



El queratómetro

¿Por qué hay tanta variedad?

Montserrat Arjona
Núria Tomás
Josep Arasa

Centro de Desarrollo de Sensores, Instrumentación y Sistemas (CD6)
Universitat Politècnica de Catalunya

En la actualidad todo profesional de la optometría y de la contactología considera al queratómetro como un instrumento básico. Pero cuando el uso de lentes de contacto era una rareza, el queratómetro se usaba casi exclusivamente para determinar el astigmatismo corneal. Hoy en día su uso principal es la determinación del valor del radio de curvatura de la cara anterior de la córnea, valor clave para aplicaciones contactológicas.

El mercado actual ofrece diversos tipos de queratómetros, conceptualmente distintos, tanto en sofisticación como en manejo variando su coste notablemente pero todos ellos, si se emplean adecuadamente, proporcionan una medida correcta del radio corneal.

Ante tal variedad de ofertas surgen inmediatamente preguntas tales como: ¿por qué existe tanta variedad de queratómetros? ¿por qué hay tanta diferencia entre unos diseños y otros? ¿por qué el precio es tan diferente? Todas ellas tienen una respuesta común: intentar minimizar los errores de lectura que se pueden derivar de un mal uso del instrumento.

Para explicar con detalle todas las implicaciones que lleva asociada esta respuesta empezaremos analizando las fuentes de error más frecuentes en el uso del queratómetro, recordaremos brevemente el diseño básico del mismo, el principio óptico de medida y mostraremos las distintas soluciones adoptadas para minimizar los errores. Todo esto nos llevará, de manera natural, a ver los distintos diseños de queratómetro. Concluiremos con un breve resumen de los puntos que, a nuestro entender, son más relevantes para asegurar unas medidas fiables.

¿Cuáles son las principales fuentes de error en el uso del queratómetro?

En el uso del queratómetro aparecen, básicamente, cinco fuentes de error, a saber:

Correspondencia

Montserrat Arjona
Centro de Desarrollo de Sensores,
Instrumentación y Sistemas (CD6)
Universitat Politècnica de Catalunya
Rambla St Nebridi 11
08222 Terrassa



- 1) Fijación incorrecta del paciente
- 2) Fallo en el centrado del instrumento
- 3) Fallo en el ajuste del ocular
- 4) Acomodación del observador
- 5) Distancia córnea-instrumento incorrecta.

El primer punto hace mención a la importancia que tiene en la medida del radio de curvatura el hecho de que el paciente mantenga la mirada fijada en el eje óptico del instrumento durante todo el proceso de medida. En caso contrario el radio corneal hallado no corresponde a la zona central de la córnea y por consiguiente el valor hallado correspondería a una córnea más plana de lo que sería en realidad.

Por lo que respecta al segundo punto, si se produce un fallo al centrar el instrumento, se genera un error del mismo tipo que al descrito en el punto anterior. En este caso es debido a que el instrumento no está bien situado respecto a la zona central de la córnea del paciente y por tanto la medida tampoco es correcta.

En los tres últimos puntos entra en juego el propio diseño y construcción del instrumento. En estos tres casos, el error se produce, tal como justificaremos más adelante, al realizar la medida en un plano incorrecto, ya sea por un mal ajuste del ocular, o bien porque el observador acomoda o porque el instrumento está a una distancia incorrecta de la córnea.

¿Cómo eliminar las fuentes de error?

Al analizar la causa de cada una de ellas, uno se percatará que existe una clara diferencia entre las dos primeras y las tres últimas: las dos primeras dependen únicamente de la posición

del ojo del paciente respecto al instrumento, por tanto no interviene, desde el punto de vista constructivo, el propio instrumento, mientras que las tres restantes sí.

Las dos primeras fuentes de error son fáciles de eliminar, basta con conocer un poco la fisiología del ojo para darse cuenta de que si se centra bien el ojo del paciente con respecto al instrumento se resuelve el problema. Así, una buena práctica del profesional, dando instrucciones precisas al paciente en cuanto a la fijación junto con un correcto centraje del instrumento, contribuye a obtener medidas correctas.

En cambio, las tres fuentes de error restantes, al estar directamente relacionadas con el instrumento desde el punto de vista constructivo, si no se evitan, la lectura efectuada será incorrecta porque no se cumplirán las condiciones que rigen la obtención del radio corneal con un queratómetro. A continuación iremos planteando una serie de preguntas cuyas respuestas nos servirán para comprender bien estas condiciones y poder eliminar estas tres posibles fuentes de error, a la vez que nos llevarán a los distintos diseños de los querátómetros.

¿Por qué el queratómetro tiene un diseño óptico básico tan particular?

El queratómetro básico está constituido por cuatro elementos, de los cuales dos son comunes a todos los instrumentos ópticos subjetivos, el objetivo y ocular, mientras que los otros dos son totalmente particulares, la mira y el sistema de duplicación, estos dos últimos elementos confieren al queratómetro su gran particularidad y le hacen claramente distinto a los otros instrumentos optométricos (fig. 1).

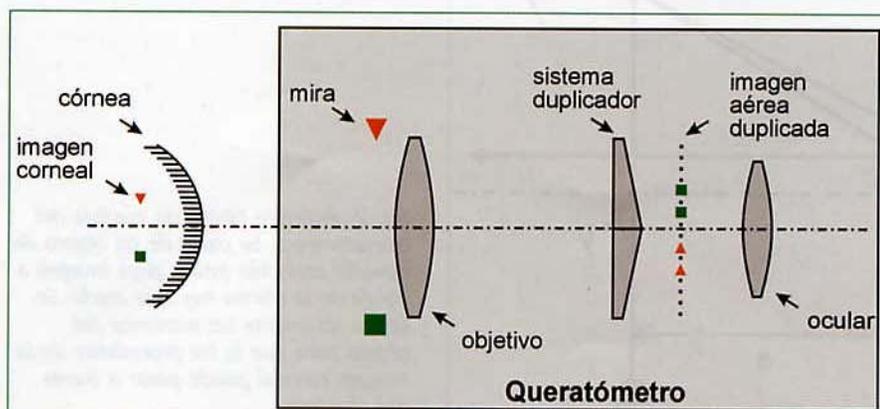


Fig. 1. Esquema básico de un queratómetro, formado por el objetivo, el ocular, un sistema duplicador y la mira. La córnea, situada delante del instrumento, forma una imagen virtual de la mira.



