

Lentes y sistemas ópticos lineales para modelizar la visión animal

Lenses and linear optical systems to model animal vision

Trabajo de Fin de Grado

Víctor Agustí Rodríguez

Tutorizado por **Héctor F. Cruz Valentín**. Grado en Biología. Julio 2018

ÍNDICE

Resumen	2
Abstract	2
Introducción	3
La visión como sentido.	3
Lentes delgadas y simplificaciones.	3
Óptica geométrica	3
Objetivos	4
Material y Métodos	5
1er modelo: Estudio de la lentes convergentes.	6
2º modelo: Estudio de las lentes divergentes	8
3º modelo: Integración de ambas lentes en un mismo sistema.	9
Resultados	10
Resultados del estudio de lentes convergentes.	10
Resultados del estudio de lentes divergentes.	11
Resultados del estudio del sistema integrado con dos lentes.	11
Discusión	14
Adaptaciones de las aves.	14
Presencia de 2 fóveas.	16
Visión cromática y adaptaciones fisiológicas a la visión.	16
Acomodación corneal e integración neural.	17
Conclusiones:	18
Conclusions:	19
Bibliografía	20

Resumen

La visión es uno de los sentidos más desarrollados y más importantes en el mundo animal. Existen diferentes mecanismos de visión, sufriendo diferenciaciones y aumentando su complejidad hasta el ojo camerular, el más evolucionado en la naturaleza. Éste será el objeto de estudio de este trabajo y más concretamente la modelización de la visión del Halcón peregrino (*Falco peregrinus*) como ejemplo de una de las mejores visiones del reino animal. Estos animales presentan una característica anatómica: la presencia de 2 foveas en cada ojo. Esta particularidad no es específica de esta especie ni del grupo de las aves, pero al tratarse de uno de los animales con mayor agudeza visual lo utilizaremos como modelo en este trabajo. Para este estudio se han creado una serie de modelos sencillos basados en la óptica geométrica, con el objetivo de simular la visión animal de una manera simple y a su vez, efectiva.

Palabras clave: fovea, aves, óptica geométrica

Abstract

Vision is one of the most developed and most important senses in the animal world. There are different vision mechanisms, suffering differentiations and increasing their complexity until the eye of the camera, the most evolved in nature. This will be the object of study of this work and more specifically the modeling of the vision of the Peregrine Falcon (*Falco peregrinus*) as an example of one of the best visions of the animal kingdom. These animals present an anatomical feature: the presence of 2 foveas in each eye. This particularity is not specific to this species or the group of birds, but since it is one of the animals with the greatest visual acuity, we will use it as a model in this work. For this study we have created a series of simple

models based on optical physics, with the aim of simulating animal vision in a simple and effective way.

Keywords: fovea, birds, geometrical optics.

Introducción

La visión como sentido.

Dentro del mundo animal la visión podría considerarse como el sentido más importante para la vida. Se conocen muchos mecanismos para la visión; desde simples células fotorreceptoras distribuidas en el cuerpo del animal o los ojos compuestos de los invertebrados hasta los ojos camerulares de las rapaces diurnas. Pese a ser un sentido muy complejo, todos los mecanismos de captación de luz deberán estar acondicionados a las diferentes características físicas de la luz. Para que esto sea posible a través de la evolución se han desarrollado estructuras anatómicas cada vez más complejas. El objeto de estudio de este trabajo es el ojo camerular (presente en cefalópodos y vertebrados), concretamente la visión del halcón peregrino (*Falco peregrinus*), una rapaz diurna. Estas aves poseen la mayor agudeza visual en la naturaleza.

Lentes delgadas y simplificaciones.

Para poder modelizar el funcionamiento del ojo de este ave es necesario realizar simplificaciones en óptica geométrica y aproximación paraxial (Puell Marín, M. C.). Usaremos ecuaciones físicas simples como el aumento lateral y la ecuación de lentes delgadas. Además, se comprobará la utilidad de las ecuaciones mediante la ecuación del constructor de lentes. A través de estas simplificaciones podemos crear un sistema óptico lineal y sencillo que explique el funcionamiento de las lentes en la visión animal.

