.

Como cabría esperar, la aberración esférica también se ve afectada por el tamaño pupilar. Para el conjunto del ojo del bovino de lidia se han comprobado los valores de dicho término de aberración para tres tamaños de pupila circular. Así por ejemplo, en el grupo de edad #1 el valor aumenta 5 veces al pasar de 4 a 6 mm y 3.6 veces mayor al pasar de 6 mm a 8 mm ($\times 18$ de 4 a 8 mm). Este cambio es totalmente coherente pues esta aberración va con la potencia cuarta del diámetro pupilar. Así, al duplicar el tamaño de la pupila, la aberración esférica se multiplica por 16. Este hecho también se ha mostrado el ojo humano [Calossi, 2007].

La asfericidad de ambos componentes oculares tiende a reducir la aberración esférica del ojo cuando se compara con un ojo en el cual ambos elementos se consideran con superficies puramente esféricas. Sin embargo, el peso de esta reducción se debe exclusivamente a la asfericidad corneal, pues la del cristalino por sí sola tiende a aumentarla. Este aspecto no es exclusivo de este modelo animal, puesto que también se ha reportado que en el ojo humano la aberración esférica total disminuye al aumentar la asfericidad corneal [Calossi, 2007; Lombardo and Lombardo, 2010].

El estudio de los cambios en la aberración esférica con la excentricidad retiniana indica que se mantiene relativamente constante en la dirección horizontal, con un valor promedio de $+0.06 \pm 0.01 \mu\text{m}$ para una pupila circular de 6 mm. Sin embargo, en la dirección vertical el cambio hacia la periferia es significativo, llegando hasta $+0.19 \mu\text{m}$ a los 45° de excentricidad. En el ojo humano también se ha encontrado que dicha aberración esférica se mantiene en un

valor prácticamente constante a lo largo del meridiano horizontal [Romashchenko et al., 2020], o con una ligera reducción hacia la periferia [Lundström et al., 2009]. En la dirección vertical, los estudios sobre aberración esférica son escasos y no concluyentes [Mathur et al., 2008].

Pupila elíptica vs. pupila circular

La aberración esférica no sólo está afectada por el tamaño de la pupila, sino también por la forma de ésta. Aunque en los humanos dicha pupila tiene forma circular, esto no es así en el reino animal, donde las formas y la orientación varían [Malmström and Kröger, 2006]. La forma ovalada (o elíptica) horizontal aparece en mamíferos herbívoros como los bovinos, los ovinos y los équidos. En gatos, zorros, cocodrilos y algunas serpientes la orientación es vertical. Sin embargo, en los perros es circular, al igual que en el cerdo o en los roedores. En condiciones de dilatación estas formas pasan a ser circulares.

En este trabajo se han comparado los resultados de una pupila elíptica con una pupila circular con el mismo área para los tres tamaños pupilares. Se ha encontrado un aumento en los valores de aberración esférica con la pupila elíptica con respecto a la circular, que dependiendo del tamaño de pupila considerado está entre 5.3 y 6 veces. Este aumento considerable de aberración esférica hacia valores positivos, añadido al hecho de que el ojo es hipermetrope, favorecerá la profundidad de foco como se discute posteriormente.

Además, teniendo en cuenta la excentricidad retiniana, en la dirección horizontal los valores de aberración esférica se mantiene relativamente constantes. Sin embargo en la dirección vertical los valores se duplican con respecto a la zona de visión central.

5.5.3. Refracción ocular

En términos de esfera equivalente la refracción ocular promedio para todos los animales fue de $+1.04 \pm 1.40$ D. Separados por meridianos, en el horizontal la refracción es mayor que la del meridiano vertical ($+1.43 \pm 1.42$ D frente a $+0.64 \pm 1.47$ D), siendo en ambos hipermetropes para la mayoría de ojos estudiados, concretamente el 85 y el 75 % respectivamente. Aunque presenta variaciones interindividuales, no se han encontrado variaciones con el tamaño de pupila.

Esta diferencia de refracción entre las dos direcciones da muestra de un marcado astigmatismo ocular (valor medio de 0.79 ± 0.71 D) que en el 90% de los ojos estudiados presenta un meridiano vertical con mayor potencia que el horizontal (astigmatismo a favor de

la regla). Esto es esperable debido al gran poder refractivo de la córnea en la óptica ocular y a que en ella predomina un meridiano vertical de mayor potencia (Capítulo 4).

No se han encontrado variaciones significativas con la edad ni para la esfera equivalente ni para el astigmatismo. En estudios previos se reportó que la refracción del bovino de lidia medida con un retinoscopio es de $+0.66 \pm 0.85$ D en el meridiano horizontal y -0.06 ± 0.45 D para el vertical, no encontrándose cambios con la edad [Lo Sapiro, 2015; Bueno et al., 2017].

Los resultados aquí obtenidos son coherentes con éstos en varios sentidos. Por una parte, porque el meridiano vertical es más potente que el horizontal y los valores de astigmatismo son similares (0.73 ± 0.30 D [Lo Sapiro, 2015]) y por la otra porque tampoco hay cambios con la edad. Sin embargo, los valores de refracción en el presente trabajo están “desplazados” y son “más hipermétropes” (~ 0.75 D). La razón de este *bias*, puede ser debida a que los valores usados para la longitud axial son valores promedio publicados anteriormente, los cuales podrían ser en media menores que los individuales de cada ojo (que no se conocen).

