

# Aberraciones ópticas II: Astigmatismo

Antonio Marzoa Domínguez



Un melón, igual que un cilindro, presenta dos ejes de curvatura distintos.  
Esta asimetría es una de las causantes de la aberración geométrica que conocemos como astigmatismo.  
(Excepto donde se indique, todas las imágenes son cortesía del autor)

## CONTINUAMOS LA SERIE SOBRE ABERRACIONES ÓPTICAS HABLANDO DEL ASTIGMATISMO, ABERRACIÓN QUE MÁS DE UN LECTOR TENDRÁ PRESENTE EN SU DÍA A DÍA.

Seguramente más de un lector sonría al leer el título de este artículo por tratarse de una persona aquejada de astigmatismo. Cuando a limitaciones visuales se refiere, uno tiene bastante idea de qué es la miopía, la hipermetropía o la presbicia y de las formas y metodologías que existen para corregirla, sobre todo si las padece. No obstante, cuando el oculista nos diagnostica astigmatismo y nos explica en qué consiste a menudo nos puede resultar una idea extraña o menos intuitiva que los otros errores refractivos. De hecho, se trata de una imperfección visual que no es fácil de detectar y que no fue reconocida y descrita de forma independiente a la miopía o a la hipermetropía hasta el siglo XIX, de la mano del científico británico Thomas Young (1773–1829), aunque el término astigmatismo fue acuñado, aparentemente bajo sugerencia de William Whewell (1794–1866) en 1825 por el matemático y astrónomo inglés George Biddell Airy (1801–1892), quién también observó el fenómeno de forma independiente.

A lo largo del presente artículo, similarmente a como hizo Young con la piedra Rosetta, intentaremos despejar las dudas y descifrar los «misterios» respecto a esta aberración geométrica, tan presente en la vida de muchas personas.

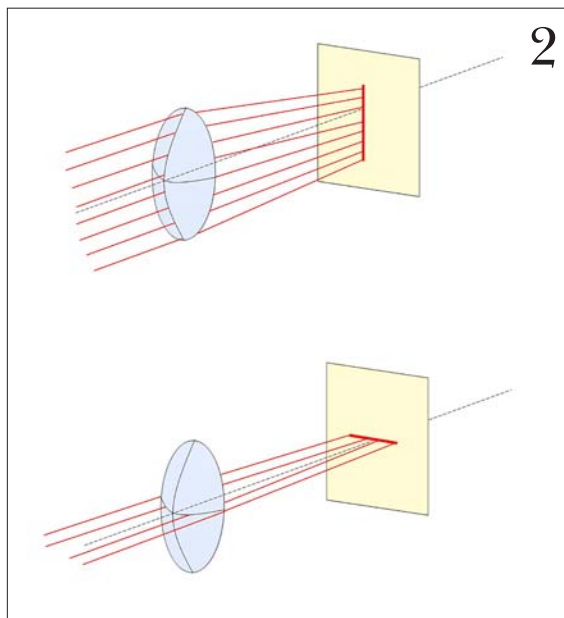
Empecemos por comprender el significado literal de este término.

La palabra astigmatismo se compone del sufijo griego *a* (sin, ausencia) y de la palabra *estigmatismo* (proveniente del griego *stigma*, que significa lugar, punto), que vendría a significar algo así como «formación de un punto en un punto» (esencialmente se denomina estigma-

tismo a la propiedad de los sistemas ópticos de hacer concurrir los puntos de un plano de forma equivalente en otro plano). Así pues, literalmente, el astigmatismo es la falta de esta capacidad de hacer que la imagen de un punto también sea un punto. De este modo, el astigmatismo se dará cuando exista una asimetría en la incidencia de los rayos de luz sobre un sistema óptico, ya sea debida a la geometría misma del propio sistema o a su posición y orientación relativas con el objeto.

Para entender esto, tomemos un sistema óptico sencillo, por ejemplo, una lente. Si recordamos la lente del artículo anterior de esta serie en la revista del mes pasado, debemos tener presente que esta era perfectamente simétrica y de superficie esférica. Sin embargo, esto no tiene porque suceder en la realidad. Cuando se pulen superficies ópticas esféricas, del mismo modo que podían surgir errores que desembocan en aberración esférica (como vimos con el paradigmático ejemplo del Telescopio Espacial Hubble) también puede darse que la superficie presente dos ejes, como en el caso de un melón, una pelota de rugby o un cilindro. Dicho de otro modo, el sistema carece de simetría de revolución. Utilizando un símil frutero: una sandía presenta simetría de revolución esférica, mientras que un melón tendrá dos ejes distintos.