Óptica geométrica

En óptica geométrica el ojo humano es un sistema óptico convergente (positivo) que forma una imagen invertida de lo que se observa sobre la capa sensible de la retina,

situada al fondo del globo ocular. Se trata de un órgano visual que detecta la luz y la convierte en una señal electroquímica que viaja a través de las neuronas.

Objetivos

El objetivo general de este trabajo será la modelización y el estudio de la visión en rapaces diurnas, usando como ejemplo el Halcón peregrino (*Falco peregrinus*). Para poder llevar a cabo este estudio hay que cumplir otros objetivos específicos previos:

1. Comprobación de la ecuación de lentes delgadas y su margen de error en laboratorio para conocer su posible uso.
2. Diseñar un modelo sencillo en el que tras usar ecuaciones físicas simples, podamos entender el funcionamiento de la visión animal y realizar pequeñas predicciones.
3. Comprobar la validez del modelo, predicciones y la diferencia entre la realidad y el modelo debido a las simplificaciones asumidas.
4. Relacionar el modelo con las características visuales de las aves rapaces diurnas.

Material y Métodos

Material.

Para poder realizar este trabajo se ha realizado una revisión bibliográfica, tanto de artículos de investigación contemporáneos como de la revisión del funcionamiento del sistema de la visión en libros de fisiología, óptica y zoología. Además de este material he usado material muy sencillo en el laboratorio de física:

- Regla calibrada
- Fuente de alimentación y fuente de luz
- Juego de cartulinas para comprobar la difracción de la luz
- Juego de lentes convergentes y divergentes.
- Revisión bibliográfica.

Métodos.

Tras la revisión bibliográfica he descubierto que la visión en el mundo animal está basada en un sistema con lentes positivas o convergentes, sin embargo, muchas aves poseen un sistema combinado de lente convergente y divergente. La estructura y el funcionamiento del ojo es muy similar en la mayoría de los vertebrados. El globo ocular es una esfera rellena por un líquido transparente (99% agua) denominado humor acuoso. Está formado por 3 capas:

- Esclerótica, capa más externa
- Coroides, la capa intermedia
- Retina, capa más interna

El globo ocular además posee una lente convergente, el cristalino; un diafragma, conocido como pupila y un tejido sensible a la luz, llamado retina.

En los peces, anfibios y ofidios, el enfoque se realiza desplazando el cristalino (Hickman C. P et al. 2009.) mientras que el resto de grupos animales el enfoque se consigue cambiando el radio de curvatura del cristalino a través de la contracción y relajación de los músculos ciliares.

Para poder crear un modelo que explique la visión en las aves he partido de la base y el apoyo del estudio realizado por Pérez. O (Modelización de la visión animal mediante lentes y sistemas óptico). Siguiendo este estudio nos ahorramos la comprobación de la ecuación de las lentes delgadas, que se deduce a partir de la ecuación del constructor de lentes. Según este trabajo observamos que la potencia del ojo medida en dioptrías varía cuando se enfoca un objeto cercano o uno lejano. Además, la potencia del ojo de un humano y un ave no difiere mucho en cuanto a dioptrías se refiere, por lo que su gran calidad visual debe estar relacionada con otras adaptaciones.

Sabiendo que la potencia en dioptrías de un ojo humano y un ave es similar, me dispongo a realizar un modelo que además de estudiar el mecanismo de la visión de las aves, pueda explicar las diferencias respecto a los humanos y los demás vertebrados.

Dentro del grupo de las aves encontramos ciertos taxones que poseen una característica evolutiva similar: la presencia de 2 fóveas, una utilizada en la visión monocular y otra en la visión binocular (Hart, N. S. 2002). La fóvea se define como una pequeña zona de la retina carente de bastones pero con gran densidad de conos. Al fijar la atención visual en un objeto determinado, la luz del objeto se hace incidir sobre la fóvea que es lugar de la retina con máxima sensibilidad. Las características y diferencias de las dos fóveas serán explicadas más adelante.

Para el estudio del mecanismo de la visión se han realizado tres modelos sencillos, también se ha comprobado en cada uno de ellos su validez y el grado de error que conllevan.

1er modelo: Estudio de la lentes convergentes.