El por qué el queratómetro tiene un diseño óptico tan especial se debe a dos motivos. El primero de ellos es debido al principio de medida que se utiliza para hallar el radio de curvatura de la córnea, basado en la determinación del tamaño de la imagen que forma la primera cara de la córnea de un objeto de dimensión conocida, denominado mira. De ahí que lleve incorporado este elemento.

El segundo motivo se debe a los movimientos oculares involuntarios. Dichos movimientos provocan que la imagen corneal se esté moviendo constantemente haciendo imposible su medida directa. Para solventar este problema, el queratómetro lleva incorporado un sistema de duplicación de la imagen. El cual, como veremos más adelante, nos permitirá obtener el tamaño de la imagen corneal a pesar de su movimiento.

¿Cómo se aplica el principio óptico básico de medida del queratómetro?

Como se ha dicho antes, para proceder a la medida del radio de curvatura de la zona central de la cara anterior de la córnea se realiza la medida de la imagen corneal de la mira (fig. 2). Ya que la imagen debe observarse a través del mismo eje óptico, la mira debe ser transparente en su parte central ya que de lo contrario impediría el paso de luz. Por esta razón sólo se utilizan sus extremos (de ahí que en muchas ocasiones se emplee el plural "miras"), de ahora en adelante denotaremos con la letra y a la separación entre los extremos de la mira.

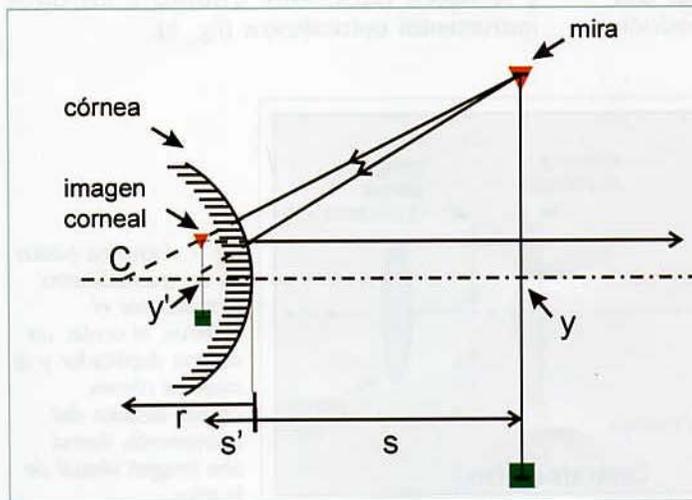


Fig. 2. Principio básico de medida del queratómetro. Se parte de un objeto de tamaño conocido (mira) cuya imagen a través de la córnea hay que medir. Se utiliza solamente los extremos del objeto para que la luz procedente de la imagen corneal pueda pasar a través del objetivo.

Una vez conocido el tamaño de la imagen corneal y' , el radio de curvatura de la córnea se puede obtener a partir de las relaciones de formación de imagen para espejos convexos (fig. 3)

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} &= \frac{2}{r} \\ m_{\text{corneal}} &= \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s} \Rightarrow s' = -s \frac{y'}{y} \end{aligned} \right\} \Rightarrow r = \frac{2y's}{y'-y} \quad (1)$$

Hay que destacar que tanto el tamaño (y) como la posición relativa de la mira respecto a la córnea (s) son datos bien conocidos y en consecuencia bastará con determinar el tamaño de la imagen corneal (y') para obtener el valor del radio de curvatura (r). No obstante, como dicha imagen es virtual no se puede hallar directamente su valor. Por esta razón interviene el primer elemento óptico del queratómetro, el objetivo, que proporciona una segunda imagen real (y'') que denominaremos imagen aérea (fig. 3).

En un principio, con sólo situar un retículo milimetrado en el plano de la imagen aérea ya se podría medir y'' . Por consiguiente, conocido de antemano el valor del aumento lateral con que está trabajando el objetivo, podríamos obtener el valor y' . Luego, a través de las expresiones (1) hallaríamos el valor del radio corneal.

No obstante, esta medida no se puede efectuar debido a que los movimientos involuntarios del ojo provocan un movimiento constante de la imagen aérea.

Para hallar el valor y' , el queratómetro recurre al principio de duplicación de la imagen antes mencionado. Este principio consiste en intercalar

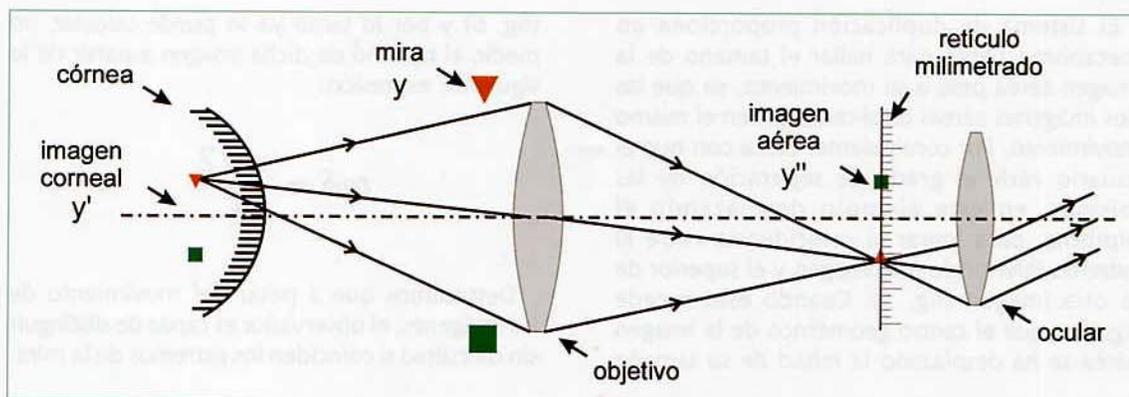


Fig. 3. Formación de la imagen aérea de la mira en el retículo.

un sistema óptico, por ejemplo un biprisma, el cual produce dos imágenes desplazadas del objeto en el mismo plano y del mismo tamaño (figs. 4a y 4b). En este punto destacamos que en la literatura hispana se suele utilizar el término de "doblaje" en vez de duplicación. Estimamos que

este último término es más adecuado ya que en realidad lo que hace el sistema es duplicar una imagen y no doblarla. Suponemos que se ha venido utilizando el término doblaje debido a una incorrecta traducción de la palabra "doubling" que se utiliza en la literatura anglosajona.