En humanos tiene lugar un proceso temporal de emetropización. El ojo humano es hipermetrope en el momento nacimiento. Con la edad el globo ocular va creciendo hasta pasados los 20 años, momento en el que normalmente estabiliza su tamaño e idealmente deber ser emétrope. Sin embargo, no siempre se da esta circunstancia a la que afectan múltiples factores, pudiendo quedar hipermetrope al no crecer lo suficiente, o miope si crece más de lo adecuado [Flitcroft, 2014].

Un estudio a nivel global ha mostrado que en promedio la prevalencia de miopía, hipermetropía y astigmatismo es respectivamente de 11.7%, 4.6% y 14.9% en niños y de 26.5%, 30.9% y 40.4% en adultos [Hashemi et al., 2018]. En dicho estudio también se indica que la prevalencia de miopía ha aumentado un 10.4% entre 1993 y 2016.

Con respecto a la excentricidad retiniana, el equivalente esférico relativo, se mantiene básicamente constante en la dirección horizontal (el valor extremo es $\sim -1/4$ D). Por el contrario, en la dirección vertical (superior e inferior) el cambio centro-periferia tiende hacia una clara hipermetropía ($+1.28$ D).

A diferencia del bovino de lidia, en humanos, tanto los ojos hipermétropes como los emétropes tienen una refracción periférica horizontal (a $40-45^\circ$ de excentricidad) claramente negativa con respecto a la visión central [Atchison et al., 2006; Romashchenko et al., 2020]. Por el contrario, en ojos miopes la refracción periférica tiende a ser más hipermetrope. El cambio pronunciado en la dirección vertical también se ha encontrado en el ojo humano, pero a diferencia que en el modelo animal aquí estudiado, los cambios fueron hacia la miopía [Atchison et al., 2006].

La refracción periférica está fuertemente afectada por el astigmatismo oblicuo, que hace que el astigmatismo puramente “refractivo” se vea incrementado notablemente. Tal es así que en el meridiano horizontal llega hasta 4.49 D a 45° en las direcciones nasal y temporal. Sin embargo, en la dirección vertical el aumento es menor (hasta 3.55 D). Como cabe esperar, en humanos este incremento de astigmatismo también se ha encontrado en ambas direcciones [Atchison et al., 2006; Lundström et al, 2009; Romashchenko et al., 2020].

Pupila elíptica vs. pupila circular

La refracción ocular no sólo está afectada por la excentricidad retiniana, sino también por la geometría de la pupila. Es interesante destacar que en la dirección horizontal de la pupila elíptica, el cambio centro-periferia del equivalente esférico relativo tiende hacia valores miopes (cercano a -0.5 D a $\pm 45^\circ$). Esto contrasta con la pupila circular donde no hay prácticamente cambios. Por el contrario, en la dirección vertical el comportamiento es similar al de la pupila circular (hipermetropía, con un valor de +1.12 D a $\pm 45^\circ$). En particular, este cambio miópico relativo para objetos excéntricos colocados en el meridiano horizontal tiende a reducir la hipermetropía nominal central, lo cual favorecería la visión de objetos situados más cerca y fuera de eje.

Cuando se analiza el efecto que una pupila elíptica tiene sobre el astigmatismo en función de la excentricidad retiniana se ha observado que los cambios son parecidos a los que se generan con una pupila circular.

5.5.4. Profundidad de foco

En términos sencillos, la profundidad de foco se puede definir como el rango de distancias donde la imagen de un objeto formada a través de un sistema óptico parece “no estar desenfocada” [Ogle and Schwartz, 1959]. La anti-imagen de esta distancia en el espacio objeto es lo que se define como profundidad de campo, es decir, son las posiciones que puede ocupar un objeto sin que la imagen se vea desenfocada (o en términos más técnicos, que no reduzca su calidad óptica). Como ya se dijo anteriormente, es básicamente un incremento de la tolerancia al desenfoco.

En el sistema visual humano, el aumento en la profundidad de foco se suele medir de forma subjetiva y se asocia a un incremento de agudeza visual y/o de sensibilidad al contraste. Sin embargo, en el estudio de un sistema óptico determinado, el análisis tiene que pasar necesariamente por el uso de métricas objetivas de calidad de imagen.

En este trabajo se ha analizado la profundidad de foco en el ojo del toro de lidia para valores de desenfoque entre +1.00 y +3.00 D, es decir, objetos colocados entre el infinito (visión lejana) y 0.5 m (visión cercana; téngase en cuenta que el modelo de ojo utilizado tiene una ametropía media de +1 D aproximadamente).

Independientemente de la forma de la pupila y como se podría esperar, un aumento del desenfoque (es decir, un objeto a observar en una posición más cercana) lleva irremediablemente a una disminución progresiva de la imagen retiniana.

Sin embargo, el aspecto interesante aparece cuando se comparan las dos pupilas. Los resultados muestran que para objetos entre el infinito y 66 cm de distancia, la calidad de imagen es bastante similar. Sin embargo, para desenfoques mayores, la caída es más acusada con una pupila circular. Esto indica que con una pupila elíptica, la tolerancia al desenfoque es mayor. Además, las dos métricas usadas (radio-RMS y volumen bajo la MTF) muestran datos similares. Es interesante destacar que esta mejora sólo se ha encontrado en las imágenes retinianas de un objeto orientado horizontalmente.