Las lentes convergentes (convexas o positivas) por definición hacen converger o unir los rayos de luz que llegan paralelos al sistema óptico (Kane J. W., et al. 1982). La

imagen que forma es debido a la refracción de los rayos al pasar por la lente, por lo que la imagen sería real.

Para poder realizar un modelo experimental primeramente hubo que comprobar la utilidad de la ecuación de las lentes delgadas. Despreciamos las lentes gruesas ya que no se encuentran en el mundo animal. Siguiendo el convenio americano, podemos presentar la ecuación de las lentes delgadas como:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

s: distancia del objeto. En este caso será la distancia de la lente a la fuente de luz.

s': distancia de la imagen. Punto donde convergen los rayos de luz para formar la imagen.

f: distancia focal. Distancia entre el eje de la lente y el foco.

En este modelo, cambiaremos la distancia de la lente a la fuente de luz (s) para conocer la distancia focal. Cada vez que cambiamos la distancia del objeto, la distancia de la imagen (s') varía, pero la distancia focal debería permanecer igual



Imagen 1. Estudio de las lentes convergentes.

2º modelo: Estudio de las lentes divergentes

Las lentes divergentes (cóncavas o negativas) separan los rayos de luz al pasar por la lente. Esto produce que la imagen no se forme al pasar por la lente, sino que se forma por la prolongación de los rayos de luz a la izquierda de la lente, formando así una imagen virtual. (Kane J. W., et al. 1982)

Utilizaremos de nuevo la ecuación de las lentes delgadas, pero en esta ocasión, despreciamos la distancia objeto, ya que consideramos que los rayos de luz provienen del infinito (aproximación paraxial), siendo la ecuación resultante:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{-s'}$$

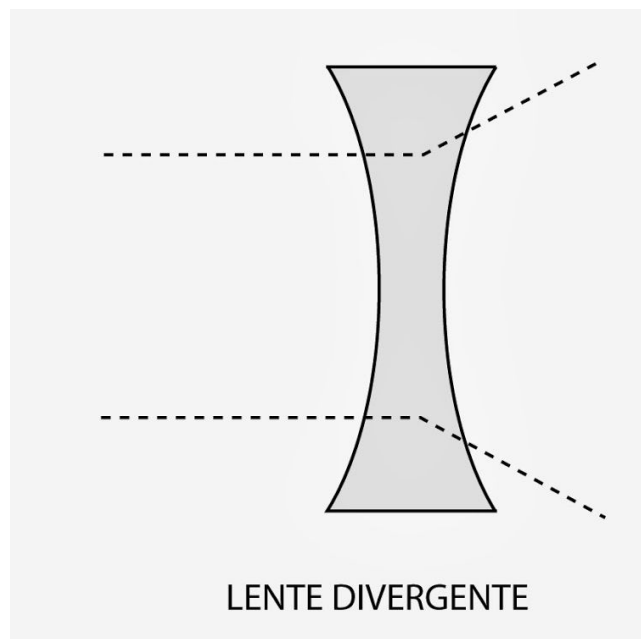


Imagen 2. Lente divergente. Tomada de Google.

3º modelo: Integración de ambas lentes en un mismo sistema.

Como ya se ha comentado, gran variedad de aves poseen dos foveas . Una es denominada la fovea nasal (profunda) y la otra fovea temporal (superficial). La fovea nasal se comporta como una lente divergente, produciendo una ampliación en la imagen. (González-Martín-Moro, J., *et al.* 2017)

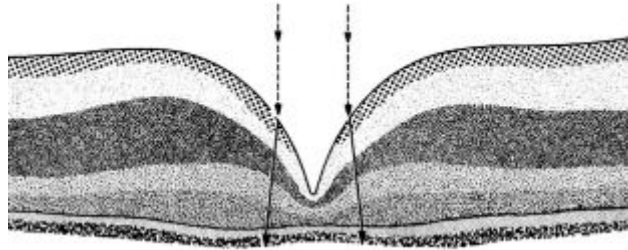


Imagen 3. Efecto amplificador de la fovea profunda. (Fuente: Tomado de Walls, 1942)

Para este modelo hemos usado una lente convergente y una divergente a la vez en un sistema integrado.