Tener ejes distintos significa curvaturas distintas y, por lo tanto, distinta potencia según el eje. Típicamente distinguimos entre un plano vertical (conocido como plano tangencial) y un plano horizontal (también llamado plano sagital). De este modo, los rayos que incidan en el plano tangencial se verán afectados por una potencia en concreto, mientras que a los que incidan sobre el plano horizontal, les corresponderá un foco distinto. Dicho de un modo distinto: un sistema óptico con astigmatismo enfocará los rayos de luz en dos puntos distintos ortogonales entre sí.



2

**FIGURA 2.** Esquematización del astigmatismo en una lente convergente: plano tangencial (arriba) y plano sagital (abajo).

**FIGURA 3.** Aquellos que padezcan de astigmatismo habrán notado cuando conducen que las luces de los faros de los coches se alargan en una determinada dirección, llegando incluso a poder observar un tapiz de rayas luminosas paralelas en su campo de visión.

Como consecuencia, las imágenes formadas por sistemas afectados de astigmatismo presentan distorsiones en direcciones marcadas. Dependiendo de la potencia de cada eje (es decir, de su curvatura) el primer foco corresponderá a un plano o a otro.

¿Y qué sucede con el resto de los rayos? Pues estos se verán afectados en distinta medida por ambos ejes y, en torno al eje óptico, se formará una estructura luminosa tridimensional conocida como conoide de Sturm, en honor al matemático suizo Jacques Charles François Sturm (1803–1855), quién desarrollo alrededor de 1845 la teoría matemática que describe el astigmatismo.

Este es un fenómeno que aquellos que padezcan de astigmatismo (como un servidor) habrán observado cuando, por ejemplo, conducen, que las luces de los faros de los coches se alargan en una determinada dirección, llegando incluso a poder observar un tapiz de rayas luminosas paralelas en su campo de visión (Figura 3). Para el resto de los mortales, sirva el ejemplo de las imágenes mostradas en la Figura 4, correspondientes a simulaciones de astigmatismo con una magnitud de 0,5 longitudes de onda (recordemos, del artículo anterior, que esta es una unidad de medida estándar cuando se analizan las aberraciones y errores de onda), similares a las que puede observar una persona afectada de este error refractivo cuando no utiliza sus gafas correctivas.

Por encima de 0,5 longitudes de onda, la asimetría biaxial de un sistema con astigmatismo se hace más evidente.

Para corregir el astigmatismo, en primera instancia, lo que se hace es utilizar lentes cilíndricas, que tengan la potencia correctiva correspondiente. Sin embargo, en las prescripciones oftalmológicas podemos observar que, para cada ojo, aparecen una prescripción de esfera y otra de cilindro. En este caso las superficies ópticas de las gafas pueden ser más complejas (no solamente esféricas o cilíndricas, sino una combinación de ambas) y sirven para corregir la miopía o hipermetropía (con potencias esféricas negativas o positivas, respectivamente) y el astigmatismo (con potencias cilíndricas, positivas o negativas según sea el caso) de forma conjunta. De hecho, en el diseño de lentes oftálmicas, los ingenieros ópticos utilizan métodos numéricos derivados de la geometría diferencial que permiten generar superficies complejas por ordenador que combinen correcciones de astigmatismo y de foco. Estos métodos son los mismos que se utilizan para generar y diseñar las populares lentes progresivas. En el campo de la astronomía profesional, donde habitualmente el astigmatismo surge como una componente aberrante (de entre las muchas existentes) de la turbulencia atmosférica, existen otros tipos de sistemas de corrección, la mayoría de ellos pertenecientes a las técnicas de óptica adaptativa.

Llegados a este punto es importante hacer un ligero apunte: como se ha comentado inicialmente, el astigmatismo también puede darse en lentes (sistemas) que presenten simetría de revolución, pero que estén trabajando con fuentes luminosas situadas fuera de eje a una distancia finita respecto al sistema. En este caso, el cono de luz incidirá de forma asimétrica sobre la lente, causando así un efecto equivalente al de tener dos ejes y, como consecuencia, obtendremos una



imagen que también se verá afectada por astigmatismo. En estos casos, si estamos utilizando un telescopio, a veces resulta suficiente reducir la cantidad de luz que entra en nuestro instrumento para eliminar el astigmatismo.

Asimismo, cuando trabajemos con óptica instrumental, será relevante tener presente que las aberraciones no solo son causadas por las imperfecciones del sistema en sí, sino que habitualmente son un resultado combinado de la posición relativa de la fuente respecto al sistema y este mismo.

Con respecto al astigmatismo visual humano, del mismo modo que con la hipermetropía y la miopía, actualmente se sigue estudiando su etiología (es decir, las causas de su aparición). Existen hipótesis tanto genéticas como morfológicas, aunque una de las más plausibles, correspondiente a estas últimas, sería debida al esfuerzo mecánico vertical que hace el parpado sobre nuestra cornea, eventualmente modificando su curvatura y, por lo tanto, potencia en una dirección concreta, lo que con el tiempo derivaría en un claro caso de astigmatismo.