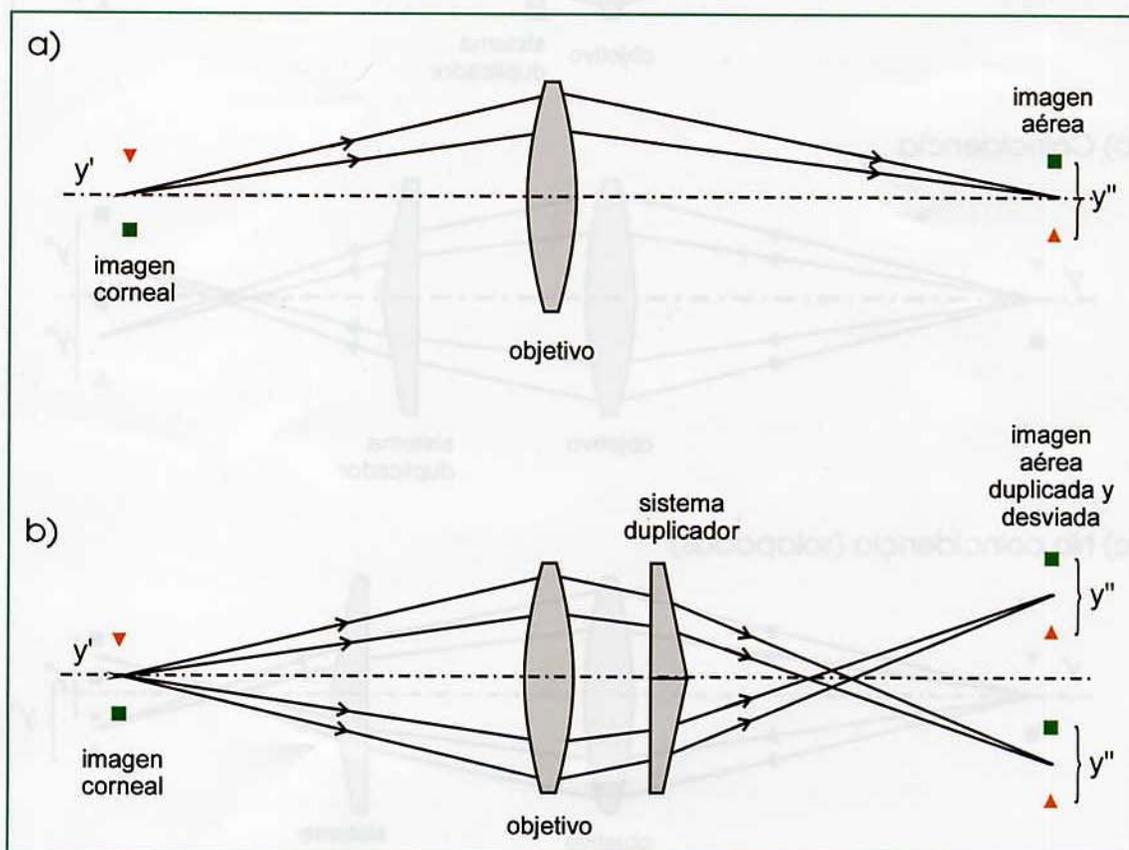


Fig. 4. Representación de la acción del sistema duplicador. Para mayor simplicidad no se ha representado la mira ni la córnea del paciente, solamente la imagen corneal (y'). a) Si sólo actúa el objetivo, éste forma una imagen aérea. b) Si se añade un sistema duplicador, se obtiene una imagen aérea desviada y duplicada sin cambiar ni su tamaño ni su posición respecto al objetivo.



El sistema de duplicación proporciona un mecanismo fiable para hallar el tamaño de la imagen aérea pese a su movimiento, ya que las dos imágenes aéreas duplicadas sufren el mismo movimiento. Por consiguiente, basta con que el usuario varíe el grado de separación de las mismas, en este ejemplo desplazando el biprisma, para lograr la coincidencia entre el extremo inferior de una imagen y el superior de la otra imagen (fig. 5). Cuando esto sucede significa que el centro geométrico de la imagen aérea se ha desplazado la mitad de su tamaño

(fig. 6) y por lo tanto ya se puede calcular, no medir, el tamaño de dicha imagen a partir de la siguiente expresión:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{y''/2}{b}$$

Destacamos que a pesar del movimiento de las imágenes, el observador es capaz de distinguir sin dificultad si coinciden los extremos de la mira.