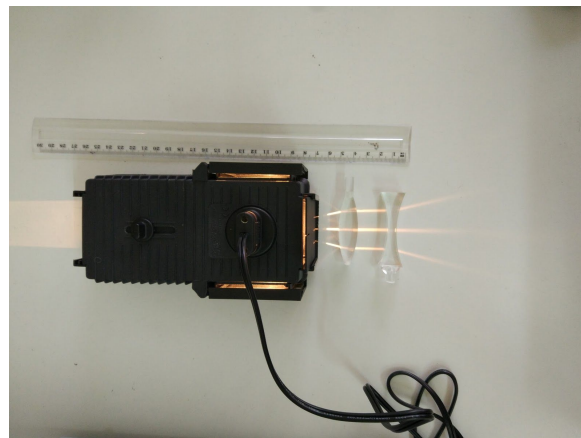


Imagen 5. Estudio de la combinación de las dos lentes.

Resultados

Resultados del estudio de lentes convergentes.

En este modelo, cambiaremos la distancia de la lente a la fuente de luz (s) para conocer la distancia focal. Cada vez que cambiamos la distancia del objeto, la distancia de la imagen (s') varía, pero la distancia focal debería permanecer igual

S	S'	f
12	20	7'5
13	18	7'5
14	17	7'67
15	18	8'1
16	13	7'17
17	13	7'36
18	13	7'55
19	12	7'35
20	12	7'5
21	11	7'22
22	11	7'33
23	11	7'44
24	11	7'54
25	11	7'64

Con estos resultados (medidos en centímetros) haremos un estudio del error obtenido:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}}$$

Siendo el resultado de nuestro error (desviación típica = 0.0608). Con este valor podemos asumir que nuestro modelo es viable y se puede aceptar.

Resultados del estudio de lentes divergentes.

Para poder realizar este modelo se ha usado la misma ecuación de lentes delgadas, pero modificada quedando así:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{-s'} \rightarrow f = -s' \rightarrow f = -5'5 \text{ cm}$$

Utilizaremos dicha ecuación partiendo de las premisas:

- todos los haces de luz provienen del infinito
- todos los haces de luz atraviesan la lente de manera perpendicular

La lente divergente utilizada, posee una distancia focal de -5'5 cm. Esto se explica porque la imagen no se forma al atravesar la lente, sino que se trata de una imagen virtual, es decir, se forma por la prolongación de los haces de luz desviados por la lente.

Resultados del estudio del sistema integrado con dos lentes.

Para este modelo hemos colocado las lentes a unas distancias aleatorias. Para este caso no nos preocupa que las distancias sean similares a las del mundo animal, nos interesa estudiar el efecto de la composición de las dos lentes.

Tras unir las dos lentes (Imagen 6) vemos que los rayos se dispersan desplazándose la imagen a la derecha.

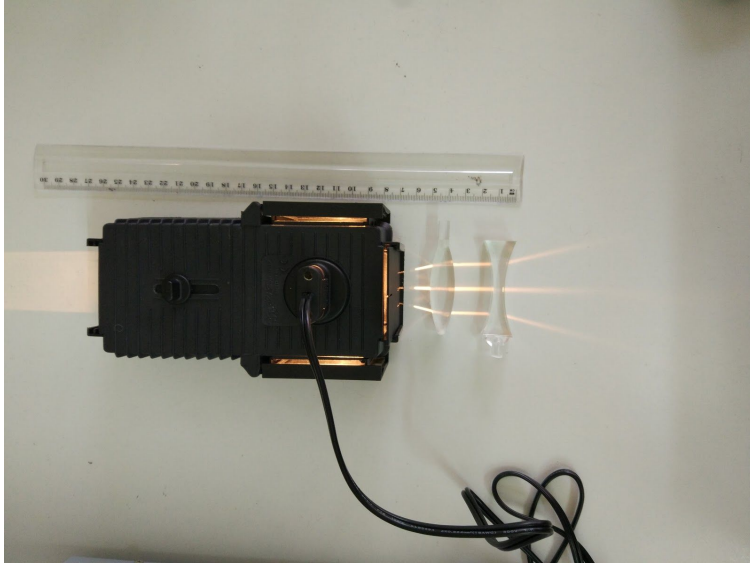


Imagen 6. Estudio de un modelo integrado de lentes.