Este comportamiento se puede considerar como una consecuencia directa de la presencia de una mayor aberración esférica con una pupila elíptica. Es bien conocido el efecto de la aberración esférica en la visión humana: aumenta la profundidad de foco permitiendo una mejor visión cercana y minimizando el impacto de la presbicia [Villegas et al., 2014]. De hecho, los cambios en aberración esférica ocular total inducidos con lentes intraoculares (personalizadas o no) es una solución muy extendida en el campo clínico para aumentar la profundidad de foco de pacientes pseudofáquicos.

Además de las métricas citadas, también se han evaluado los cambios en el contraste de las imágenes retinianas del objeto conocido como la E de Snellen. Los resultados muestran que el uso de una pupila elíptica aumenta los contrastes de dichas imágenes a partir de 2.00 D de desenfoque. En particular, 25% y 33% para 6 y 8 mm de pupila respectivamente. Esto de nuevo vuelve a mostrar la presencia de una mayor tolerancia al desenfoque, que redundará en beneficio de la visión cercana en este tipo de animales (prébitas por naturaleza). En objeto con componentes de frecuencias espaciales altas el comportamiento es similar.

Es interesante destacar que este efecto también tiene lugar no sólo en visión central sino que permanece al aumentar la excentricidad retiniana (aunque la calidad decrece rápidamente). Es pues un aspecto interesante a tener en cuenta, dado que este tipo de animales utiliza fundamentalmente una visión panorámica [Walls, 1942].

Todo esto muestra por tanto que la pupila elíptica proporciona al sistema ocular del bovino una mayor profundidad de foco que la pupila circular, lo que se podría entender en

cierto modo como una “forma natural” que compensaría en parte la falta de acomodación en este tipo de animales.

5.5.5. Algunos comentarios finales sobre pupilas horizontales

Animales con pupilas horizontales (elípticas, ovaladas,...) suelen ser especies no depredadoras, de tal forma que junto con una posición lateral de sus ojos les facilita la visualización de depredadores sobre la línea del horizonte [Walls, 1942].

Desde el punto de vista óptico, una de las razones “clásicas” que justifican estas pupilas es que son más efectivas que las circulares para el control de la cantidad de luz que llega a la retina, por lo que predominan en animales cuya actividad es crepuscular o nocturna y por tanto necesitan proteger sus ojos de la luz de día [Walls, 1942]. Sin embargo esta razón no es muy convincente porque (1) hay animales como el tarsero (de la familia de los primates) que puede reducir el tamaño de su pupila hasta 0.5 mm y (2) muchos ungulados cuyas pupilas no llegan a ser una “ranura estrecha” en condiciones fotópicas (de alta iluminación) [Land, 2006]. En términos generales, las pupilas ovaladas pueden aumentar su área al menos 10 veces más que lo que lo hacen las pupilas circulares, lo que beneficia la visión en ambientes escotópicos (muy baja iluminación) [Land, 2006; Miller, 2015]

Una explicación más chocante para la génesis de este tipo de forma pupilar está relacionada con la compensación de la aberración cromática [Malmström and Kröger, 2006]. Más recientemente se ha demostrado que estas pupilas mejoran la calidad de imagen de los objetos en la dirección horizontal, lo que facilita la visión panorámica en esa dirección (y por tanto optimiza la detección visual de depredadores) [Banks et al., 2015]. Esta mejora visual en la dirección horizontal también se ha mostrado en animales marinos como el calamar, donde la pupila es también alargada pero con forma de W [Mäthger et al., 2013].

Todo esto apunta a que esta posición alargada horizontal de la pupila es óptima para estos animales terrestres no depredadores. No sólo optimiza los detalles de la imagen retiniana en esa dirección sino que facilita la visión panorámica en la observación de posibles depredadores. Según Banks y colaboradores, también ayuda a resolver el problema fundamental de seguimiento de movimientos rápidos de objetos colocados frontalmente a pesar de la posición lateral de los ojos [Banks et al., 2015]. A esta lista de ventajas con este tipos de pupilas, en el presente trabajo se le ha añadido una más: el aumento de la profundidad de foco en ausencia de acomodación.

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

Conclusiones



CAPÍTULO 6

Conclusiones

En este capítulo final se presentan las conclusiones que se extraen de este trabajo, cuyas principales aportaciones son las siguientes:

- Se ha construido un sistema experimental para el registro de imágenes de sombra de cristalinos aislados. Mediante procesamiento digital se ha determinado la geometría de ambas superficies para distintos meridianos (radio de curvatura y asfericidad), así como el espesor central.
- Con la ayuda de un topógrafo comercial se ha medido la geometría de la primera superficie corneal. En particular, a partir del mapa de elevaciones se han obtenido tanto los valores del radio de curvatura como de asfericidad.
- Se ha implementado un método basado en un programa de diseño óptico y un trazado de rayos exacto para estudiar aberraciones de bajo (astigmatismo) y alto orden (esférica) de la córnea y el cristalino por separado, y formando ambos un sistema óptico conjunto (ojo completo). El procedimiento utiliza los datos de la geometría de la superficie anterior corneal y de las dos caras del cristalino. Para el ojo completo también se ha obtenido la refracción y varios parámetros objetivos de calidad de imagen retiniana en función del desenfoque, excentricidad y forma de la pupila.