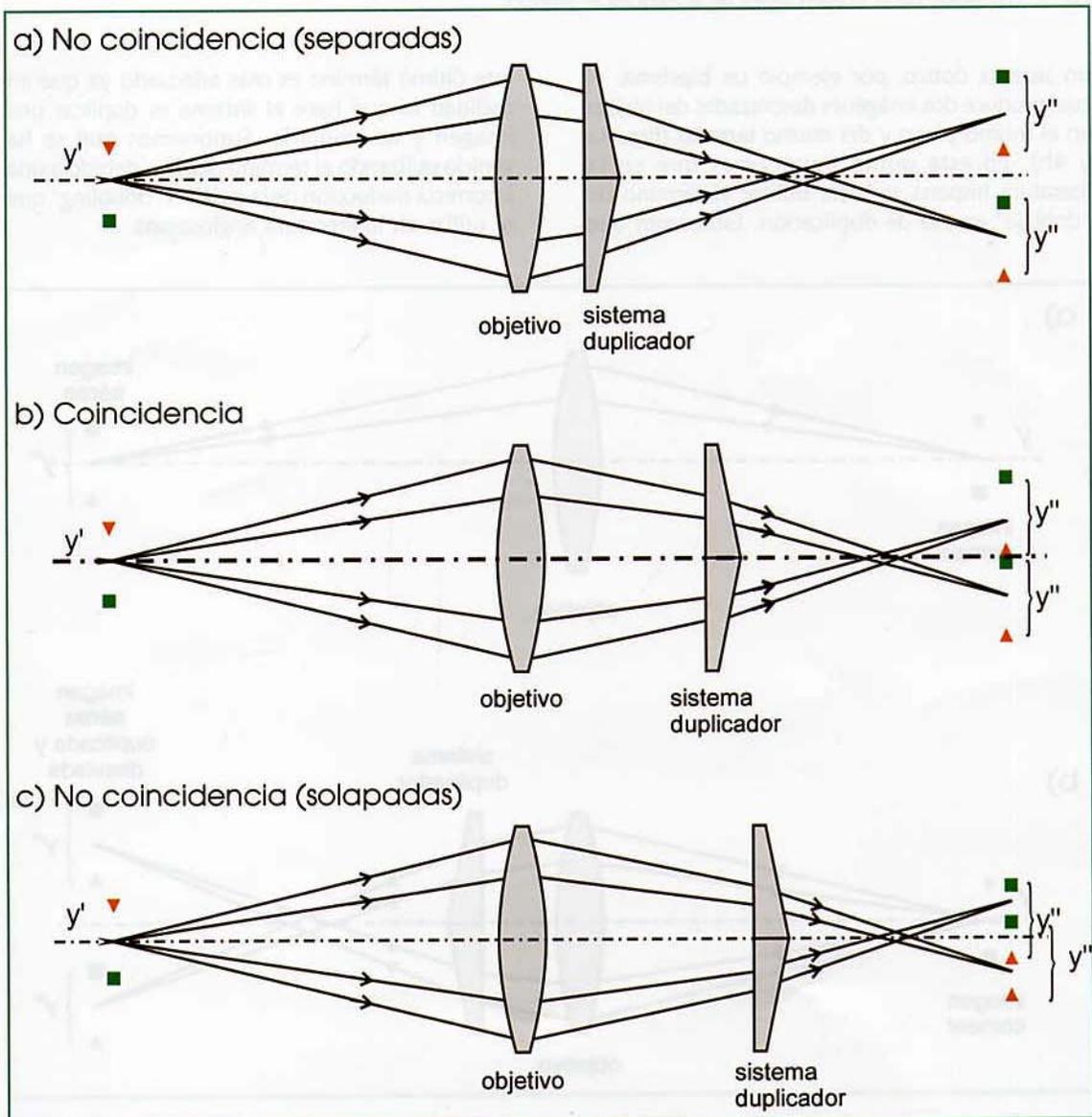


Fig. 5. Desplazamiento de las imágenes aéreas según el grado de desviación producido por el sistema de duplicación. a) Imágenes no coincidentes y muy separadas b) Imágenes coincidentes. El extremo superior de la imagen inferior coincide con el extremo inferior de la imagen superior. c) Imágenes no coincidentes y solapadas.

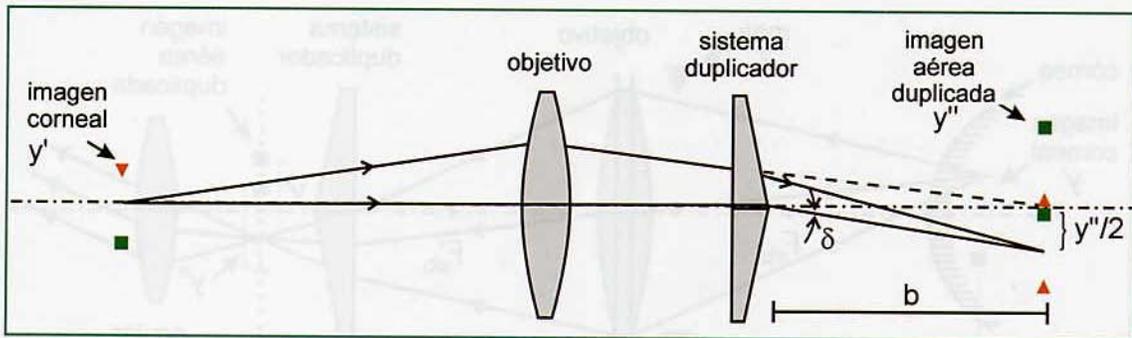
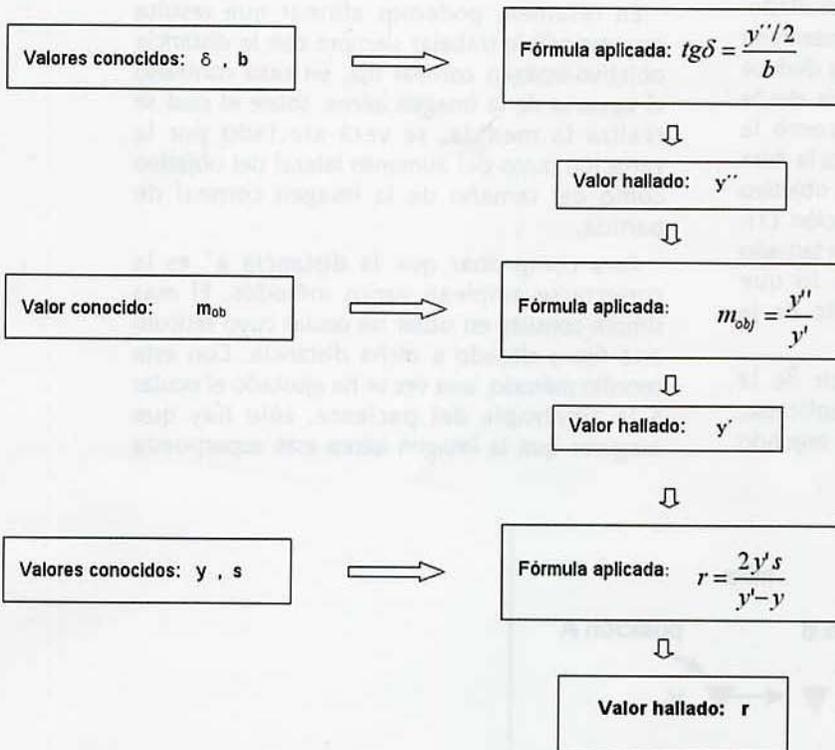


Fig. 6. Cálculo del tamaño de la imagen aérea a partir de la coincidencia. Conocido el ángulo de desviación del sistema duplicador (δ) y la distancia desde dicho sistema hasta la imagen aérea (b) se calcula el tamaño de la imagen aérea (y'')

En el siguiente esquema se detallan los pasos necesarios para calcular el radio de la córnea a partir de las medidas realizadas cuando se ha logrado la coincidencia:

los queratómetros proporcionan directamente la medida del radio corneal. Para que el método de cálculo resumido en el esquema sea aplicable, es imprescindible asegurar la constancia del aumento lateral del objetivo, en caso contrario, el resultado sería erróneo.