Al integrar las dos lentes estudiadas en los anteriores modelos y separadas por una distancia de 5'5 cm. vemos que la imagen se ha desplazado alrededor de 3 cm. Esto se ha resuelto con la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \rightarrow \frac{1}{-5'5} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{-2} \rightarrow s = 3'14 \text{ cm.}$$

Además hemos calculado el aumento de la imagen proporcionado por la lente divergente siendo: 1'33 el aumento.

$$m'_2 = \frac{-s'_2}{s_2} \rightarrow m' = \frac{3'14}{2} = 1'57.$$

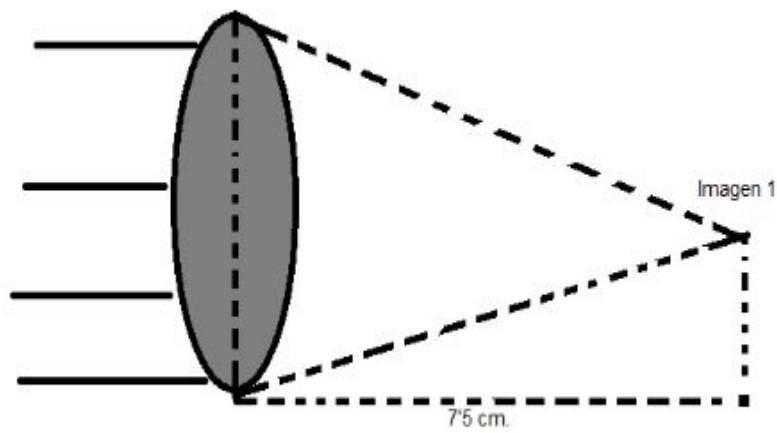


Imagen 7. Modelo teórico de una lente convergente.

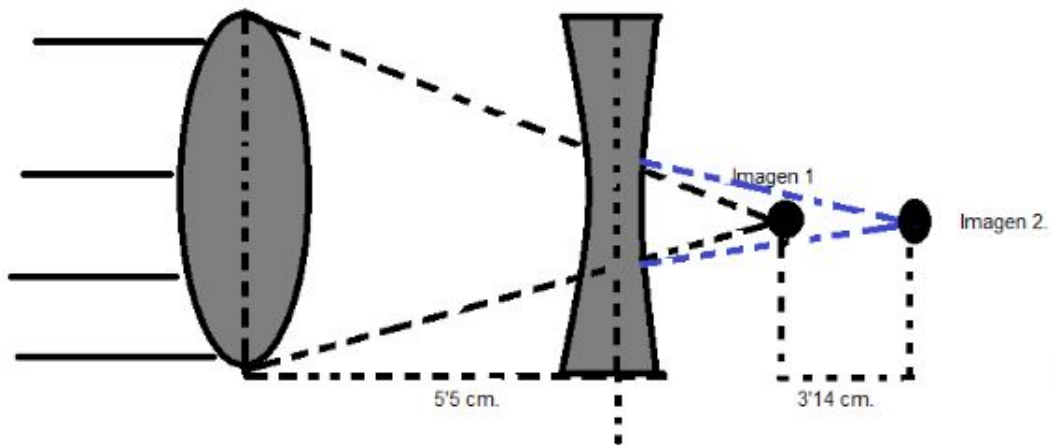


Imagen 8. Modelo teórico de lentes integradas.

Discusión

Adaptaciones de las aves.

Tras la comprobación de la ecuación de las lentes delgadas y realizar un modelo sencillo que explique el mecanismo de la visión sabemos la calidad visual de los vertebrados, en especial los mamíferos y las aves es muy similar, de hecho, la potencia en dioptrías de nuestros ojos es similar, por lo que la calidad de la imagen debería ser similar. Sin embargo, sabemos que las aves, en especial las rapaces diurnas poseen una Agudeza Visual (AV) el doble de potente que los humanos. Esto es debido a tres adaptaciones fisiológicas presentes en las aves:

1. La presencia de una pupila más grande que los humanos (ϕ). Esto permite mayor entrada de luz y menos difracción
2. Una mayor concentración de fotorreceptores. Se estima que la distancia angular entre fotorreceptores en humanos es de 0.007 grados mientras que en las rapaces diurnas la distancia es de 0.0035 grados, prácticamente la mitad. Esto permite que la capacidad de resolución sea mucho más elevada que la nuestra.
3. El tamaño y forma del ojo. El ojo de las aves presenta una conformación tubular, amplificando la imagen. Además la relación entre el globo ocular y el tamaño del cráneo es la más elevada en las aves.