Utilizando la metodología anterior se han obtenido los siguientes resultados:

1. El radio de curvatura de la cara posterior del cristalino del toro de lidia es menor (superficie más curvada) que el de la cara anterior. Ambos radios tienden a aumentar con la edad, es decir, las superficies se hacen más planas. Este cambio va asociado al crecimiento natural del ojo, que sería también responsable del aumento de espesor. La asfericidad de la primera superficie del cristalino es positiva (elipse oblata) y no muestra una dependencia significativa con la edad. Sin embargo, en la segunda cara pasa de un valor positivo a uno ligeramente negativo (elipse prolata).
2. Las aberraciones más significativas en el cristalino son el astigmatismo (diferencia entre los radios de curvatura máximo y mínimo de cada una de sus superficies) y la aberración esférica. Mientras que el primero no cambia con la edad, la segunda disminuye y es claramente positiva.
3. La primera superficie corneal del ojo del toro de lidia se hace más plana con la edad, lo que consecuentemente hace que la potencia disminuya. Además, el radio de curvatura correspondiente al meridiano vertical es menor (más curvado) que el del meridiano horizontal. La diferencia entre estos meridianos es el origen del marcado astigmatismo corneal, que no presenta relación alguna con la edad. La asfericidad corneal es negativa, y además se hace más negativa con la edad.
4. De forma similar al cristalino, el astigmatismo y la aberración esférica corneales son los términos dominantes, pero que no presentan relación alguna con la edad. Sin embargo, a diferencia de aquel, en la córnea la aberración esférica es negativa.
5. La orientación relativa córnea-cristalino en el ojo del toro de lidia es aquella en la que el meridiano de mayor potencia del cristalino se encuentra girado 90° con respecto al meridiano de mayor potencia corneal. Esta configuración minimiza el astigmatismo ocular total mediante un mecanismo de compensación parcial entre ambas lentes fisiológicas.
6. La refracción ocular en el meridiano horizontal es mayor que en vertical, siendo hipermetrope en ambos casos para la mayoría de los ojos estudiados. No se han encontrado cambios significativos con la edad. Para pupilas circulares el equivalente

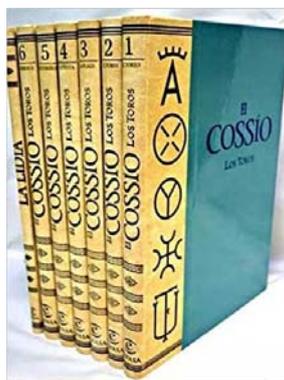
esférico relativo se mantiene constante con la excentricidad retiniana en la dirección horizontal, pero se hace más hipermetrope en la dirección vertical. Sin embargo, para una pupila elíptica la refracción relativa en la dirección horizontal se mueve hacia valores más miopes. Este cambio en la dirección horizontal con pupila elíptica favorecería la visión de objetos situados más cerca y fuera de eje.

7. El astigmatismo ocular es fundamentalmente a favor de la regla, resultado directo de la dominancia del poder refractivo córnea en comparación con el del cristalino. No se ha encontrado una relación con la edad y las variaciones con la excentricidad retiniana son las esperables por la aparición de astigmatismo oblicuo. Pupilas circulares y elípticas se comportan de forma similar tanto en la dirección horizontal como en la vertical.
8. La aberración esférica del ojo completo (modelo que acopla córnea y cristalino) para una pupila circular tiene un valor positivo moderado y no cambia con la edad. La asféricidad de ambos componentes oculares tiende a reducir la aberración esférica del ojo, aunque el peso de esta reducción se debe exclusivamente a la asféricidad corneal. Con la excentricidad retiniana, la aberración esférica se mantiene prácticamente constante en la dirección horizontal, mientras que en la dirección vertical se hace más positiva, aumentando su valor hasta casi 4 veces.
9. Con una pupila elíptica, la aberración esférica puede llegar a aumentar hasta 5 veces con respecto a los valores de una pupila circular (para los tamaños aquí usados). Con la excentricidad horizontal los cambios también son mínimos. En la dirección vertical, los valores, aunque crecen solamente llegan al doble que en visión central (posiblemente por la asimetría de la forma pupilar y su menor dimensión en esa dirección).
10. La calidad de imagen retiniana es similar con pupila circular y elíptica para objetos lejanos. Sin embargo, se deteriora con mayor rapidez al aumentar el desenfoque (acercar los objetos) en el caso de una circular. Esto implica una mayor tolerancia al desenfoque por parte de una pupila elíptica.
11. Para desenfoques mayores de +2.00 D, el contraste de objetos horizontales llega a ser al menos un 25% mayor con una pupila elíptica que con una circular. No se aprecian

efectos de mejora en el caso de objetos orientado verticalmente. Además, en objetos con un alto contenido en frecuencias espaciales altas, la pupila elíptica da lugar a imágenes retinianas con una calidad de imagen objetiva claramente superior (al menos del 20%).

12. Todo esto indica que la óptica el ojo del toro de lidia junto con su pupila elíptica dan lugar a un sistema óptico con una mayor profundidad de foco. Esto se debe fundamentalmente a los cambios que sufre la aberración esférica con dicha geometría pupilar. Puesto que este tipo de animales está caracterizado por su falta de acomodación, esta tolerancia al desenfoco aumentada se podría entender como una “compensación” o “defensa” natural del sistema visual del bovino contra esa marcada presbicia.