¿Cómo se puede garantizar la constancia del aumento lateral del objetivo del queratómetro?

Para garantizar la constancia del aumento lateral del objetivo (m_{obj}) de un queratómetro se procede de forma indirecta. Como la distancia focal del objetivo es fija, para mantener el valor del aumento lateral del objetivo constante hay que conseguir que la distancia entre el foco imagen del objetivo y la imagen aérea (z') también lo sea (ecuación 2) o lo que es equivalente, que lo sea la distancia objetivo - imagen aérea (a'). Así pues, para asegurar la constancia del aumento lateral del objetivo bastará con cerciorarnos de que la

distancia a' sea siempre la misma independientemente del paciente que vayamos a medir (fig. 7)

$$m_{obj} = -\frac{z'}{f'_{obj}} = \frac{f'_{obj}}{z} = \frac{a'}{a} = \frac{y''}{y'} \quad (2)$$

Así pues, una vez que el fabricante fija el valor del aumento lateral del objetivo y el ángulo de desviación del biprisma (o en su defecto el parámetro asociado al sistema de duplicación que lleve incorporado) ya puede establecer la relación entre el valor del parámetro cuando se alcanza la coincidencia, en este ejemplo "b", con el valor del radio corneal. Por esta razón todos

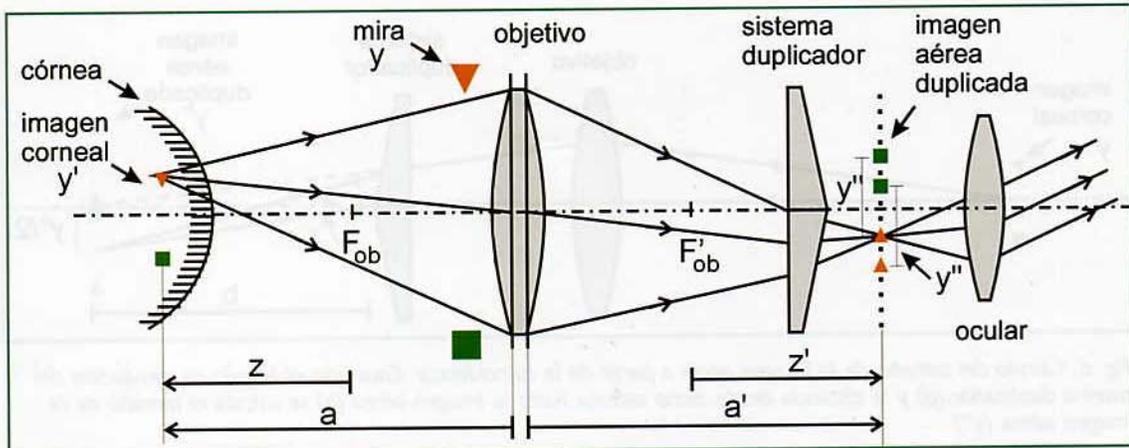


Fig. 7. Esquema completo del queratómetro donde se indican las distancias involucradas en el cálculo del aumento lateral.

Además, existe otro efecto más sutil ligado a dicha constancia, es la variación del tamaño de la imagen corneal y su influencia en el resultado. Si por cualquier causa el m_{ob} no se mantiene constante, a partir de la ecuación (2) se deduce que también habrá variado la distancia desde F_{ob} hasta la imagen corneal (z) así como la distancia desde el ápex de la córnea hasta la mira (s), ya que la distancia entre la mira y el objetivo es fija. En consecuencia según la ecuación (1), para una misma córnea obtendríamos un tamaño de la imagen corneal (y') distinto, lo que provocaría una variación en el tamaño de la imagen aérea (y'') (fig. 8).

Como la medida se realiza a partir de la coincidencia de la imagen aérea duplicada, resulta obvio que el resultado en este segundo

caso no será el mismo ya que partiríamos de un tamaño diferente de imagen corneal.

En resumen, podemos afirmar que resulta imprescindible trabajar siempre con la distancia objetivo-imagen corneal fija, en caso contrario el tamaño de la imagen aérea, sobre el cual se realiza la medida, se verá afectado por la variación tanto del aumento lateral del objetivo como del tamaño de la imagen corneal de partida.

Para comprobar que la distancia a' es la correcta se emplean varios métodos. El más simple consiste en situar un ocular cuyo retículo esté fijo y situado a dicha distancia. Con este sencillo método, una vez se ha ajustado el ocular a la ametropía del paciente, sólo hay que asegurar que la imagen aérea esté superpuesta

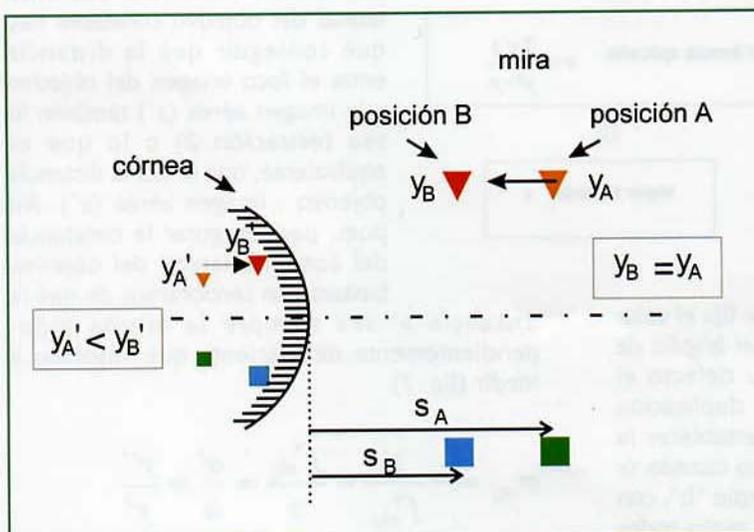


Fig. 8. Variación de la imagen corneal en función de la distancia de la mira a la córnea. Si se acerca la mira a la córnea, su imagen se desplaza hacia el ápex y aumenta de tamaño.



con la imagen del retículo. Además, si la distancia focal del ocular es relativamente corta se disminuye la profundidad de foco y se alcanza una mayor precisión en el enfoque de la imagen aérea. Bajo esta concepción funcionan los queratómetros tipo Javal-Schiotz.

