

Diseño de Lentes Intraoculares Tóricas y Evaluación de su Calidad Óptica en Ojo Modelo

Design of Toric Intraocular Lenses and Evaluation of their Optical Quality in a Model Eye

Aser Cebollada-Martínez, MSc^{1*}, Kevin Moldvai, GOO², Laura Remón Martín, GOO³, Carla Sierra Santamaria, GOO⁴, Marta Sancho Larraz, MSc⁵, Blanca Fernández González, MSc⁶, Patricia Ponce Cabrera, MSc⁷

1: Biotech Vision SLP, Spin-off, Universidad de Zaragoza, España.

2: Eroski ópticas, San Sebastian, España.

3: Universidad de Zaragoza, Departamento de Física Aplicada, España.

4: Multiópticas Puerto Venecia, Zaragoza, España.

5: Universidad de Zaragoza, España.

6: Ópticas Delgado, Sevilla, España.

7: General Óptica, Sevilla, España.

* asercbolladamtnez@hotmail.com

Recibido: 8 de septiembre del 2024

Aceptado: 4 de noviembre del 2024

Publicado: 18 de noviembre del 2024

Financiación: Ninguno de los autores declaran tener financiaciones.

Declaración de Conflicto de Intereses: Ninguno de los autores declaran tener conflictos de intereses.

Relevancia: El estudio evalúa la calidad de imagen de lentes intraoculares tóricas (LIOs-T) con distintas toricidades y geometrías esféricas, comparándolas con LIOs-T esféricas. Se analiza su tolerancia a inclinaciones, descentramientos y rotaciones en un modelo ocular mediante simulaciones numéricas, sin realizar pruebas experimentales.

Propósito: evaluar la calidad de imagen de distintos diseños de lentes intraoculares tóricas (LIOs-T) y su tolerancia a inclinaciones, descentramientos y rotaciones en un modelo ocular. Se diseñaron LIOs-T con diferentes grados de toricidad y geometrías esféricas (aberración esférica (AE) negativa y neutra), ajustando la toricidad corneal del modelo para compensar la toricidad de las LIOs. Los resultados, obtenidos numéricamente sin pruebas experimentales, comparan el rendimiento óptico de LIOs con diversas toricidades y asfericidades, incluyendo LIOs tóricas esféricas.

Material y métodos: Para evaluar el rendimiento óptico de lentes intraoculares tóricas (LIOs-T) bajo diferentes condiciones, se utilizó un modelo numérico de un ojo pseudofáquico en el software ZEMAX®. Basado en el ojo esquemático de Atchinson, el estudio consideró LIOs-T con distintas potencias astigmáticas y geometrías esféricas (neutras y negativas). Se analizaron los efectos de descentramientos, inclinaciones y rotaciones de las LIOs-T en la calidad de imagen, midiendo la Modulación de Transferencia Óptica (MTF) y los coeficientes de Zernike. Los resultados sugieren que la posición de la retina influye en cómo estos factores afectan la calidad óptica.

Resultados: El estudio evaluó el rendimiento óptico de diversos diseños de lentes intraoculares tóricas (LIOs-T) bajo condiciones de descentramiento, inclinación y rotación, utilizando métricas como Modulación de Transferencia Óptica (MTF) y error cuadrático medio (RMS) de aberraciones. La lente B mostró la mejor calidad óptica centrada, pero fue la más afectada por descentramientos y rotaciones, con una caída notable en MTF. La lente A y esférica ofrecieron menor calidad inicial pero mayor estabilidad frente a desplazamientos. La lente B tuvo un bajo desenfoque centrado y mejoró en inclinaciones hasta 4°, mientras que las demás lentes presentaron una mayor disminución de MTF con inclinaciones menores. Estos resultados indican que, aunque la lente B ofrece la mejor calidad óptica centrada, su rendimiento se reduce significativamente con el descentramiento y la inclinación.

Conclusiones: Las LIO tóricas con mayor constante de conicidad ofrecen un mejor rendimiento óptico en términos de MTF y aberración de frente de onda en posición centrada, superando a las lentes esféricas. Aunque la MTF es independiente de la potencia del cilindro, la lente B es más sensible al descentramiento, mientras que las lentes con menor conicidad o esféricas son menos afectadas. Las aberraciones de astigmatismo y coma son similares entre dis-

eños bajo inclinaciones o rotaciones. Los resultados sugieren que las LIO sin aberraciones pueden ser la mejor opción si no se puede asegurar una alineación perfecta.

Palabras clave: Cataratas, Lentes Intraoculares Tóricas, Inclinación, Descentramiento, Rotación, Diseño.

Relevance: The study evaluates the image quality of toric intraocular lenses (IOLs-T) with different levels of toricity and aspheric geometries, comparing them with spherical IOLs-T. It analyzes their tolerance to tilt, decentration, and rotation in a model eye through numerical simulations, without experimental testing.

Purpose: To assess the image quality of various designs of toric intraocular lenses (IOLs-T) and their tolerance to tilt, decentration, and rotation in a model eye. IOLs-T with different degrees of toricity and aspheric geometries (negative and neutral asphericities) were designed, adjusting the model's corneal toricity to compensate for the IOLs' toricity. The results, obtained numerically without experimental testing, compare the optical performance of IOLs with varying toricities and asphericities, including spherical toric IOLs.

Methods: To evaluate the optical performance of toric intraocular lenses (IOLs-T) under different conditions, a numerical model of a pseudophakic eye was used in ZEMAX® software. Based on Atchinson's schematic eye, the study considered IOLs-T with various astigmatic powers and aspheric geometries (neutral and negative). The effects of decentration, tilt, and rotation of the IOLs-T on image quality were analyzed by measuring Modulation Transfer Function (MTF) and Zernike coefficients. The results suggest that the retina's position affects how these factors impact optical quality.

Results: The study evaluated the optical performance of various designs of toric intraocular lenses (IOLs-T) under conditions of decentration, tilt, and rotation, using metrics such as Modulation Transfer Function (MTF) and root mean square (RMS) error of aberrations. Lens B showed the best optical quality when centered but was most affected by decentration and rotation, with a significant drop in MTF. Lenses A and spherical IOLs initially offered lower quality but greater stability against displacements. Lens B had minimal defocus when centered and performed better with tilts up to 4°, whereas other lenses experienced greater MTF reduction with smaller tilts. These results indicate that while Lens B provides the best centered optical quality, its performance significantly deteriorates with decentration and tilt.