Bibliografía



Akopyan AV and Zaslavsky AA. *Geometry of conics*, American Mathematical Society (2007).

Aly K. *Glycohistochemical, immunohistochemical and electron microscopic examination of the bovine eyeball*, Tesis Doctoral, Ludwig-Maximilians-Universität, München (2003).

Artal P, Guirao A, Berrio E and Williams DR. “Compensation of corneal aberrations by the internal optics in the human eye,” *J Vis.* **1**(1), 1-8 (2001).

Artal P, Berrio E, Guirao A and Piers P. “Contribution of the cornea and internal surfaces to the change of ocular aberrations with age,” *J. Opt. Soc. Am. A.* **19**(1), 37-43 (2002).

Atchison DA, Pritchard N and Schmid KL. “Peripheral refraction along the horizontal and vertical visual fields in myopia,” *Vision Res.* **46**(8-9), 1450-8 (2006).

Baldwin BA. “Shape discrimination in sheep and calves,” *Anim. Behav.* **29**(3), 830-834 (1981).

Banks MS, Sprague WW, Schmoll J, Parnell JAQ and Love GD. “Why do animal eyes have pupils of different shapes?,” *Sci. Adv.* **1**(7), e1500391 (2015).

Bhardwaj V and Rajeshbhai GP. “Axial length, anterior chamber depth-a study in different age groups and refractive errors,” *J. Clin. Diagn. Res.* **7**(10), 2211–2 (2013).

Birkenfeld J, de Castro A, Ortiz S, Pascual D and Marcos S. “Contribution of the gradient refractive index and shape to the crystalline lens spherical aberration and astigmatism,” *Vision Res.* **86**, 27-34 (2013).

Birkenfeld J, de Castro A and Marcos S. “Contribution of shape and gradient refractive index to the spherical aberration of isolated human lenses,” *Inves. Ophthalmol. Vis. Sci.* **55**(4), 2599-607 (2014).

Born M, Wolf E and Bhatia M. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, 7th ed., Cambridge University Press (1999).

Brown N. “The change in lens curvature with age,” *Exp. Eye Res.* **19**(2), 175–83 (1974).

Brunette I, Bueno JM, Parent M, Hamam H and Simonet P. “Monochromatic aberrations as a function of age, from childhood to advanced age,” *Inves. Ophthalmol. Vis. Sci.* **44**, 5438-46 (2003).

Bueno JM, Lo Sapio M, Sanes JM and Seva J. “Analysis of the ocular refractive state in fighting bulls: astigmatism prevalence,” *Biomed Res. Int.* **2017**, 8203269 (2017).

Calossi A. “Corneal asphericity and spherical aberration,” *J. Refract. Surg.* **23**(5), 505-14 (2007).

Castejón-Mochón JF, López-Gil N, Benito A and Artal P. “Ocular wave-front aberration statistics in a normal young population,” *Vision Res.* **42**(13), 1611-7 (2002).

- Coile DC and O'Keefe LP. "Schematic eyes for domestic animals," *Ophthalm. Physiol. Opt.* **8**(2), 215-220 (1988).
- Colicchia G and Wiesner H. "Photorefractive of the Eye," *The Physics Teacher.* **53**(2), 103-105 (2015).
- Cumming JS and Ritter JA. "The measurement of vitreous cavity length and its comparison pre- and postoperatively," *Eur. J. Impl. Ref. Surg.* **6**(5), 261-272 (1994).
- Doughty MJ, Petrou S and Macmillan H. "Anatomy and morphology of the cornea of bovine eyes from a slaughterhouse," *Can. J. Zool.* **73**(11), 2159-2165 (1995).
- Dubbelman M and Van der Heijde GL. "The shape of the aging human lens: curvature, equivalent refractive index and the lens paradox," *Vision Res.* **41**(14), 1867-1877 (2001).
- Ehlers N, Sorensen T, Bramsen T and Poulsen EH. "Central corneal thickness in newborns and children," *Acta Ophthalmol.* **54**(3), 285-290 (1976).
- El-Maghraby H, Nyland TG and Bellhorn RW. "Ultrasonographic and biometric evaluation of sheep and cattle eyes," *Vet. Radiol. Ultrasound.* **36**(2), 148-151 (1995).
- Eysteinnsson T, Jonasson F, Sasaki H, Arnarsson A, Sverrisson T, Sasaki K, Stefánsson E, Reykjavik Eye Study Group. "Central corneal thickness, radius of the corneal curvature and intraocular pressure in normal subjects using non-contact techniques: Reykjavik Eye Study" *Acta Ophthalmol. Scand.* **80**(1), 11-15 (2002).
- Fledelius HC and Stubgaard M. "Changes in refraction and corneal curvature during growth and adult life. A cross-sectional study," *Acta Ophthalmol.* **64**(5), 487-491 (1986).
- Flitcroft DI. "Emmetropization and the aetiology of refractive errors," *Eye (Lond).* **28**(2), 169-179 (2014).
- Freitas C, Ruggeri M, Manns F, Ho A and Parel JM. "In vivo measurement of the average refractive index of the human crystalline lens using optical coherence tomography," *Opt. Lett.* **38**(2), 85-87 (2013).
- Gambra E, Ortiz S, Perez-Merino Pablo, Gora Michalina, Wojtkowski M and Marcos S. "Static and dynamic crystalline lens accommodation evaluated using quantitative 3-D OCT," *Biomed. Opt. Express.* **4**(9), 1595-1609 (2013).
- Glasser A and Campbell MC. "Biometric, optical and physical changes in the isolated human crystalline lens with age in relation to presbyopia," *Vision Res.* **39**(11), 1991-2015 (1999).
- Glasser A and Kaufman PL. "Accommodation and Presbyopia," in: *Adler's Physiology of the Eye*, 10th ed., Kaufman PL and Alm A eds., Mosby, St Louis (2003).
- Guirao A, Redondo M and Artal P. "Optical aberrations of the human cornea as a function of age," *J. Opt. Soc. Am. A.* **17**(10), 1697-1702 (2000).