En estos queratómetros, la coincidencia de las imágenes aéreas duplicadas se consigue variando el tamaño de la mira en lugar de desplazar el sistema de duplicación que puede estar formado por un prisma polarizador de calcita (Wollaston) o por un biprisma.

En este tipo de queratómetros resulta imprescindible que el usuario sea muy meticuloso en el enfoque de la imagen aérea ya que de lo contrario la medida resultará incorrecta. Cuando el paciente presente astigmatismo siempre se realizarán dos medidas independientes, una para cada meridiano.

Podemos concluir esta breve descripción del queratómetro de Javal-Schiotz, diciendo que es uno de los queratómetros más sencillos, por lo que se refiere a diseño, y que la fiabilidad de las lecturas depende en gran medida de la pericia

del observador en detectar cuando la imagen aérea está perfectamente enfocada.

¿Existe algún otro método que nos permita distinguir fácilmente si la imagen aérea está correctamente enfocada?

Efectivamente, existe el método de coincidencia que permite distinguir fácilmente si la imagen aérea está correctamente enfocada. Dicho método se basa en hacer pasar el haz de luz proveniente de un sistema óptico, en nuestro caso el objetivo, por un diafragma con dos aberturas, denominado disco de Scheiner. La luz, siguiendo su trayectoria a través del diafragma, formará la imagen aérea en la misma posición que si no estuviera el diafragma. Si por error desplazamos "el plano imagen" (fig. 9), la imagen no sólo aparecerá desenfocada sino que, debido a que el diafragma produce dos haces de luz, se formarán dos imágenes. En estas circunstancias,

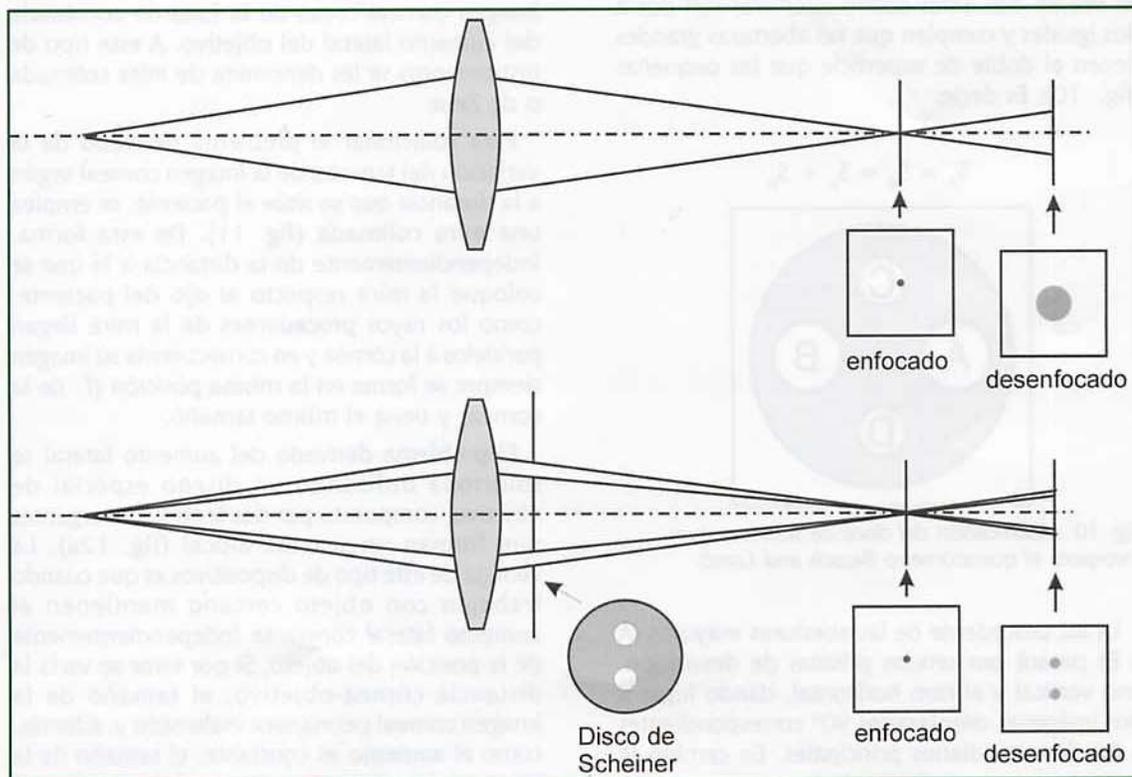


Fig. 9. Esquema del funcionamiento del disco de Scheiner. a) Enfoque sin utilizar ningún dispositivo especial: cuando nos desplazamos del plano imagen, la mancha de desenfoco crece. b) Enfoque utilizando el disco de Scheiner: cuando nos desplazamos del plano imagen la mancha imagen además se duplica.

como el ojo es muy buen comparador es fácil poder apreciar la doble imagen.

Este método se aplica en los queratómetros tipo Bausch and Lomb. Estos queratómetros tienen la propiedad de que la mira es fija así que para alcanzar la coincidencia se debe mover el sistema de duplicación, formado en este caso por prismas. Además, este tipo de queratómetros están diseñados para realizar una sola lectura, es decir cuando se posiciona correctamente el instrumento respecto al paciente y se alcanza la coincidencia es posible obtener las lecturas de los dos meridianos simultáneamente. Resulta evidente que si la córnea presenta astigmatismo, cuando el queratómetro esté correctamente situado para realizar la lectura en un meridiano no lo estará para el otro. Por esta razón, para una misma distancia córnea-mira se obtendrán dos valores distintos, uno para cada meridiano, tanto de la distancia de la imagen corneal respecto al ápex de la córnea como de su tamaño, dando lugar a un error de lectura para el segundo radio corneal porque m ya no será constante.

