

LA ÓPTICA DEL CRISTALINO DEL BOVINO COMO POSIBLE MODELO DE PRESBICIA

R. Duarte-Toledo, J. Tabernero, J. M. Bueno

Laboratorio de Óptica, Universidad de Murcia, e-mail: raul.duarte@um.es

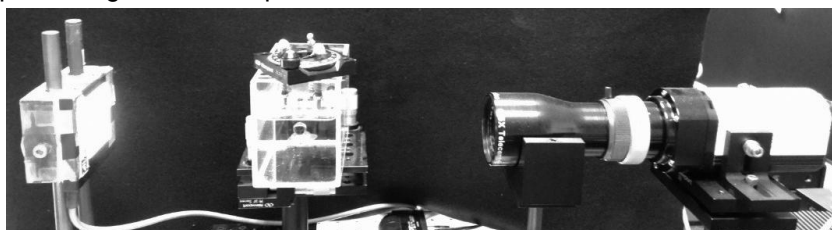
1. Introducción

La capacidad del bovino para enfocar objetos cercanos (acomodación) es mínima o no existe [1-3], debido probablemente a un desarrollo no completo de los músculos ciliares [4]. Además, se conoce que en general, el ojo del bovino no es miope [5] y, por supuesto, el animal realiza tareas que requieren visión de cerca (como, por ejemplo, alimentarse). Esto hace plantearse la siguiente pregunta, ¿cómo debe ser el cristalino del bovino para que estos animales puedan ver a diferentes distancias sin acomodar y sin ser miopes? Para responder a esta pregunta es necesario analizar con detalle la óptica del cristalino de este animal, que viene determinada por su geometría y los índices de refracción. Este estudio se centra en el estudio de la geometría del cristalino del toro de lidia. Con los datos geométricos obtenidos se obtendrá un modelo óptico del cristalino para estudiar su calidad óptica. También se analizará si este modelo fisiológico puede ser aplicable a sistemas ópticos artificiales y en particular al desarrollo de nuevos modelos de lentes intraoculares.

2. Material y métodos

2.1. Sistema experimental

El sistema experimental utilizado tiene por objeto el registro de imágenes de las superficies del cristalino para posteriormente realizar un procesamiento digital que determine 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 los bordes. Para ello, se ha utilizado un sistema óptico formado por los siguientes componentes:



- Fuente de iluminación: Se usa 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.

- Cubeta: recipiente rectangular (abierto por su parte superior) lleno de agua (índice de refracción muy similar al acuoso del ojo, aproximadamente $4/3$) dentro del cual se coloca el cristalino.

- Sistema de formación y captura de imágenes: formado por un objetivo telecéntrico y acoplado a una cámara CCD. El objetivo telecéntrico se caracteriza por proporcionar una gran profundidad de campo y no generar distorsión.

Inicialmente, se llevó a cabo un calibrado para conocer el grado de exactitud con el que se pueden reproducir las curvaturas y asfericidades de las superficies problema. Para ello, se utilizó una esfera de calibrado (asfericidad nula), de la que se conocen sus dimensiones nominales (radio de curvatura=5 mm). En media, se obtuvo un error relativo de un 3% para el radio de curvatura. Con respecto a la asfericidad, en media, los valores fueron muy pequeños y apenas distintos del valor nominal nulo.

2.2. Procedimiento experimental

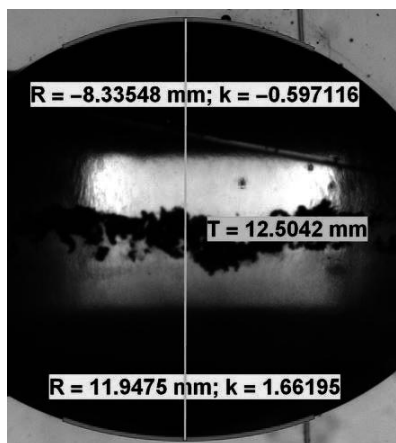
Se han utilizado 8 ojos de toro de lidia, con edades de entre 24 y 56 meses. Los globos oculares fueron enucleados de sus órbitas por veterinarios especializados con el objeto de minimizar el daño. Tras la enucleación, las muestras fueron directamente trasladadas al Laboratorio de Óptica de la Universidad de Murcia, donde se realizaron las medidas.

Para extraer el cristalino del ojo se realizó un corte en el limbo esclero-corneal con un bisturí y, posteriormente, con unas tijeras se cortó un ángulo de unos 180° alrededor del limbo para poder extraer el cristalino. Una vez extraído el cristalino, éste se sitúa sobre su cara posterior en un aro plano transparente. El aro está suspendido de una rueda giratoria graduada por medio de tres hilos.

Con el cristalino situado correctamente se procede a registrar imágenes de retro-iluminación. Se registraron 18 imágenes para cada muestra, una imagen cada 10° (entre 0° y 170°) girando la rueda graduada.