Conclusions: Toric IOLs with higher conicity constants offer better optical performance in terms of MTF and wave-front aberration when centered, surpassing spherical lenses. Although MTF is independent of cylinder power, Lens B is more sensitive to decentration, while lenses with lower conicity or spherical lenses are less affected. Astigmatism and coma aberrations are similar among designs under tilt or rotation. The results suggest that IOLs with minimal aberrations may be the best option if perfect alignment cannot be ensured.

Keywords: Cataract, Toric Intraocular Lens, Inclination, Decentration, Rotation, Design.

INTRODUCCIÓN

El ojo humano procesa aproximadamente el 80% de la información sensorial. Está compuesto por estructuras clave como la córnea, humor acuoso (HA), iris, cristalino, humor vítreo (HV) y retina. La luz atraviesa estas estructuras y llega a la retina, donde los fotorreceptores la convierten en señales eléctricas transmitidas al cerebro.

La córnea, principal superficie refractiva, tiene un grosor promedio de 0,54 mm (1) y un índice de refracción (n) de 1,376 y radios de curvatura de 7,8 mm (anterior) y 6,5 mm (posterior) (2), proporcionando un poder refractor

de aproximadamente 42-43 D. Su geometría elipsoidal con una asfericidad promedio de $Q \approx -0,26$ (3) resulta en una aberración esférica (AE) de +0,30 μm para un diámetro pupilar de 6 mm (4).

El cristalino, lente biconvexa flexible ubicada detrás del iris, tiene un espesor central de 3,64 a 5,40 mm y radios de curvatura de 11 mm (anterior) y -6 mm (posterior) (5). Su índice de refracción varía de 1,40 – 1,41 en el centro a 1,36 en los bordes con un poder refractor de aproximadamente 20 D y facilita la acomodación (6). En individuos jóvenes, presenta una AE negativa, contribuyendo a una AE total del ojo de aproximadamente $+0,036 \pm 0,04 \mu\text{m}$ (7).

El iris regula la cantidad de luz que entra al ojo, af-

ectando la calidad de imagen. Con pupilas pequeñas, la difracción es predominante, mientras que, con pupilas grandes, las aberraciones tienen un mayor impacto en la calidad visual.

La retina, en la parte posterior del ojo, proyecta las imágenes formadas por el sistema óptico. La mácula, especialmente la fovea, es crucial para la visión detallada debido a la alta densidad de conos.

Envejecimiento ocular y sus repercusiones:

El rendimiento visual decrece con la edad, afectando la agudeza visual (AV) y la sensibilidad al contraste (SC), debido a factores ópticos, retinianos y neuronales. Mientras la córnea sufre pocos cambios, el cristalino experimenta alteraciones significativas en su AE (8). En jóvenes, la AE del cristalino es negativa, pero a partir de los 35-40 años se vuelve cercana a 0 o incluso positiva, lo que aumenta las aberraciones y reduce la calidad óptica del ojo, ya que la AE positiva de la córnea ya no se compensa adecuadamente.

El envejecimiento causa presbicia y cataratas, siendo la primera una pérdida progresiva de la capacidad de acomodación y la segunda una opacificación del cristalino, reducen la AV y la SC debido a la dispersión de la luz. El tratamiento estándar para las cataratas es la sustitución del cristalino por una lente intraocular (LIO), que restaura la transparencia y corrige errores refractivos.

Solución: ojo pseudofáquico:

El mercado de LIOs incluye LIOs monofocales, multifocales y tóricas (LIO-T). Las monofocales corrigen visión a una sola distancia con una mejor calidad de imagen y sin efectos secundarios como halos o reducción de la SC (9). Las multifocales permiten una visión clara en cerca y lejos, eliminando la necesidad de gafas. Las LIO-T corrigen el astigmatismo corneal preoperatorio.

Los distintos modelos de LIO generan patrones variados AE. Las LIO esféricas inducen una AE positiva (10), aumentando la AE ocular y la profundidad de enfoque. En cambio, las esféricas, con AE negativa o neutra, mejoran la calidad visual y la SC, especialmente en condiciones de baja luminosidad (11), aunque su efectividad puede verse afectada por la variabilidad en la aberración corneal tras cirugía refractiva. Las nuevas LIO esféricas libres de aberraciones mantienen la AE existente y son menos sensibles a errores de descentramiento (12)(13).

LIOs tóricas:

En cirugía de cataratas, las LIOs corrigen el estado refractivo del paciente, abordando componentes esféricos y cilíndricos. Aproximadamente el 20% de los pacientes tienen astigmatismo preoperatorio de 1,25 D o más (14), lo que puede llevar a astigmatismo residual y necesidad de gafas. Las LIO-T, diseñadas para corregir el astigmatismo corneal, mejoran la AV y la SC. Sin embargo, su

posible rotación dentro del saco capsular puede reducir la potencia cilíndrica en un 3,3% con una rotación de 1° (15) y eliminar la corrección astigmática con 30° de rotación. La mayor rotación ocurre en la primera semana postoperatoria (16)(17).

El mercado ofrece LIO-T, con diferentes características (18)(19) y potencias cilíndricas (20). La correcta colocación de estas lentes es crucial.

Estudios clínicos (21)(22) han demostrado que las LIO-T mejoran la independencia de gafas, y reducen el astigmatismo refractivo en comparación con LIO monofocales esféricas. Aunque no se observaron diferencias significativas en la calidad de visión medida por SC y error refractivo, la SC mejoró en ambos grupos a niveles normales a los 6 meses (23)(24). La calidad de imagen se deteriora con mayor rotación de la LIO (25).

Evaluación de la calidad de la imagen:

La MTF evalúa la capacidad de un sistema óptico para reproducir detalles de una imagen, midiendo la reducción del contraste según la frecuencia espacial (26). Se usa la mira de Foucault para calibrar la calidad óptica, mostrando cómo la MTF ideal (sin aberraciones) se compara con sistemas afectados por aberraciones (27).

La aberrometría del frente de onda mide la diferencia entre el frente de onda ideal y el real, descompuesta en polinomios de Zernike (28), que se identifican por índices (Znm) que indican el orden radial y frecuencia angular.

La calidad visual del ojo se ve afectada por aberraciones de bajo orden (astigmatismo) y de alto orden (AE y coma). Las aberraciones de 2° orden se pueden corregir con lentes o cirugía, mientras que las de alto orden son más prominentes con pupilas grandes (29). El error cuadrático medio (RMS) cuantifica la desviación del frente de onda medido del ideal, calculado a partir de los coeficientes de Zernike (30).