Los queratómetros tipo Bausch and Lomb incorporan una modificación del disco de Scheiner presentando cuatro aberturas circulares en vez de dos. Estas cuatro aberturas son dos a dos iguales y cumplen que las aberturas grandes tienen el doble de superficie que las pequeñas (fig. 10). Es decir:

$$S_A = S_B = S_C + S_D$$

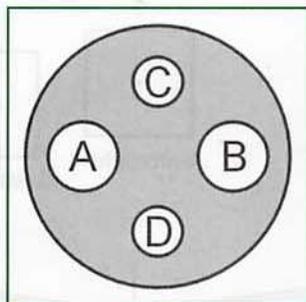


Fig. 10. Modificación del disco de Scheiner que incorpora el queratómetro Bausch and Lomb.

La luz procedente de las aberturas mayores (A y B) pasará por sendos prismas de desviación, uno vertical y el otro horizontal, dando lugar a dos imágenes desplazadas 90° correspondientes a los dos meridianos principales. En cambio la restante luz procedente de las dos aberturas pequeñas irá directamente a formar una sola imagen aérea centrada si el instrumento está correctamente enfocado. En caso contrario se

obtendrán dos imágenes ligeramente desplazadas y además serán más tenues ya que la cantidad de luz será la mitad según la relación de superficies antes explicadas.

Resumiendo los puntos más relevantes de los queratómetros tipo Bausch and Lomb, podemos decir que es un instrumento que, gracias a la incorporación del disco de Scheiner, facilita mucho el enfoque pero como las medidas se efectúan con una sola lectura, la segunda de ellas no será tan exacta como la primera debido a que el enfoque se realiza para un solo meridiano y con ello no se asegura la constancia del aumento lateral del objetivo.

¿Puede ser todavía más fiable el sistema de medida de un queratómetro?

La respuesta vuelve a ser afirmativa. Existe un diseño de queratómetro, muy sofisticado y por consiguiente de uso más limitado, que está diseñado para eliminar los problemas que se derivan tanto de la variación del tamaño de la imagen corneal como de la falta de constancia del aumento lateral del objetivo. A este tipo de instrumentos se les denomina de mira colimada o de Zeiss.

Para solucionar el problema derivado de la variación del tamaño de la imagen corneal según a la distancia que se sitúe el paciente, se emplea una mira colimada (fig. 11). De esta forma, independientemente de la distancia a la que se coloque la mira respecto al ojo del paciente, como los rayos procedentes de la mira llegan paralelos a la córnea y en consecuencia su imagen siempre se forma en la misma posición (f' de la córnea) y tiene el mismo tamaño.

El problema derivado del aumento lateral se soluciona utilizando un diseño especial de objetivo, compuesto por dos lentes convergentes que forman un sistema afocal (fig. 12a). La ventaja de este tipo de dispositivos es que cuando trabajan con objeto cercano mantienen el aumento lateral constante independientemente de la posición del objeto. Si por error se varía la distancia córnea-objetivo, el tamaño de la imagen corneal permanece inalterado y, además, como el aumento es constante, el tamaño de la imagen aérea será siempre el mismo así que el valor hallado del radio corneal también lo será.

Estas dos soluciones nos permiten mantener fijo el tamaño de la imagen aérea (y'') aunque

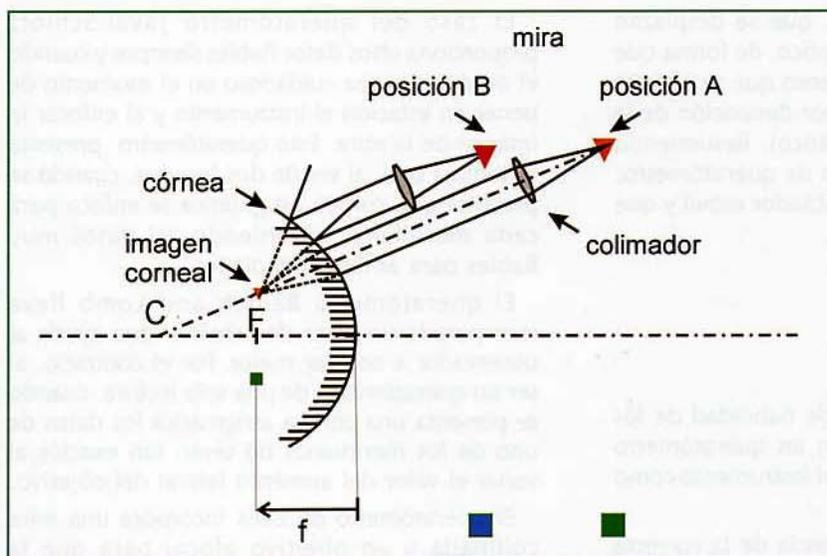


Fig. 11. Esquema del sistema de mira colimada utilizado en el queratómetro de Zeiss donde se aprecia que independientemente de la distancia entre la mira y la córnea, la imagen de la mira se forma siempre en el plano focal de la córnea y mantiene su tamaño constante.

por error se sitúe el instrumento a una distancia inadecuada. Como el cálculo del radio corneal se realiza a partir de esta imagen el resultado que obtendremos siempre será el mismo.