Hashemi H, Asgari S, Emamian MH, Mehravaran S and Fotouhi A. "Age-related changes in corneal curvature and shape: The Shahroud Eye Cohort Study," *Cornea*. **34**(11), 1456-1458 (2015).

Hashemi H, Fotouhi A, Yekta A, Pakzad R, Ostadimoghaddam H and Khabazkhoob M. "Global and regional estimates of prevalence of refractive errors: Systematic review and meta-analysis," *J. Curr. Ophthalmol.* **30**(1), 3-22 (2018).

He J, Lu L, He X, Xu X, Du X, Zhang B, Zhao H, Sha J, Zhu J, Zou H and Xu X. "The relationship between crystalline lens power and refractive error in older chinese adults: The Shanghai eye study," *PLoS One*. **12**(1): e0170030 (2017).

Hecht E. *Optics*, 5th ed., Pearson Education Limited, Harlow, England (2017).

Heffner RS and Heffner HE, "Visual factors in sound localization in mammals," *J. Comp. Neurol.* **317**(3), 219-232 (1992).

Hoffer KJ and Savini G. "Anterior chamber depth studies," *J. Cataract Ref. Surg.* **41**(9), 1898-1904 (2015).

Hrachovina V. "Schwellendichte elektronisch gemittelter Elektroretinogramme dunkel adaptierter Augen," *Graefes Arch Ophthalmol.* **173**, 192-198 (1967).

Hunter JJ, Cookson CJ, Kisilak ML, Bueno JM and Campbell MCW. "Characterizing image quality in a scanning laser ophthalmoscope with differing pinholes and induced scattered light," *J. Opt. Soc. Am. A.* **24**(5), 1284-1295 (2007).

James B and Benjamin L. "The Pupils," in: *Ophthalmology: Investigation and Examination Techniques*, 1st ed., Oxford (2006).

Jones CE, Atchison DA, Meder R and Pope JM. "Refractive index distribution and optical properties of the isolated human lens measured using magnetic resonance imaging (MRI)," *Vision Res.* **45**(18), 2352-2366 (2005).

Kelly JE, Mihashi T and Howland HC. "Compensation of corneal horizontal/vertical astigmatism, lateral coma, and spherical aberration by internal optics of the eye," *J. Vis.* **4**(4), 262-71 (2004).

Khan A, Pope JM, Verkicharla PK, Suheimat M and Atchison DA. "Change in human lens dimensions, lens refractive index distribution and ciliary body ring diameter with accommodation," *Biomed. Opt. Express.* **9**(3), 1272-1282 (2018).

Land MF. "Visual optics: The shapes of pupils," *Curr. Biol.* **16**(5), R167-R168 (2006).

Lo Sapio M. *Estudio sobre diferentes aspectos de la visión y la anatomía ocular del toro de lidia*, Tesis Doctoral, Universidad de Murcia (2015).

Lombardo M and Lombardo G. "Wave aberration of human eyes and new descriptors of image optical quality and visual performance," *J. Cataract Ref. Surg.* **36**(2), 313-331 (2010).

- Lundström L, Gustafsson J and Unsbo P. "Population distribution of wavefront aberrations in the peripheral human eye," *J. Opt. Soc. Am. A.* **26**(10), 2192-2198 (2009).
- Malmström T and Kröger RHH. "Pupil shapes and lens optics in the eyes of terrestrial vertebrates," *J. Exp. Biol.* **209**, 18-25 (2006).
- Martola EL and Baum JL. "Central and peripheral corneal thickness. A clinical study," *Arch. Ophthalmol.* **79**(1), 28-30 (1968).
- Mashige KP. "A review of corneal diameter, curvature and thickness values and influencing factors," *S. Afr. Optom.* **72**(4), 185-194 (2013).
- Mäthger LM, Hanlon RT, Hakansson J, Nilsson DE. "The W-shaped pupil in cuttlefish (*Sepia officinalis*): functions for improving horizontal vision," *Vision Res.* **83**, 19-24 (2013).
- Mathur A, Atchison, DA and Scott DH. "Ocular aberrations in the peripheral visual field," *Opt. Lett.* **33**(8), 863-865 (2008).
- Miller SN. "Predator or prey: proof is in the pupil," *Tigra scientifica.* **2**(1), Article 2 (2015).
- Moreno CR and de la Torre MM. *Guía teórico-práctica para el estudio de anatomía ocular y de las vías visuales*, 2ª ed., Ed. Murcia DM, Murcia (2001).
- Noll RJ. "Zernike polynomials and atmospheric turbulence," *J. Opt. Soc. Am.* **66**(3): 207-11 (1976).
- Ogle KN and Schwartz JT. "Depth of focus of the human eye," *J. Opt. Soc. Am.* **49**(3), 273-80 (1959).
- Oshika T, Klyce SD, Applegate R and Howland HC. "Changes in corneal wavefront aberrations with aging," *IOVS.* **40**(7), 1351-5 (1999).
- Palanker D. "Optical properties of the eye," *Comprehensive Ophthalmol.* Oct. 28, 2013.
- Patel S, Marshall J and Fitzke FW. "Refractive index of the human corneal epithelium and stroma," *J. Refract. Surg.* **11**(2), 100-105 (1995).
- Patel S, Alió JL and Pérez-Santonja JJ. "Refractive index change in bovine and human corneal stroma before and after LASIK: a study of untreated and re-treated corneas implicating stromal hydration," *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* **45**(10), 3523-3530 (2004).
- Pierscionek BK. "Refractive index of the human lens surface measured with an optic fibre sensor," *Ophthalmic Res.* **26**, 32-35 (1994).
- Pierscionek BK. "The refractive index along the optic axis of the bovine lens," *Eye.* **9**, 776-782 (1995).
- Pierscionek BK. "Growth and ageing effects on the refractive index in the equatorial plane of the bovine lens," *Vision Res.* **29**(12), 1759-1766 (1995b).