2.3. Procesado digital de las imágenes

La geometría de los meridianos del cristalino se ha descrito usando secciones cónicas obtenidas tras un procesado digital de las imágenes con el software Mathematica 10.0. Mathematica contiene una gran cantidad de funciones ya programadas que permiten realizar todo el procesado digital de forma sencilla 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. Cada parte se corresponde con una superficie del cristalino recortada con un tamaño de pupila de 7.5mm.

2.- A continuación, usando la función "EdgeDetect", Mathematica detecta los bordes de estas superficies, lo cual es posible gracias al contraste entre el fondo de la imagen y el cristalino.

3.- Una vez detectados los bordes, los puntos así definidos se ajustan mediante un procedimiento de mínimos cuadrados a una curva cónica con tres parámetros de ajuste: la posición del vértice, la curvatura y la asfericidad.

4.- Finalmente, se estima el espesor del cristalino como la distancia entre los dos vértices de las dos superficies.

2.4. Trazado de rayos y cálculo de aberraciones

Los datos de la geometría del cristalino obtenidos con Mathematica (radios de curvatura, asfericidades y espesor) se utilizan para calcular las aberraciones ópticas del cristalino. Para ello, se realiza un trazado de rayos exacto, implementado con el programa de diseño óptico y simulación Zemax, el cual resuelve la ley de Snell de manera exacta para cada rayo en cada punto de la superficie. La ley de Snell determina el ángulo de refracción de un rayo de luz a partir del ángulo de incidencia y de los índices de refracción.

Zemax permite representar sistemas ópticos de manera sencilla introduciendo los datos geométricos de las lentes en el denominado "Editor de Lentes". Los índices de refracción tanto del propio cristalino como del humor acuoso (delante) y vítreo (detrás) se tomaron de modelos ópticos de bovinos previamente publicados [6].

Una vez que la descripción geométrica del sistema óptico está introducida en el "editor de lentes" se pueden obtener las aberraciones del sistema expresadas como los coeficientes de un desarrollo en polinomios de Zernikes usando la función "*Zernike standard polynomials*". Se optó por tomar de cada meridiano un volumen de revolución y calcular las aberraciones de dicho cristalino como la media de la aberración esférica tomada en todos los meridianos.

3. Resultados

3.1 Geometría del cristalino

Para la superficie anterior del cristalino, los radios de curvatura (media de todos los meridianos) estuvieron comprendidos entre 10.28 mm y 13.97 mm (media: 11.91 mm; desviación estándar: ± 1.17 mm). Para la cara posterior, los datos se agrupan en un rango incluso más compacto, entre -8.40 mm y -9.03 mm (media: -8.74 ± 0.23 mm).

Con respecto a los valores de las asfericidades en la cara anterior y posterior parece claro que existe una tendencia hacia una asfericidad ligeramente positiva (elipsoide) en la cara anterior del cristalino (media: 0.73 ± 0.57) mientras que la posterior se representa más claramente como una superficie esférica con asfericidad nula (media: 0.00 ± 0.21).

En cuanto al espesor del cristalino, la muestra está compuesta de valores homogéneamente repartidos (desde 12.3 mm hasta 13.53 mm) en torno a su valor promedio (media: 12.75 ± 0.39 mm).

3.2. Aberraciones de bajo orden: Astigmatismo

A partir de los radios de curvatura y el espesor medidos en el apartado anterior es posible calcular el astigmatismo, como la diferencia de potencia entre los meridianos más potente y menos potente del cristalino. Se obtuvieron cilindros entre 0.8 y 3.5 D, aunque la mayoría están en torno a 2 D (media 2.03 D; desviación estándar 0.78 D).

3.3. Aberraciones de alto orden: Aberración esférica

A partir también de los datos geométricos de curvatura, espesor y asfericidad del cristalino, se calculó la aberración esférica para cada cristalino. Usando el procedimiento detallado en la sección 2.4 se obtuvieron los valores de aberración esférica (para una pupila de 6 mm de diámetro). Es importante destacar que en todos los casos la aberración esférica es positiva (media: 0.4 ± 0.05 μm).

4. Discusión

4.1. Aberraciones ópticas

La aberración esférica calculada teniendo en cuenta superficies esféricas (es decir, sin usar el valor de asfericidad obtenido en el procesado digital de imágenes) es menor que la obtenida aplicando la asfericidad medida en cada superficie (en media aumenta un 14%). Esto demuestra que la forma del cristalino del toro de lidia favorece que la aberración esférica sea alta. En cuanto al tamaño pupilar, la aberración esférica aumenta cuanto mayor es dicho tamaño (al igual que ocurre con las demás aberraciones ópticas). En concreto, para una pupila de 6 mm la aberración esférica es de $0.40 \pm 0.05 \mu\text{m}$. Sin embargo, para pupilas de mayor tamaño es aún mayor ($0.77 \pm 0.11 \mu\text{m}$ para una pupila de 7 mm; $1.39 \pm 0.21 \mu\text{m}$ para una de 8 mm). Teniendo en cuenta que la pupila del bovino es de 13x15 mm en condiciones de dilatación parcial [7], esto indica que la aberración esférica del cristalino del toro de lidia es muy alta.