En este estudio se evaluará la calidad de imagen proporcionada por diferentes diseños de LIOs-T y su tolerancia a inclinaciones, descentramientos y rotaciones en un modelo ocular. Se diseñaron LIOs-T con distintos grados de toricidad y dos geometrías esféricas: una con AE negativa y otra con AE neutra. La toricidad corneal del ojo modelo se ajustó para compensar la toricidad de las LIOs. Los resultados se obtuvieron numéricamente, sin experimentación directa, y se compararon los rendimientos ópticos de LIOs con diferentes toricidades y asfericidades, incluidas las tóricas esféricas, bajo diversas condiciones de inclinación, descentramiento y rotación.

MATERIAL Y MÉTODOS

Ojo modelo:

Para diseñar y evaluar el rendimiento óptico de las LIO-T bajo descentramientos, rotaciones e inclinaciones, se utilizó un modelo numérico de un ojo pseudofáquico en el software ZEMAX® (OpticsStudio, edición 2005). El modelo se basó en el ojo esquemático de Atchinson (tabla 1), reemplazando el cristalino por una LIO-T de potencia variable (tabla 2). La córnea del modelo tiene una potencia de 42,36 D y una AE que varía con el tamaño pupilar. Se evaluaron dos posiciones para la retina: posición paraial, que ofrece mejor calidad óptica con la lente centrada, y posición de mínimo RMMS, que, aunque puede ofrecer calidad ligeramente inferior con la lente centrada, es menos sensible a descentramientos, inclinaciones y rotaciones.

Diseño de LIOs-T:

Se evaluaron LIOs-T con potencias astigmáticas de 1,5; 4,5; y 7,5 D en la cara anterior, todas con una potencia esférica de 20,00 D y un $n=1,406$. Los radios de curvatura correspondientes a cada potencia astigmática se presentan en la tabla 2. El radio posterior y el espesor central se mantienen constantes. Se diseñaron tres geometrías para cada LIO-T con una pupila de 3,00 mm: una lente esférica con AE inherente y dos esféricas (AE neutra y negativa). La conicidad se ha aplicado en la superficie anterior de las LIO-T y en ambos meridianos. La Tabla muestra los valores de la constante cónica para cada diseño: la lente A corresponde a LIOs con AE neutra y

la B con AE negativa. La lente B presenta un valor de constante cónica mayor que la lente A en todas las potencias astigmáticas evaluadas.

Se usaron lentes con toricidad y dos constantes cónicas variables en la cara anterior, tanto en el meridiano vertical como en el horizontal (ver Tabla 2). Todas mantienen constante el espesor de centro. Comparando la AE proporcionada por ZEMAX® (Tabla 3 izquierda) con el valor normalizado de Zernike (Tabla 3 derecha), se observa que la AE de cuarto orden corresponde al undécimo polinomio de Zernike en ZEMAX (Z11). Para convertir el valor de Z11 en micras, se debe multiplicar por la longitud de onda usando la siguiente fórmula:

$$z_0^4(\mu m) = Z11_{(ZEMAX)} * \lambda$$

Conociendo la AE de cuarto orden en micras de la córnea del modelo desde ZEMAX, se puede ajustar esta aberración insertando una LIO y aplicando la asfericidad necesaria en los meridianos de la superficie anterior de la LIO para alcanzar el valor deseado.

Simulaciones numéricas:

Cada LIO diseñada se evaluó en un modelo ocular usando el software ZEMAX para diferentes condiciones de alineación. Se analizó el rendimiento óptico en casos de descentramiento de 0.00 a 1.00 mm (en pasos de 0.25 mm) con respecto al centro pupilar, inclinaciones de 0.00 a 5.00 grados (pasos de 1.00 grado) respecto al eje óptico, y rotaciones de 0.00 a 15.00 grados (en pasos de 5.00 grados) en

Superficie	Radio (mm)	Espesor (mm)	Índice de refracción para $\lambda=550$ nm	Constante cónica
Córnea anterior	7,77	0,55	1,376	-0,15
Córnea posterior	6,40	2,72	1,3374	-0,275
Pupila	Inf.	1,78*	1,3374	-
LIO anterior	A determinar según potencia	A determinar según potencia	1,460	A determinar según diseño
LIO posterior	A determinar según potencia	A determinar según potencia	1,336	0,00
Retina	-12,0	-	-	+0,26

Tabla 1. Datos geométricos ojo modelo de Atchinson.

* Se considera una distancia de 4,5 mm desde la cara posterior de la córnea hasta la superficie anterior de la LIO.

LIOs (según cilindro, en D)	Radio de Curvatura (mm)			Espesor Central (mm)	Diseño de LIO	Constante cónica cara anterior			
	Anterior		Posterior			Retina en paraxial		Retina mínimo RMS	
	Meridiano vertical	Meridiano horizontal				Meridiano vertical	Meridiano horizontal	Meridiano vertical	Meridiano horizontal
1,5	8,615	7,800	-25,300	0,900	Lente A	-0,834	-0,471	-0,853	-0,495
					Lente B	-4,246	-3,137	-4,157	-3,059
					Esférica	0,000	0,000	0,000	0,000
4,5	9,622	7,125	-25,300	0,900	Lente A	-0,927	-0,369	-0,934	-0,350
					Lente B	-5,776	-2,125	-5,735	-2,154
					Esférica	0,000	0,000	0,000	0,000
7,5	10,893	6,558	-25,300	0,900	Lente A	-1,228	-0,250	-1,234	-0,267
					Lente B	-8,081	-1,540	-8,200	-1,524
					Esférica	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 2. Parámetros de las LIOs tóricas utilizadas para el estudio

Aberración esférica - según Zemax y la notación standard ANSI						
#	Polinomio de Zernike en ZEMAX	n	m	Polinomio de Zernike Ortogonal	Nombre de la Aberración	
Z11	$\sqrt{5} (6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	4	0	$\sqrt{5} (6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Aberración esférica primaria	

Tabla 3. Comparación entre la aberración esférica proporcionada por el software de diseño óptico ZEMA y por la normativa ANSI

ambos sentidos respecto al eje óptico corneal. Se evaluaron tanto el eje horizontal como el vertical en cada caso.

La calidad de la imagen se evaluó en cada situación para un objeto situado en el eje del sistema a distancia infinita mediante dos exámenes:

1. MTF tangencial y sagital, con un objeto de 100 ciclos por grado (cpg) y un tamaño de pupila de 3.00 mm.

2. Coeficientes de Zernike, analizando valores para desenfoque, astigmatismo y coma, y calculando el RMS a partir de estos coeficientes.