- Pierscionek BK. "Refractive index contours in the human lens," *Exp. Eye Res.* **64**(6), 887-893 (1997).
- Potter TJ, Hallowell GD and Bowen I. "Ultrasonographic anatomy of the bovine eye," *Vet. Radiol. Ultrasound.* **49**(2), 172-175 (2008).
- Prince JH, Diesam CD, Eglitis I and Ruskell GL. *Anatomy and Histology of the Eye and Orbit in Domestic Animals*. Springfield CCT III (1960).
- Reuland MS, Reuland AJ, Nishi Yutaro and Auffarth GU. "Corneal radii and anterior chamber depth measurements using the IOLmaster versus the Pentacam," *J. Refract. Surg.* **23**(4), 368-373 (2007).
- Richdale KL, Jones LA, Mitchell GL, Zadnik K, Mutti DO and Bullimore MA. "Crystalline lens thickness from infancy to adulthood," *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* **49**, 3137 (2008).
- Romashchenko D, Rosén R, and Lundström L. "Peripheral refraction and higher order aberrations," *Clin. Exp. Optom.* **103**(1), 86-94 (2020).
- Roorda A and Glasser A. "Wave aberrations of the isolated crystalline lens," *J. Vis.* **4**(4), 250-261 (2003).
- Rosales P, Dubbelman M, Marcos S and van der Heijde R. "Crystalline lens radii of curvature from Purkinje and Scheimpflug imaging," *J. Vis.* **6**(10), 1057-1067 (2006).
- Salmon TO, West RW, Gasser W and Kenmore T. "Measurement of refractive errors in young myopes using the COAS Shack-Hartmann aberrometer," *Optom. Vis. Sci.* **80**(1), 6-14 (2003).
- Samuelson DA. "Ophthalmic Anatomy," in: *Veterinary Ophthalmology*, 3rd ed., Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia (1999).
- Schachar RA, Tello C, Cudmore DP, Liebmann JM, Black TD and Ritch R. "In vivo increase of the human lens equatorial diameter during accommodation," *Am. J. Physiol.* **271**(3 Pt 2), R670-R676 (1996).
- Sisson S., Grossman JD and Getty R. *The Anatomy of Domestic Animals*, Vol. 1, 5th ed., W. B. Saunders Company, Philadelphia, PA (1975).
- Siu A and Herse P. "The effect of age on human corneal thickness. Statistical implications of power analysis," *Acta Ophthalmol.* **71**(1), 51-56 (1993).
- Sivak JG. "Accommodation in vertebrates: a contemporary survey," in: *Current Topics in Eye Research*, Zadunaisky JA and Davson H eds., Academic Press, New York (1980).
- Sivak JG and Kreuzer RO. "Spherical aberration of the crystalline lens," *Vision Res.* **23**(1), 59-70 (1983).
- Storey JK and Rabie EP. "Ultrasonic measurement of transverse lens diameter during accommodation," *Ophthalm. Physiol. Opt.* **5**(2), 145-148 (1985).

Tabernero J, Benito A, Alcón E and Artal P. “Mechanism of compensation of aberrations in the human eye,” *J. Opt. Soc. Am A.* **24**(10), 3274-3283 (2007).

Tanimura I. “Comparative morphology of the bulbus oculi of the domestic animals revealed by scanning electron microscopy,” *Jap. J. Vet. Sci.* **39**(6), 643-656 (1977).

Vasudevan B, Sivak J and Simpson T. “Refractive index of the human corneal epithelium, ” *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* **45**, 2882 (2004).

Vasudevan B, Simpson TL and Sivak JG. “Regional variation in the refractive-index of the bovine and human cornea,” *Optom. Vis. Sci.* **85**(10), 977-981 (2008).

Villegas EA, Alcón E, Mirabet S, Yago I, Marín JM and Artal P. “Extended depth of focus with induced spherical aberration in light-adjustable intraocular lenses,” *Am. J. Ophthalmol.* **157**(1), 142-149 (2014).

Walls GL. *The Vertebrate Eye and its Adaptive Radiation*, Hafner Publishing Company (1942).