Es necesario tener en cuenta que en este trabajo, el cálculo de la aberración esférica se ha llevado a cabo bajo la incidencia de haces de luz plana (colimada) sobre el cristalino. En un ojo real la incidencia de la luz sobre el cristalino es convergente debido a la potencia de la córnea. Para determinar cuál es la aportación de aberración esférica que el cristalino del toro de lidia hace al ojo en su conjunto, se ha calculado la aberración esférica de una córnea modelo ($0.04 \mu\text{m}$; pupila de 6 mm de diámetro) [6]. Dicho valor se le ha restado a la aberración esférica total del sistema óptico formado por la córnea modelo anteriormente nombrada y los datos del cristalino medidos en cada caso. Esto nos da una media de $0.16 \pm 0.05 \mu\text{m}$ de aberración esférica que aporta el cristalino al conjunto del ojo del toro de lidia.

En un estudio paralelo realizado también en el Laboratorio de Óptica de la Universidad de Murcia se ha estimado mediante topografía corneal que en 13 ojos ex-vivo de toro de lidia la aberración esférica de la córnea en promedio para una pupila de 6 mm es de $-0.25 \mu\text{m}$ (desviación estándar: $0.27 \mu\text{m}$). Por tanto, la aberración esférica total del ojo en media es del orden de $-0.10 \mu\text{m}$ para una pupila de 6 mm.

4.2. Profundidad de foco

Finalmente, el hecho de que la aberración esférica del ojo y el astigmatismo tengan valores significativamente no nulos implica que el sistema óptico del ojo del bovino mantenga una buena profundidad de foco [8]. La profundidad de foco hace que la visión sea tolerable en un rango amplio de distancias del ojo al objeto. Se define como la capacidad de resolver detalles, para los que se requiere una determinada agudeza visual, que están fuera de foco, es decir, desenfocados. Cuanto mayor sea el rango de distancias en las que situando un objeto se ve con una cierta nitidez, mayor será la profundidad de foco [9].

5. Conclusiones

En definitiva, el estudio muestra que la aberración esférica podría permitir al toro de lidia formar imágenes simultáneas en su retina con la suficiente nitidez como para desenvolverse a distintas distancias en su vida cotidiana. Esta conclusión se podría aplicar a otros campos de la óptica permitiendo realizar estudios que podrían servir para conseguir instrumentos ópticos con unas determinadas características útiles. Por ejemplo, la utilización de patrones asféricos que generen una determinada cantidad de aberración

esférica controlada en elementos ópticos de corrección de la visión. En particular, en los pacientes presbitas, permitiría que estos se denervuelvan distintas distancias si no requieren una gran agudeza visual.

Bibliografía

- [1] **Prince JH, et al.** Anatomy and histology of the eye and orbit in domestic animals. *Charles C. Thomas Publisher, Springfield, Illinois, U.S.A.* 1960.
- [2] **Sivak JG.** Accommodation in vertebrates: a contemporary survey. *Current Topics in Eye Research, Zadunaisky JA and Davson H eds., Academic Press, New York.* 1980.
- [3] **Baldwin BA.** Shape discrimination in sheep and calves. *Anim. Behav.* 1981; **29**: 830-834.
- [4] **Glasser A, Kaufman PL.** Accommodation and presbyopia. *Adler's Physiology of the Eye, 10th ed., Kaufman PL and Alm A eds., Mosby, St Louis.* 2003.
- [5] **Bueno JM, et al.** Estado refractivo ocular del toro de lidia. Estudio en condiciones postmortem. Ed. *X Symposium del Toro de Lidia. Libro de Ponencias y Comunicaciones, Badajoz.* 2011; 195-198.
- [6] **Coile DC, O'Keefe LP.** Schematic eyes for domestic animals. *Ophthalmic Physiol Opt.* 1988; **8**: 215-220.
- [7] **Aly K.** Glycohistochemical, immunohistochemical and electron microscopic examination of the bovine eyeball. *Tesis doctoral. Ludwig-Maximilians-Universität – München.* 2003.
- [8] **Villegas EA, et al.** Extended depth of focus with induced spherical aberration in light-adjustable intraocular lenses. *Am J Ophthalmol.* 2014; **157**: 142-9.
- [9] **Ogle K, Schwartz T.** Depth of focus of the human eye. *JOSA.* 1959; **49**: 273-279.