RESULTADOS

Se evaluó el rendimiento óptico de varios diseños de LIO midiendo la MTF en los ejes tangencial y sagital bajo condiciones de descentramiento, inclinación y rotación, con una pupila de 3,00 mm y 100 cpq. También se calcularon los valores de RMS para desenfoque, astigmatismo y coma. La Figura 1 muestra que la lente B ofrece la mejor MTF cuando está centrada, pero su calidad disminuye rápidamente a partir de un descentramiento de 0,25 mm. En contraste, la lente esférica y la A, aunque con

peor rendimiento cuando están centradas, son menos sensibles al descentramiento. La lente A incluso mejora su MTF con mayor descentramiento.

La Figura 1 muestra como varía la MTF con el descentramiento, la inclinación en los ejes horizontal y vertical y la rotación en sentido dextrógiro y levógiro para la LIO-T de cilindro +1,50 D en diferentes diseños de lentes.

Se observa que las inclinaciones verticales y horizontales tienen efectos similares, con un intercambio entre las MTF sagitales y tangenciales. La disminución de la MTF fue casi independiente de

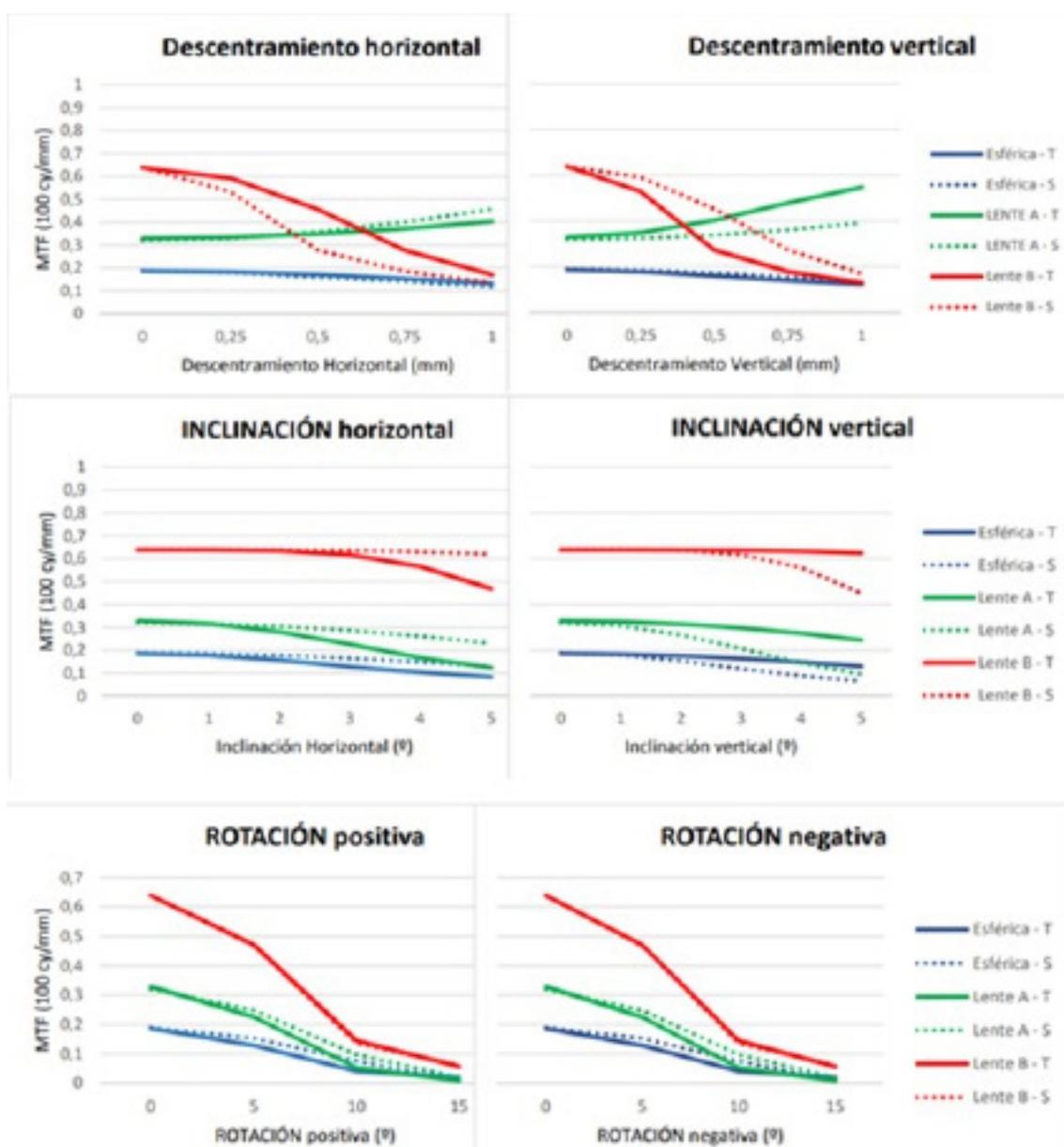


Figura 1. Variación de la MTF tangencial (línea continua) y sagital (línea de puntos) para diferentes descentramientos, inclinaciones y rotaciones, respectivamente de los distintos diseños de la LIO-T con potencia +20,00 D cilindro +1,50 D y diámetro pupilar de 3,00 mm

la inclinación en todos los diseños. La lente B mantuvo una MTF constante hasta inclinaciones de 3°, con valores superiores a 0,5 en cualquier posición. En comparación, la lente A y la esférica mostraron MTF de 0,3 y 0,2, respectivamente en posiciones centradas e inclinadas.

Se muestra como la MTF varía con la rotación en sentido dextrógiro (izquierda) y levógiro (derecha) para la LIO-T de cilindro +1,50 D y diferentes diseños de lentes. Las rotaciones, tanto positivas como negativas, afectan de manera similar la MTF, siendo este el movimiento que más impacta en la calidad óptica. Se observa una disminución significativa de la MTF, especialmente a 5° de rotación, con un efecto más pronunciado en lentes con mayor conicidad, como la B. Las lentes A y esférica muestran una disminución de MTF menos marcada.