Volviendo por un momento al inicio del presente artículo, el descubrimiento de Young es uno de los más curiosos en la historia de la ciencia: el propio científico sufría de este error refractivo. Con una rendija, Young miró la luz de una vela y, orientando el orificio en distintas direcciones, pudo apreciar los cambios de potencia de su propio ojo, descubriendo así el fenómeno del astigmatismo. Por otra parte, también fue capaz de observar el proceso de focalización de su ojo aquejado de astigmatismo, observando cómo la imagen primero se distorsionaba vertical-

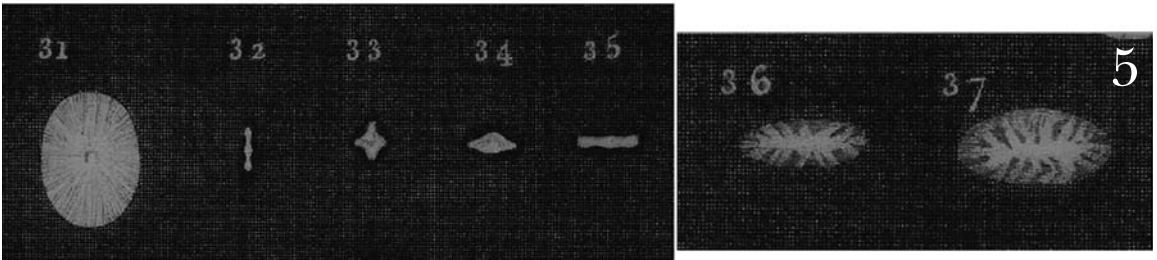
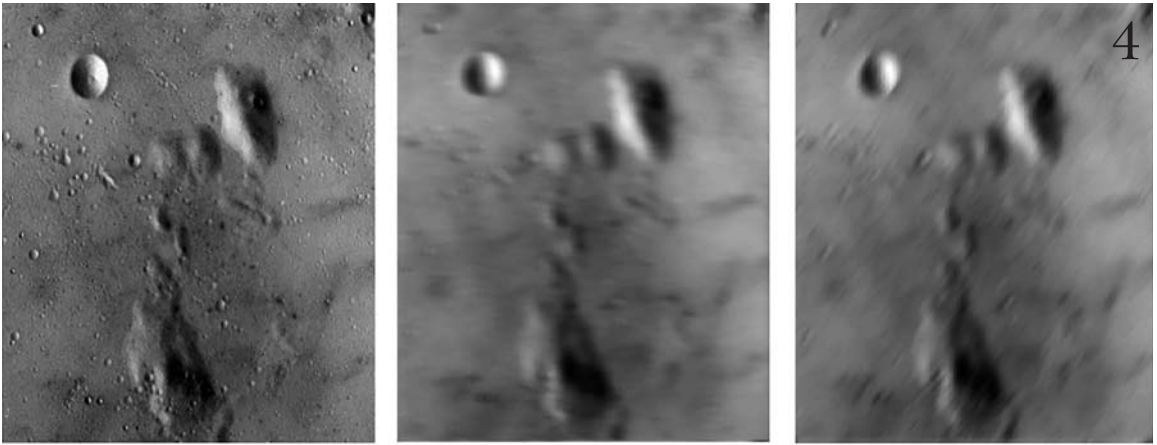
mente para formar una especie de cruz en el foco (en lugar del punto que pudimos ver en la Figura 3 del artículo anterior), lo que se conoce como círculo de mínima confusión, y finalmente pasar a formar una mancha horizontal.

Una vez ya tenemos clara la idea fundamental de esta aberración óptica, centrémonos ahora en cómo nos puede afectar durante una observación astronómica.

En primer lugar, es necesario tener en cuenta que el astigmatismo que nos puede afectar durante la observación puede ser debido tanto a nuestros ojos (en caso de padecerlo) como a un defecto de nuestro instrumento, ya se trate de un telescopio o de unos prismáticos. Es importante tener en cuenta que el astigmatismo puede ser tanto resultado de un problema en un elemento concreto (por ejemplo, del ocular o del objetivo) como de la combinación de todos los elementos ópticos que intervienen en la observación de la bóveda celeste.

Si tenemos la sospecha de que podemos ser nosotros los causantes de esta aberración lo mejor es que acudamos cuanto antes a nuestro oftalmólogo para un diagnóstico adecuado y su corrección. No obstante, un ejercicio interesante y divertido puede ser cerrar un ojo y con el otro contemplar una fuente luminosa lejana (como un faro o una estrella). Si vemos que el punto se deforma en una dirección muy marcada es posible que suframos de astigmatismo en ese ojo. Rotando la cabeza deberíamos ver como la línea de luz también rota solidariamente. Después podemos repetir la prueba con el otro ojo.