Presencia de 2 fóveas.

Como ya se observó en el modelo de lentes integradas, la presencia de una lente divergente produce una amplificación de la imagen, y a su vez, la desplaza en el espacio. La fóvea es la región de la retina (una depresión en su cara interna) donde convergen los haces de luz y formarán la imagen. Esta región presenta una alta densidad de células fotorreceptoras, específicamente conos (ausencia de bastones), esta región está determinada para obtener una AV máxima. Los humanos poseemos cerca de 150.000 conos por milímetro cuadrado mientras que las rapaces diurnas presentan alrededor de 1 millón de conos por milímetro cuadrado. (González-Martín-Moro, J., *et al.* 2017)

En las aves, algunos reptiles y peces, sobretodo aquellos con carácter depredador, necesitan una buena AV y una buena capacidad de enfoque en el medio abierto donde viven. Así pues, la presencia de 2 fóveas en cada ojo no es única de las aves, sino que se trata de una adaptación evolutiva compartida. La segunda fóvea (con paredes verticales) está rellena de una pequeña cantidad de humor vítreo con índice de refracción superior al vítreo, funcionando como la lente divergente de nuestro modelo.

Todavía no está del todo claro la función de la fóvea nasal (profunda) aunque todo parece indicar que la presencia de las 2 fóveas está relacionada con la visión monocular o binocular. Las aves tienen un ojo grande en relación con su cabeza, además que su motilidad ocular extrínseca es muy limitada, para poder enfocar un objeto se ven obligadas a mover la cabeza, así los halcones peregrinos y demás rapaces cuando están en vuelo en busca de presas no pueden mover continuamente la cabeza, ya que eso les supondría una pérdida importante de aerodinámica. Se ha estudiado y descrito que las rapaces diurnas cuando observan un objeto cercano miran de frente, utilizando los dos ojos, sin embargo cuando enfocan un objeto alejado deben girar la cabeza. Este hecho está relacionado con la visión bifoveal: la fóvea temporal (superficial) es utilizada para mirar objetos cercanos y la fóvea nasal (profunda), de mayor resolución, para mirar objetos alejados. Las fóveas presentan diferencias entre sí, en la fóvea nasal existe una mayor concentración de conos en comparación con la fóvea temporal por lo que las imágenes de objetos lejanos tienen una mayor resolución.

La presencia de la visión bifoveal se relaciona con el vuelo (Tucker V. A., et al. 2000) de las rapaces diurnas, el halcón peregrino, por ejemplo, cuando busca una presa en la distancia utiliza la fóvea nasal, teniendo una visión monocular. En el momento que localiza a la presa inicia el descenso describiendo una curva sobre el ojo que tiene enfocado a la presa hasta los metros finales, donde adopta una línea recta y su visión pasa a ser bifoveal y por lo tanto binocular. Durante el descenso el halcón peregrino llega a alcanzar los 300 km/h por lo que si girara la cabeza para tener una visión binocular perdería aerodinamismo. Además, la visión bifoveal pese a tener

menor resolución que la nasal, tiene una mejor percepción espacial, idónea para la construcción de los nidos o para los metros finales donde caza a la presa.

Visión cromática y adaptaciones fisiológicas a la visión.

En 1972 se realizó un estudio sobre los colibríes y se demostró que son capaces de percibir radiación ultravioleta. En la actualidad se sabe que la mayor parte de las aves son capaces de ver en el ultravioleta, exceptuando algunas especies nocturnas. En otros estudios se ha descubierto que las aves son tetracrómatas, a diferencia de los humanos, que somos tricrómatas; también se conoce la presencia de pequeñas gotas de pigmentos (oil droplets) que son capaces de absorber diferentes longitudes de onda, esto les proporciona a las aves una capacidad de percibir más tonos cromáticos que los humanos.