Después de analizar el rendimiento óptico en términos de MTF, se evalúa la calidad visual de las tres

lentes utilizando los coeficientes de aberración del frente de onda de Zernike para desenfoque (Z02), astigmatismo (Z2-2 y Z22) y coma primario (Z3-1 y Z31). Se calculó el MS para una pupila de 3.00 mm en todas las LIOs. La Figura 2 muestra el RMS para el descentramiento horizontal (izquierda) y vertical (derecha) en una LIO con poder de +20,00 D y cilindro de +1,50 D.

La lente B es significativamente más sensible al descentramiento, mostrando mayores valores de desenfoque, astigmatismo y coma en comparación con las otras lentes. Sin embargo, en posición centrada, la aberración por desenfoque en la lente B es casi nula. En ausencia de descentramiento, los valores de RMS para astigmatismo y coma son insignificantes. La LIO esférica genera el mayor RMS de desenfoque, seguida por la A y luego la esférica. La Figura 3 muestra el RMS de diferentes aberraciones según la inclinación horizontal (izquierda) y

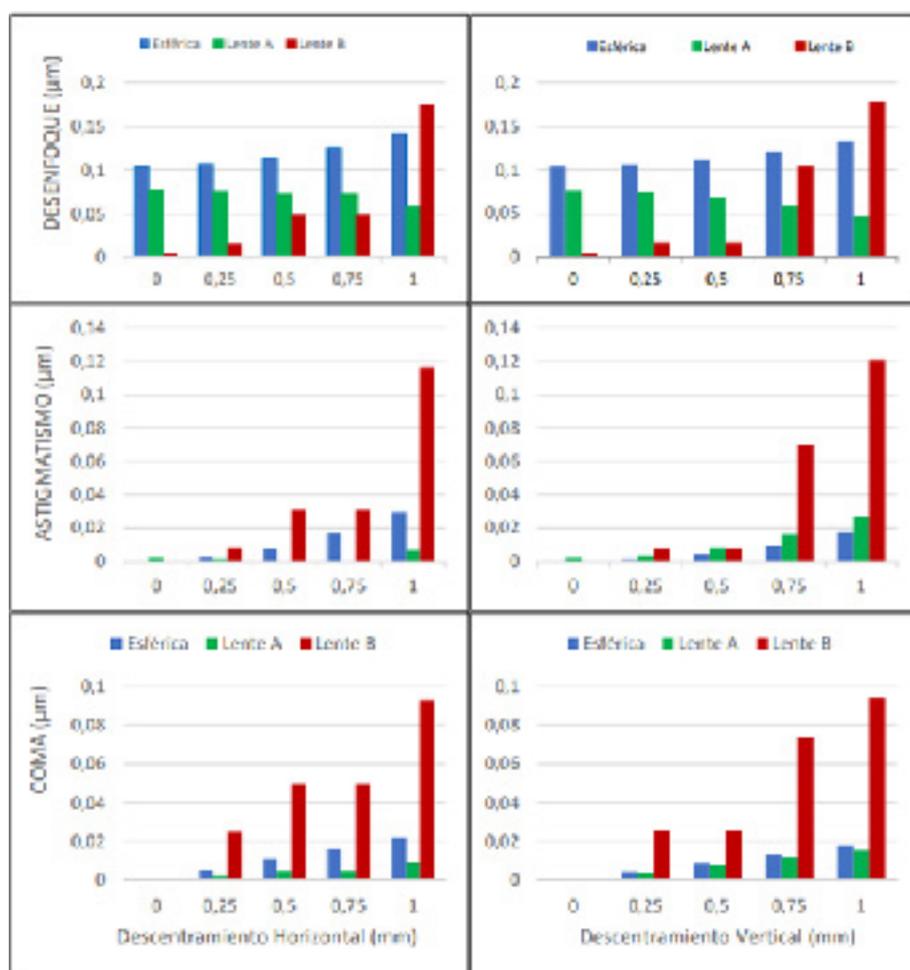


Figura 2. Variación del RMS para el descentramiento horizontal (izquierda) y vertical (derecha) en una LIO con poder de +20,00 D y cilindro de +1,50 D. Las subfiguras 2a, 2b y 2c presentan el RMS de desenfoque, astigmatismo y coma, respectivamente.

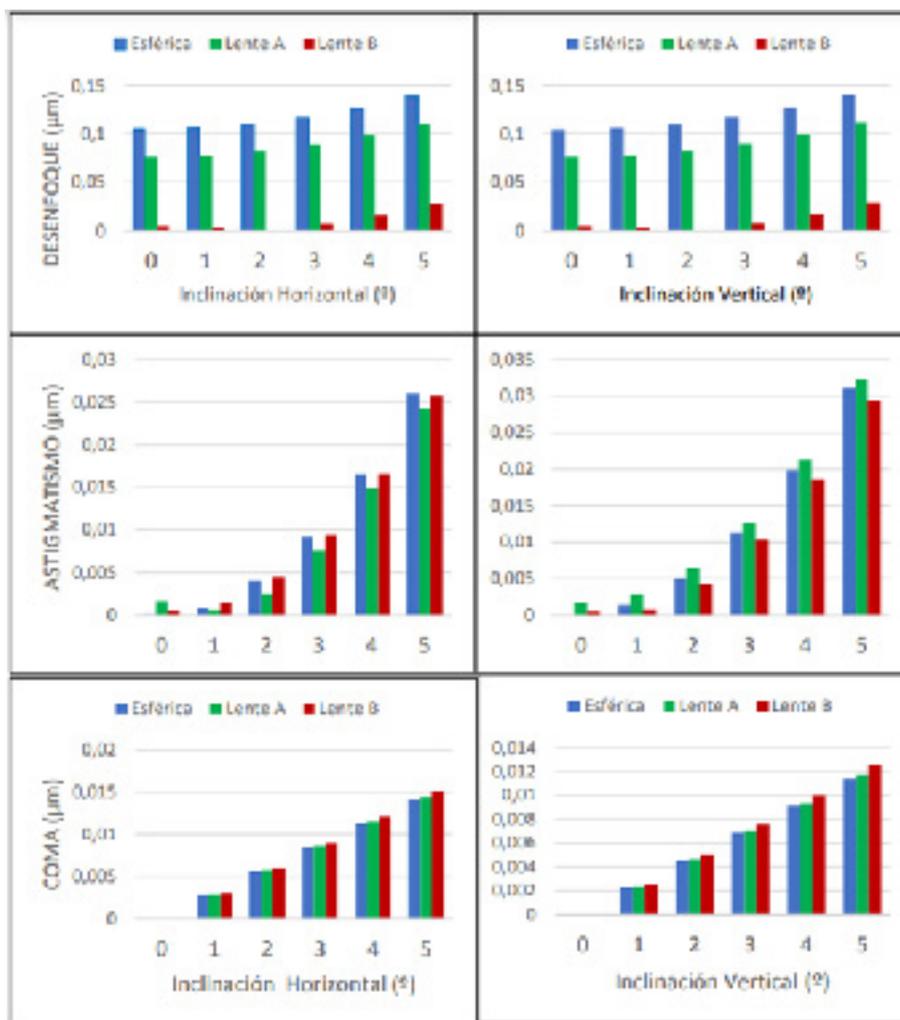


Figura 3. Variación del RMS de diferentes aberraciones según la inclinación horizontal (izquierda) y vertical (derecha). Las subfiguras 3a, 3b y 3c presentan los valores de RMS para desenfoque, astigmatismo y coma.

vertical (derecha).