También es importante recordar que, para una correcta observación, especialmente cuando se



**FIGURA 4.** Simulación del efecto de astigmatismo sobre la imagen test estándar «Moon». De izquierda a derecha: imagen original, imagen afectada por un astigmatismo vertical de 0,5 longitudes de onda, e imagen afectada por un astigmatismo oblicuo a 45° de la misma magnitud.

**FIGURA 5.** Proceso de focalización en el eje óptico (cada imagen corresponde a un punto cercano al foco, el punto central es el foco) según fue observado y registrado por Thomas Young.

**FIGURA 6.** Astigmatismo sagital en la esquina de un campo astrofotográfico de un objetivo de 23 mm a f/1,4. [Cortesía y ©lan Norman y Diana Southern, *lonelyspeck.com*]

comparte el instrumento con alguien que no tenga demasiada experiencia, cada observador debe utilizar su corrección siempre que sea posible, para no tocar el foco o la orientación del ocular. Respecto al astigmatismo ocular, actualmente no hay sistemas auxiliares que lo compensen, más allá de la corrección que lleva el propio observador en caso de padecerlo. No obstante, en el año 2017 unos investigadores gallegos patentaron una tecnología que podría acabar derivando en oculares con corrección astigmática disponibles comercialmente. De momento, a aquellos que padecemos de astigmatismo, nos tocará seguir usando las gafas, o resignarnos a ver borroso.

Una vez nos hemos descartado a nosotros mismos como sospechosos, es el momento de analizar nuestro instrumento. Supongamos que estamos realizando una observación con un telescopio que parece «padecer» astigmatismo. En este caso podremos observar que la imagen presentará una determinada elongación o deformación en una dirección dentro de foco y que, si vamos fuera de foco, observaremos un cambio de deformación en una dirección en torno a unos 90° respecto a la primera. Bajo estas condiciones, podemos decir que nuestro sistema padece astigmatismo.

Alternativamente, podemos hacer un experimento más «técnico» con nuestro instrumento, si se trata de un telescopio reflector. Colocando una obturación circular (como puede ser un círculo de cartón, por ejemplo) de pequeño diámetro centrada sobre nuestro ocular, si observamos su proyección sobre el espejo primario, deberíamos observar un círculo «perfecto». Si, de lo contrario, lo que vemos es una elipse, se deberá a que el sistema presenta astigmatismo y podre-

mos ver cómo, girando el espejo, el eje de la elipse cambia de dirección.

En todo este análisis, no debemos olvidar que, en condiciones reales, se padecen efectos aberrantes combinados, debidos a las distintas aberraciones geométricas existentes, y la distinción de cada una de ellas se puede hacer más complicada. Como en tantas cosas de la vida, la experiencia (y la paciencia) junto con una formación básica, nos ayudarán a identificar (y, si es posible, solucionar) con mayor facilidad y rapidez los distintos tipos de aberraciones que nos podemos encontrar y que, modestamente, pretendemos entender en esta serie de artículos.

En el próximo artículo analizaremos en detalle la aberración geométrica de la coma, la cual recibe su nombre de una evidente analogía astronómica y no debe ser confundida en ningún caso con el astigmatismo que hemos tratado en el presente artículo. Ambas aberraciones, aunque en distinta medida, pueden encontrarse presentes en espejos parabólicos, de uso habitual en astronomía. (A)

#### Bibliografía:

- E. Hecht, *Óptica*, Editorial Addison Wesley Iberoamericana, Madrid, 2000. ISBN 978-84-7829-025— S. Barbero, *Cómo funcionan nuestras gafas, ¿Qué sabemos de?* 56, Editorial Catarata, Madrid, 2014. ISBN 978-84-8319-954-1.
- D. A. Atchison, W. Neil Charman, «Thomas Young's contribution to visual optics: The Bakerian lecture 'On the mechanism of the eye'», *Journal of Vision*, 10 (12):16 (2010).
- A. Marzoa, «Aberraciones ópticas I: la aberración esférica», *Astronomía* 255, sept. 2020, págs. 24-31.
- [www.farodevigo.es/sociedad/2016/06/27/opticos-gallegos-crean-corrector-astigmatismo/1487926.html](http://www.farodevigo.es/sociedad/2016/06/27/opticos-gallegos-crean-corrector-astigmatismo/1487926.html)

**Antonio Marzoa Domínguez,**  
Ingeniero en SENER Aeroespacial,  
profesor asociado del Departamento  
de Física de la Universitat  
Politécnica de Catalunya y miembro  
de COSMOS Mataró.