La percepción de la parte ultravioleta del espectro electromagnético está relacionada con la orientación espacial, la identificación de los alimentos o la selección sexual, en este caso concreto, se ha comprobado que especies de aves en las que no se aprecia dimorfismo sexual la elección del compañero está marcada por la reflectancia del plumaje en el rango del ultravioleta.

Al ser tetracrómatas, las aves poseen un tipo de cono no presente en los humanos que es capaz de absorber hasta los 300 nm, dándole capacidad de ver en el ultravioleta. También se han descrito 2 tipos de opsinas fotosensibles a longitudes de onda corta. La opsina tipo SW1 (Short Wave 1) es sensible a longitudes comprendidas por encima de los 400 nm, esta longitud, estrictamente no es el ultravioleta sino el violeta. Es la opsina SW2 (Short Wave 2) la que aporta la capacidad de absorber por debajo de los 400 nm, hasta los 300 nm específicamente. La capacidad de ver en el ultravioleta no está del todo estudiada en las rapaces diurnas, se apunta a que los falconiformes solamente poseen la opsina SW1, pero sí está bien estudiado y demostrado que tanto los passeriformes como los psittaciformes poseen los dos tipos de opsinas. La ausencia de la opsina SW2 en las rapaces diurnas explicaría por qué las aves más pequeñas han evolucionado y poseen en el plumaje colores del ultravioleta, generando un mecanismo de protección contra las

rapaces ya que no pueden percibir en ese rango de colores. Estas señales visuales serían visibles para los miembros de la misma especie, pero invisibles para el depredador, generando así un “canal privado” de comunicación visual.

Acomodación corneal e integración neural.

Los rayos de luz atraviesan primeramente la córnea, pasando luego por la pupila (orificio central del iris), luego atraviesa el cristalino (nuestro modelo de lente convergente) que se trata la lente ajustable en su radio de curvatura. Tras atravesar el cristalino los rayos convergen en la retina, donde se encuentra la fovea y los diferentes fotorreceptores.

En nuestro modelo los rayos de luz atraviesan paralelamente la lente del sistema óptico, igual que ocurre en la naturaleza y la imagen se forma sobre la retina. Dependiendo de la especie animal, el enfoque de la imagen se realiza cambiando la curvatura del cristalino o desplazando el cristalino. Tanto las aves como los mamíferos realizamos la acomodación, que es el mecanismo que cambia la curvatura del cristalino. En las rapaces diurnas, esto produce que la imagen se enfoque en la fovea temporal o la nasal. Cuando la mirada está centrada en un objeto cercano, los músculos ciliares del ojo se contraen, relajando así el ligamento suspensorio del cristalino, cambiando su radio de curvatura y adoptando una forma más convexa, aumentando su poder de convergencia.

Ruta en el interior de la retina

La información obtenida por los receptores se envía a células bipolares. Éstas son un tipo de neuronas cuyas terminaciones dendríticas conectan con los conos y los bastones, mientras que el axón está en contacto con las células ganglionares que en su conjunto forman el nervio óptico.

Conexiones entre los ojos y el encéfalo

Los axones de las células ganglionares de la retina se reúnen formando el nervio óptico. Los nervios ópticos acaban convergiendo en la base del cerebro donde al unirse forman una estructura llamada quiasma óptico, a partir de esta estructura los nervios ópticos pasan a denominarse cintillas ópticas. Las cintillas ópticas se dirigen hacia los núcleos geniculados laterales que convergen en el tálamo, donde se integra toda la información y pasará a la corteza visual, donde se procesa toda la información visual.