La lente B tiene el mejor rendimiento en desenfoque, con valores de RMS casi nulos, mientras que a lente esférica muestra los peores resultados, con valores superiores a $0,1\mu\text{m}$. Para astigmatismo y coma, las tres lentes presentan valores similares, lo que indica que la inclinación aumenta las aberraciones del frente de onda de manera similar en todos los diseños de LIOs.

La Figura 4 muestra la variación del RMS de desenfoque (4a) y astigmatismo (4b) con las rotaciones en sentido dextrógiro (izquierda) y levógiro (derecha).

La aberración de coma se omite ya que permanece nula en todas las rotaciones. Se observa que, aunque todas las lentes muestran efectos similares en las rotaciones, la B presenta un desenfoque mínimo (casi $0\mu\text{m}$). El astigmatismo aumenta continuamente con la rotación en todas las lentes, sin depender del tipo de movimiento rotacional.

Los resultados para otros valores de cilindro muestran patrones similares a los de $+1,50\text{ D}$. La Figura 10 compara las MTF tangenciales (línea continua) y sagitales (línea punteada) a 100 cpq con una pupila de $3,00\text{ mm}$, para las lentes A y B con potencias esféricas de $+20,00\text{ D}$ y cilindros de $+1,50\text{ D}$, $+4,50\text{ D}$ y $+7,50\text{ D}$.

La Figura 5a muestra que en la lente B, la MTF disminuye notablemente a partir de $0,25\text{ mm}$ de descentramiento, afectando más la MTF sagital que la tangencial, pero mantiene la mejor calidad óptica en $0,00\text{ mm}$ de descentramiento. La Figura 5b indica que la lente B ofrece el mejor rendimiento frente a inclinaciones, con MTF superiores a $0,6$ hasta 4° , mientras que las demás tienen MTF cerca de $0,3$ en inclinaciones pequeñas y entre $0,1$ y $0,3$ en inclinaciones mayores. La MTF varía de manera independiente de la potencia cilíndrica.

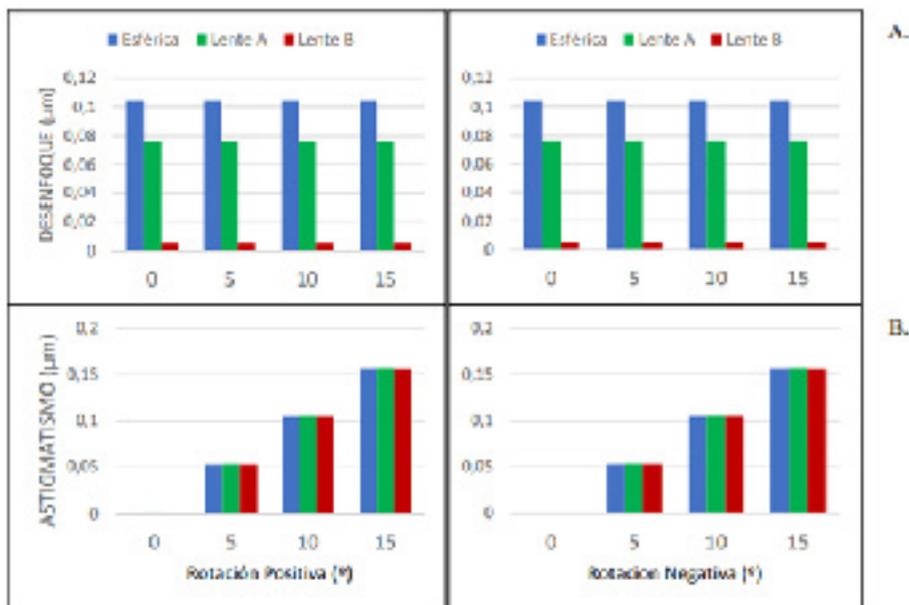


Figura 4. Variación del RMS de desenfoque (4a) y astigmatismo (4b) con las rotaciones en sentido dextrógiro (izquierda) y levógiro (derecha).