Para concluir este apartado, mencionaremos que este tipo de queratómetro lleva incorporado un sistema de duplicación formado por lentes deslizantes (fig. 12b), situadas en el plano donde

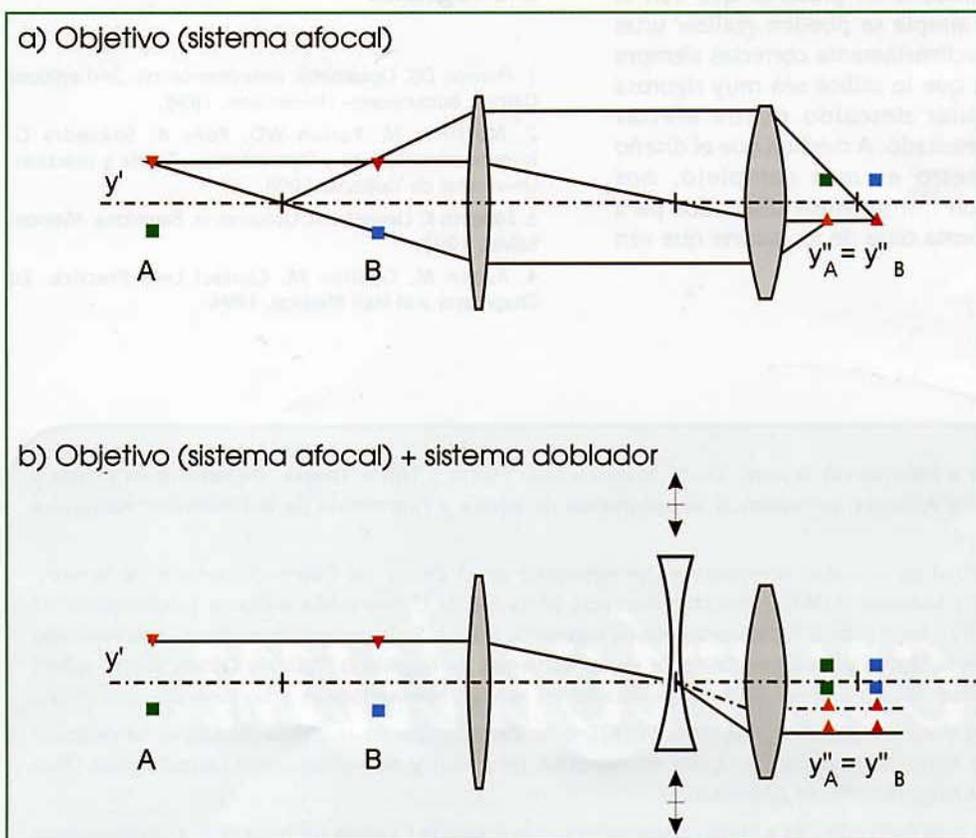


Fig. 12. Esquema del objetivo afocal utilizado en el queratómetro de Zeiss, que mantiene el aumento lateral constante independientemente de la posición del objeto. a) sin sistema doblador b) Incorporando el sistema doblador formado por una lente deslizante cuyo movimiento produce efecto prismático.



coinciden F'_{objetivo} con F_{ocular} , que se desplazan perpendicularmente al eje óptico, de forma que según el grado de deslizamiento que se efectúe provocará una mayor o menor desviación de la imagen aérea (efecto prismático). Resumiendo podemos decir que este tipo de queratómetros son de mira fija y sistema doblador móvil y que además es de dos lecturas.

Conclusiones

Se ha visto que el grado de fiabilidad de los valores que se obtienen con un queratómetro dependen tanto del diseño del instrumento como de su buen uso.

Se ha resaltado la importancia de la correcta fijación del paciente y del posicionamiento del instrumento para realizar las medidas en el centro de la córnea, ya que debido a su geometría las lecturas pueden verse afectadas.

A pesar de los diversos tipos de queratómetros, debemos tener presente que con el de diseño más simple se pueden realizar unas medidas extraordinariamente correctas siempre que la persona que lo utilice sea muy rigurosa ya que cualquier descuido puede afectar seriamente al resultado. A medida que el diseño del queratómetro es más complejo, nos encontramos con instrumentos diseñados para alertarnos de forma clara de los errores que van aconteciendo.

El caso del queratómetro Javal-Schiotz proporciona unos datos fiables siempre y cuando el observador sea cuidadoso en el momento de poner en estación el instrumento y al enfocar la imagen de la mira. Este queratómetro presenta la ventaja que, al ser de dos lecturas, cuando se presenta una córnea astigmática se enfoca para cada meridiano, obteniendo así datos muy fiables para ambos meridianos.

El queratómetro Bausch and Lomb lleva incorporado un disco de Scheiner que ayuda al observador a enfocar mejor. Por el contrario, al ser un queratómetro de una sola lectura, cuando se presenta una córnea astigmática los datos de uno de los meridianos no serán tan exactos al variar el valor del aumento lateral del objetivo.

El queratómetro de Zeiss incorpora una mira colimada y un objetivo afocal para que la fiabilidad de las lecturas no dependa de la pericia del observador al enfocar ni de la distancia del observador al instrumento.

Bibliografía

1. Henson DB. Optometric Instrumentation. 2nd edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996.
2. Martínez M, Furlan WD, Pons A, Saavedra G. Instrumentos Ópticos y Optométricos. Teoría y prácticas. Universitat de València. 1998.
3. Edwards K, Llewellyn R. Optometría. Barcelona, Masson-Salvat, 1993.
4. Ruben M, Guillon M. Contact Lens Practice. Ed Chapman and Hall Medical, 1994.

Josep Arasa y Montserrat Arjona, Doctores en Ciencias Físicas y **Núria Tomàs**, Diplomada en Óptica y Máster en Óptica Aplicada, pertenecen al Departamento de Óptica y Optometría de la Universitat Politècnica de Catalunya.

En la actualidad su actividad investigadora se desarrolla en el Centre de Desenvolupament de Sensors, Instrumentació i Sistemes (CD6) e imparten docencia en la Escola Universitària d'Óptica i Optometria de Terrassa (EUOOT) y en el programa de doctorado de Ingeniería Óptica. Su investigación siempre se ha realizado en el campo de la Óptica y fundamentalmente en las vertientes de Ingeniería Óptica y Óptica Visual, reflejo de dicha actividad son los diversos artículos publicados en revistas internacionales y las patentes concedidas.

Respecto a la docencia desempeñada en la EUOOT, cabe destacar que en la última década se ha centrado principalmente en las asignaturas de Óptica Instrumental (Plan 82) y de Instrumentos Optométricos (Plan 92), llevando a cabo la tarea de coordinación.

También han publicado artículos y libros relacionados con la docencia ("Óptica Instrumental" e "Instrumentos Ópticos y Optométricos. Problemas", ambos de Ediciones UPC). Josep Arasa y Montserrat Arjona imparten en el programa de doctorado, entre otras, las asignaturas de Diseño de Sistemas Ópticos e Instrumentación Óptica Avanzada, respectivamente.