Conclusiones:

1. Como se ha podido comprobar, se puede realizar un modelo sencillo de óptica lineal (física geométrica) para explicar el funcionamiento del sistema visual presente en la naturaleza. El margen de error obtenido ha sido a coste de reducir la complejidad del modelo creado y viendo que aún así explica bien el fenómeno natural de la visión, podemos asumir que es un error aceptable.
2. El principal objetivo de los modelos desarrollados en este trabajo no es la precisión sino la posible comparación que se puede realizar entre diferentes especies animales. En este trabajo se ha comparado un sistema que representa la visión en humanos con otro que representa la visión de las aves.
3. El desarrollo de un modelo preciso necesita de una toma de datos muy precisa, también existen muchas variables físicas, químicas y biológicas a tener en cuenta, por lo que un modelo completo que explique perfectamente todo el proceso de la visión animal es muy complicado de crear.
4. En las rapaces diurnas y otros grupos de animales existe la presencia de 2 foveas está relacionada con el tipo de visión: monocular o binocular. Estas dos foveas

caracterizan además el tipo de vuelo y el movimiento de la cabeza para enfocar objetos.

5.

Conclusions:

1. As it has been proved, a simple model of optical physics can be realized to explain the functioning of the visual system present in nature. The margin of error obtained has been at the cost of reducing the complexity of the model created and seeing that it still explains well the natural phenomenon of vision, we can assume that it is an acceptable error.

The main objective of the models developed in this work is not the precision but the possible comparison that can be made between different animal species. In this work we have compared a system that represents human vision with another that represents the vision of birds.

2. The development of a precise model requires a very accurate data collection, there are also many physical, chemical and biological variables to be taken into account, so a complete model that perfectly explains the whole process of animal vision is very complicated to create .

3. In diurnal raptors and other groups of animals, the presence of 2 foveas is related to the type of vision: monocular or binocular. These two foveas also characterize the type of flight and the movement of the head to focus on objects.

Bibliografía

Artículos

Hart, N. S. 2002. Vision in the peafowl (Aves: *Pavo cristatus*). The Journal of Experimental Biology **205**: 3925–3935

González-Martín-Moro, J., Hernández-Verdejo, J.L. y Clement-Corral A. 2017 El sistema visual de las rapaces diurnas: revisión actualizada. Archivos de la Sociedad Española de Oftalmología **92**: número **5**: 225-232

Tucker V. A., Tucker A. E., Akers K., Enderson J. H. 2000. Curved flight paths and sideways vision in Peregrine Falcons (*Falco peregrinus*). The Journal of Experimental Biology **203**: 3755–3763.

Tucker V. A. 2000. The deep fovea, sideways vision and spiral flight paths in raptors. The Journal of Experimental Biology **203**: 3745–3754

Tyrrell L. P., Fernández-Juricic E. 2016. The Hawk-Eyed Songbird: Retinal Morphology, Eye Shape and Visual Fields of an Aerial Insectivore. The American Naturalist. Vol **189** nº **6**

Pérez Fuentes, Óscar, 2016. Modelización de la visión animal mediante lentes y sistemas ópticos. Repositorio institucional ULL.

Capítulo de libro

Puell Marín, M. C. El sistema óptico ocular, p. 10-48 *En*: Puell Marín, M. C., Óptica Fisiológica: El sistema óptico del ojo y la visión binocular. Universidad Complutense de Madrid. ISBN Versión Digital: 1-4135-6363-5.

Hickman C. P, Roberts L. S, Keen S. L., Larson A., l'Anson H., et al. 2009. Coordinación nerviosa: sistema nervioso y órganos de los sentidos p. 726-753 *En*: Hickman C. P, Roberts L. S, Keen S. L., Larson A., l'Anson H., et al., Principios integrales de zoología. S.A. McGraw-Hill / Interamericana de España.

Kane J. W., Sternheim M. M., 1982. Propiedades ondulatorias de la luz p. 458-495

En: Kane J. W., Sternheim M. M., Física. Reverté, S.A.

Kane J. W., Sternheim M. M., 1982. Espejos, lentes e instrumentos ópticos p.

495-521 *En:* Kane J. W., Sternheim M. M., Física. Reverté, S.A.

Links.

https://en.wikipedia.org/wiki/Optics#Geometrical_optics

https://en.wikipedia.org/wiki/Fovea_centralis

<https://en.wikipedia.org/wiki/Eye>

https://en.wikipedia.org/wiki/Photoreceptor_cell

https://en.wikipedia.org/wiki/Optic_chiasm

https://en.wikipedia.org/wiki/Lens_%28optics%29

https://en.wikipedia.org/wiki/Bird_vision