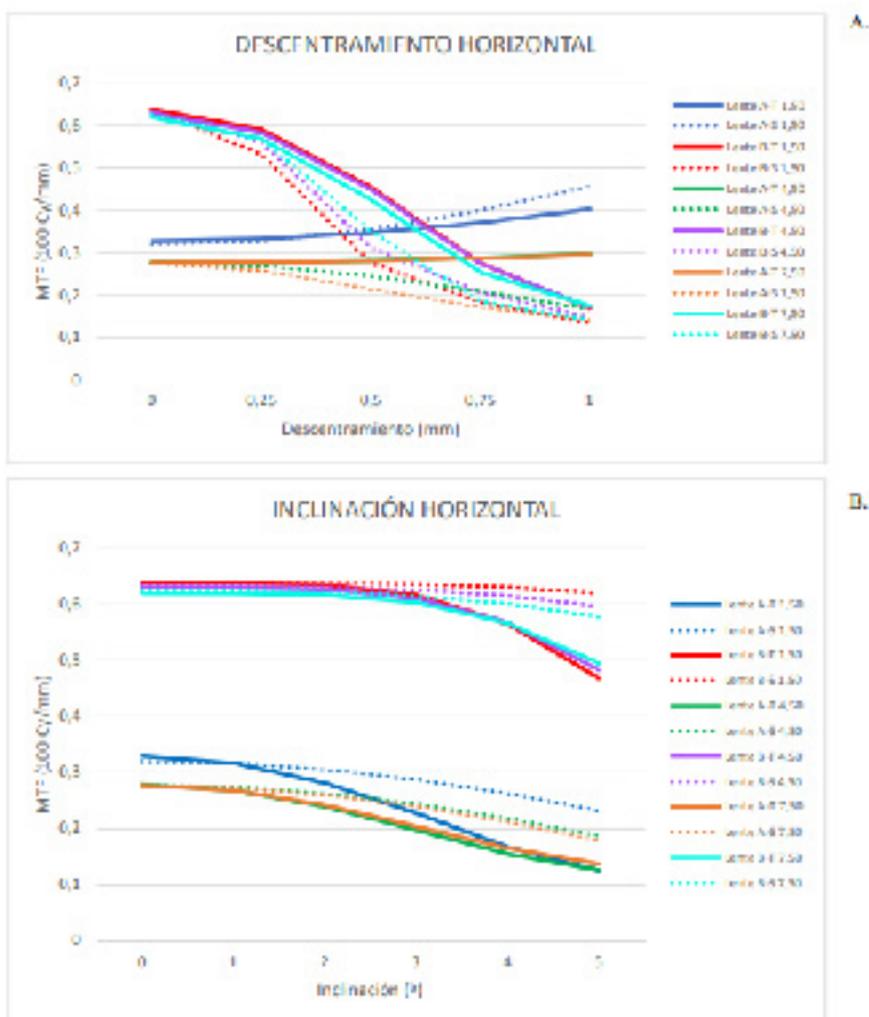


Figura 5. Variación de la MTF con la inclinación.

DISCUSIÓN

La estabilidad postoperatoria de la LIO es crucial para el éxito del procedimiento quirúrgico, influenciada por factores como el diámetro de la LIO frente al del saco capsular, la técnica quirúrgica, el material y el diseño del háptico. Para LIO premium la posición final es más crítica que para las esféricas para lograr un rendimiento óptico óptimo. En este estudio, se diseñaron tres LIOs-T con diferentes características y potencias cilíndricas (+1.50 D, +4.50 D, +7.50 D) y potencia esférica de +20.00 D. Se evaluó el efecto del descentramiento, inclinación y rotación en el rendimiento óptico mediante cálculos de MTF tangencial y sagital a 100 cpg para una pupila de 3.00 mm y se analizó el RMS usando un software de diseño óptico y el modelo teórico del ojo de Atchinson. Se consideraron 5 valores de descentramiento (0.00 mm a 1.00 mm en pasos de 0.25 mm), 6 de inclinación (0° a 5° en pasos de 1°) y 4 de rotación (0° a 15° en pasos de 5°).

Los resultados se compararán con estudios previos (13) que evaluaron la calidad óptica de LIOs monofocales esféricas, tanto numéricamente como experimentalmente, considerando descentramientos e inclinaciones. Se diseñaron y fabricaron tres LIOs con distintas potencias y AE. Se analizaron las variaciones en aberraciones del frente de onda y su impacto en la MTF a 100 cpg para una pupila de 3.00 mm, pero no se evaluaron los efectos de rotación, ya que las LIOs eran monofocales. En ambos estudios, la degradación de la MTF dependió de la corrección de AE, pero el efecto de la inclinación de la LIO fue menos sensible al diseño que el descentramiento. Las LIOs esféricas mostraron un peor rendimiento de MTF en posiciones centradas en comparación con las esféricas. La lente B fue la más afectada por el descentramiento, con una rápida disminución de la MTF en todas las potencias cilíndricas, mientras que en las lentes A y esférica la MTF se mantuvo casi independiente del descentramiento (figura 10a). No obstante, cuando la lente B estaba centrada, su MTF era superior a la del resto de lentes.

La MTF fue casi independiente de la inclinación para los diferentes diseños de lentes (figura 5b), con la lente B manteniendo valores superiores a 0.4 en todas las inclinaciones, mientras que las demás alcanzaron valores cercanos o menores a 0.3. Sin embargo, en caso de rotación de la LIO en el saco capsular, la calidad óptica en términos de MTF disminuye significativamente para todas las lentes, siendo más notable en aquellas con mayores correcciones de AE. Según el teorema de Euler, una rotación de 1° puede reducir la potencia cilíndrica en un 3.3%, y rotaciones de 5°, 10° y 15° pueden reducirla en un 16%, 33% y 50%, respectivamente. Además, las LIOs-

T tienden a experimentar mayor rotación en el postoperatorio temprano.

Se observó que las aberraciones del frente de onda, como desenfoque, astigmatismo y coma, aumentan con el descentramiento en cualquier diseño de LIO. Sin embargo, los efectos de la inclinación y la rotación sobre el RMS de astigmatismo y coma fueron poco dependientes del diseño, con la lente B mostrando valores más bajos de RMS en desenfoque. Estos resultados coinciden con estudios previos (13), donde también se registraron incrementos en el RMS de desenfoque, astigmatismo y coma con el descentramiento. En particular, la lente B mostró una mayor sensibilidad, con un notable aumento del RMS de astigmatismo a partir de 0.50 mm y de coma a partir de 0.25 mm de descentramiento (figura 7b y 7c). En términos de desenfoque, las lentes esféricas y la lente A presentaron valores más altos que la lente B durante inclinaciones y rotaciones, siendo la lente B la que menos RMS presentó.

CONCLUSIONES

En conclusión, las LIOs-T con mayor constante de conicidad superan a las LIOs esféricas en términos de MTF y aberraciones de frente de onda. La MTF es independiente de la potencia del cilindro y muestra un comportamiento similar ante cualquier desalineación. Estos resultados coinciden con estudios anteriores (13), destacando que la lente B es más sensible al descentramiento. Aunque el efecto de la inclinación fue menos dependiente del diseño, las aberraciones de astigmatismo y coma son similares entre los diseños, aunque el desenfoque fue peor en lentes con menor constante cónica o esféricas. Por tanto, los resultados sugieren que, en casos donde no se puede garantizar una alineación precisa, las LIOs sin aberraciones podrían ser la mejor opción para asegurar una calidad de imagen aceptable, incluso con desalineaciones, inclinaciones o rotaciones.