Xiong Y, Li J, Wang N, Liu X, Wang Z, Tsai FF and Wan X. “The analysis of corneal asphericity (Q value) and its related factors of 1,683 Chinese eyes older than 30 years,” *PLoS One.* **12**(5), e0176913 (2017).

Yaylali V, Kaufman SC and Thompson HW. “Corneal thickness measurements with the Orbscan topography system and ultrasonic pachymetry,” *J. Cataract Refract. Surg.* **23**(9), 1345-1350 (1997).

Zamir E, Kong GYX, Kowalski T, Coote M and Ang GS. “A novel method of quantitative anterior chamber depth estimation using temporal perpendicular digital photography,” *Transl. Vis. Sci. Technol.* **5**(4), 10 (2016).

Agradecimientos

Un gran trabajo requiere dedicación, tiempo desmedido y olvidarse de horarios por parte de quien lo realiza. La elaboración de esta investigación, sin duda, ha supuesto un gran esfuerzo, el descubrimiento de algunas cosas y la renuncia a otras muchas, con el propósito de llegar a alcanzar los objetivos por los cuales, con gran ilusión, me embarqué en esta aventura. Ahora, en las *postrimerías de esta faena*, cuando este largo viaje está llegando a su fin es el momento de fijarme en el retrovisor y agradecer a las personas que lo han hecho posible de una forma u otra, y que han dejado una importante huella en mí, no sólo como investigador, sino también como persona.

En primer lugar, quiero dedicar mi *primer brindis* a mi director Juanma Bueno, por transmitirme su entusiasmo y pasión a la hora de trabajar y de afrontar la vida. Él me apoyó ya desde mi época de estudiante de Grado cuando fui alumno interno. Después, en un *mano a mano* pasamos juntos el periodo del Master, para finalmente darme la oportunidad de realizar esta Tesis Doctoral que sin su dedicación, consejos, empuje y tenacidad nunca habría sido posible llevarla a cabo. Bien es cierto que su vena taurina salmantina fue el germen de este trabajo, pero no lo es más que durante todos estos años siempre ha primado más su “saber-estar científico” que la mera afición a esos bóvidos singulares, peculiares y tan de aquí.

Por supuesto no puedo olvidarme de los otros dos miembros de la *terna* auto-denominada “Ciencia Taurina[®]”: Juan Seva y Manuel Sanes. Ejemplos de profesionalidad, experiencia, destreza y sobre todo amabilidad. Este *segundo brindis* va por vosotros. Sois grandes profesionales del mundo de la veterinaria y bien sabéis que sin vuestro *apoderamiento* el acceso a los animales hubiera sido, sencillamente, imposible. Gracias por vuestras incontables aportaciones *al alimón* desde fuera de la Óptica.

Desde este *burladero* también quiero agradecer a Juan Tabernero los innumerables ratos pasados en su antiguo despacho, que curiosamente ahora es el mío. Con él aprendí a utilizar el que hasta hoy es el programa más famoso de diseño óptico. Aunque *se cayó del cartel inicial*, durante todos estos años nunca ha dejado de echarme una mano en todo lo que he necesitado.

También quisiera dedicar unas palabras a Antonio Benito por introducirme en el mundo de la investigación desde la realización de mi Trabajo Fin de Grado. Gracias por confiar en mí y aunque haya pasado ya un tiempo desde que fui su alumno, en cierta medida aún sigo viéndome así.

Brindando al respetable, no puedo dejar de mencionar a mis profesores de Óptica que dieron pie a que comenzara mi pasión por este mundo. Además de los ya nombrados Juanma y Antonio, quiero destacar a Esther, Eloy, Pedro y Josua.

Y por supuesto a mis padres, apoyo incondicional y sin medida durante todo este tiempo. A ellos les quiero agradecer su paciencia, comprensión y ayuda para seguir adelante en los buenos y en los malos momentos, y por hacer que el día a día sea mucho más fácil ayudándome en todo lo que he necesitado. A mi hermano, que a pesar de no verlo a menudo por la distancia, quiero darle las gracias no sólo por las conversaciones que me sirven de inspiración para continuar, sino por los ratos de diversión, importantes para reponer fuerzas y volver al trabajo.

También, a Susana, por aguantar estos años uno tras otro. Le prometí que serían 3, luego 4 y finalmente han sido 5. No me lo tengas en cuenta, pero ¿no será que esto me gustaba tanto que lo dilataba a sabiendas de que rompía una promesa tras otra? Gracias de corazón, por darme la mano para recorrer este camino que ya acaba y espero que no me sueltes porque seguro que vendrán nuevas aventuras.

Y ahora que casi *estoy en capilla*, como *toricantano* a pocos meses de doctorarme (y no en tauromaquia precisamente) quiero recordar de forma especial a mi abuelo Manuel. Siempre fuiste ejemplo de trabajo, responsabilidad y superación para todos los que tuvimos la suerte de estar contigo. Es por ello que esta Tesis va dedicada a ti. Descansa en paz!!

Burriciego:
*Son aquellos toros defectuosos de la vista,
de los cuales unos ven poco o nada desde lejos,
otros que les sucede lo contrario,
y algunos que de cerca ven bien.*

Los Ojos del Toro
(Victorio de Anasagasti, 1922)

UNIVERSIDAD DE
MURCIA



lo·um

Research in Visual Optics since 1994