REFERENCIAS

1. Doughty MJ, Zaman ML. Human corneal thickness and its impact on intraocular pressure measures: a review and meta-analysis approach. *Surv Ophthalmol.* abril de 2000;44(5):367-408.
2. Marín P, Cinta M. Óptica Fisiológica: el sistema óptico del ojo y la visión binocular. :307.
3. Yebra-Pimentel E, González-Méijome JM, et al. Asfericidad corneal en una población de adultos jóvenes: Implicaciones clínicas. *Archivos de la Sociedad Española de Oftalmología.* agosto de 2004;79(8):385-91.
4. Dr. Alejandro del Castillo Ruiz DrEHQ. Aberraciones corneales de alto orden. ¿Un método para graduar al queratocono? *Revista Mex Oftal.* diciembre de 2008;82(6):369-75.
5. Satou T, Shimizu K, Tsunehiro S et al. Relationship between Crystalline Lens Thickness and Shape and the Identification of Anterior Ocular Segment Parameters for Predicting the Intraocular Lens Position after Cataract Surgery. *BioMed Research International.* 8 de julio de 2019;2019:1-9.
6. Aggarwala KRG. Ocular Accommodation, Intraocular Pressure, Development of Myopia and Glaucoma: Role of Ciliary Muscle, Choroid and Metabolism. *Med Hypothesis Discov Innov Ophthalmol.* 2020;9(1):66-70.
7. Philip K, Martinez A, Ho A et al. Total ocular, anterior corneal and lenticular higher order aberrations in hyperopic, myopic and emmetropic eyes. *Vision Research.* 1 de enero de 2012;52(1):31-7.
8. Berrio E, Tabernero J, Artal P. Optical aberrations and alignment of the eye with age. *Journal of Vision.* 1 de diciembre de 2010;10(14):34-34.
9. Calladine D, Evans J et al. Multifocal versus monofocal intraocular lenses after cataract extraction. *Sao Paulo Medical Journal.* 1 de febrero de 2015;133:68-68.
10. A Piers P, A Weeber H, et al. Theoretical Comparison of Aberration-correcting Customized and Aspheric Intraocular Lenses. *J Refract Surg.* 1 de abril de 2007;23(4):374-84.
11. Rosés JF, Vega F et al. Estudio comparativo de la calidad óptica de lentes intraoculares de diseño esférico y esférico en presencia de errores de inclinación. *Gaceta de optometría y óptica oftálmica.* 2015;(503):24-8.
12. Sánchez OEP. Predictibilidad en la inducción de aberración esférica basada en la asfericidad corneal post LASIK en miopes. *Revista Sociedad Colombiana de Oftalmología.* 27 de agosto de 2017;49(4):262-7.
13. Pérez-Gracia J, Varea A et al. Evaluation of the optical performance for aspheric intraocular lenses in relation with tilt and decenter errors. *PLoS One [Internet].* 4 de mayo de 2020 [citado 27 de mayo de 2020];15(5).
14. Mateo Gabás J, Ascaso Puyuelo FJ et al. Tratamiento del astigmatismo moderado en pacientes con cataratas. [Zaragoza]: Universidad de Zaragoza, Prensas de la Universidad; 2013. (Tesis de la Universidad de Zaragoza).
15. Razmjoo H, Ghoreishi M et al. Toric Intraocular Lens for Astigmatism Correction in Cataract Patients. *Advanced Biomedical Research.* 1 de enero de 2017;6(1):123.
16. Kessel L, Andresen J, Tendal B et al. Toric Intraocular Lenses in the Correction of Astigmatism During Cataract Surgery: A Systematic Review and Meta-analysis. *Ophthalmology.* febrero de 2016;123(2):275-86.
17. Mozayan E, Lee JK. Update on astigmatism management. *Curr Opin Ophthalmol.* julio de 2014;25(4):286-90.
18. Toric IOLs - EyeWiki [Internet]. [citado 10 de abril de 2020]. Disponible en: https://eyewiki.aao.org/Toric_IOLs
19. Compare IOLs | Beye [Internet]. Beye | The Eye Care Market Research Engine. Beye.com; [citado 22 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.beye.com/r/co/22>
20. Sen P, Kshetrapal M, Shah C, et al. Posterior capsule opacification rate after phacoemulsification in pediatric cataract: Hydrophilic versus hydrophobic intraocular lenses. *Journal of Cataract & Refractive Surgery.* 1 de octubre de 2019;45(10):1380-5.
21. Badoza D. Lentes intraoculares de acrílico hidrofóbico: seguimiento entre 2 y 10 años [Internet]. Javier Casiraghi; [citado 10 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.ofthalmologos.org.ar/oce/items/show/247>
22. Visser N, Beckers HJM, Bauer NJC, et al. Toric vs aspherical control intraocular lenses in patients with cataract and corneal astigmatism: a randomized clinical trial. *JAMA Ophthalmol.* diciembre de 2014;132(12):1462-8.
23. Holland E, Lane S, Horn JD, et al. The AcrySof Toric intraocular lens in subjects with cataracts and corneal astigmatism: a randomized, subject-masked, parallel-group, 1-year study. *Ophthalmology.* noviembre de 2010;117(11):2104-11.
24. Lane SS, Ernest P, Miller KM, et al. Comparison of clinical and patient-reported outcomes with bilateral AcrySof 21 toric or spherical control intraocular lenses. *J Refract Surg.* octubre de 2009;25(10):899-901.
25. Tognetto D, Perrotta AA, Bauci F, et al. Quality of images with toric intraocular lenses: *Journal of Cataract & Refractive Surgery.* marzo de 2018;44(3):376-81.
26. Marcos S. Conocer la calidad óptica del ojo humano es importante en física, oftalmología, optometría, psicología... Qué es, cómo se mide o cómo mejorarla se cuentan entre las cuestiones centrales que la ciencia empieza a desentrañar. *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA.* 2005;9.
27. Bueno JM. Introducción a la óptica instrumental. EDITUM; 1999. 130 p.
28. Tomás-Juan J. Aberrometría ocular: aplicaciones clínicas y limitaciones de los sensores de frente de onda. *Cienc Tecnol Salud Vis Ocul.* 1 de junio de 2014;12(1):93.
29. Mr C, Rr K. Correlation of aberrations with visual acuity and symptoms. *Ophthalmol Clin North Am.* 1 de junio de 2004;17(2):135-42, v.
30. Solomon KD, Fernández de Castro LE, Sandoval HP, Vroman DT. Comparison of wavefront sensing devices. *Ophthalmol Clin North Am.* junio de 2004;17(2):119-27, v.
31. The STAAR Toric IOL [Internet]. CRSToday. [citado 21 de abril de 2020]. Disponible en: https://crstoday.com/articles/2006-may/crst0506_14-html/

ABREVIATURAS

- AE: Aberración esférica
- AV: Agudeza visual
- HA: Humor acuoso
- HV: Humor vítreo
- LIO: Lente intraocular
- MTF: Función de transferencia de modulación
- n: Índice de refracción
- SC: Sensibilidad al contraste