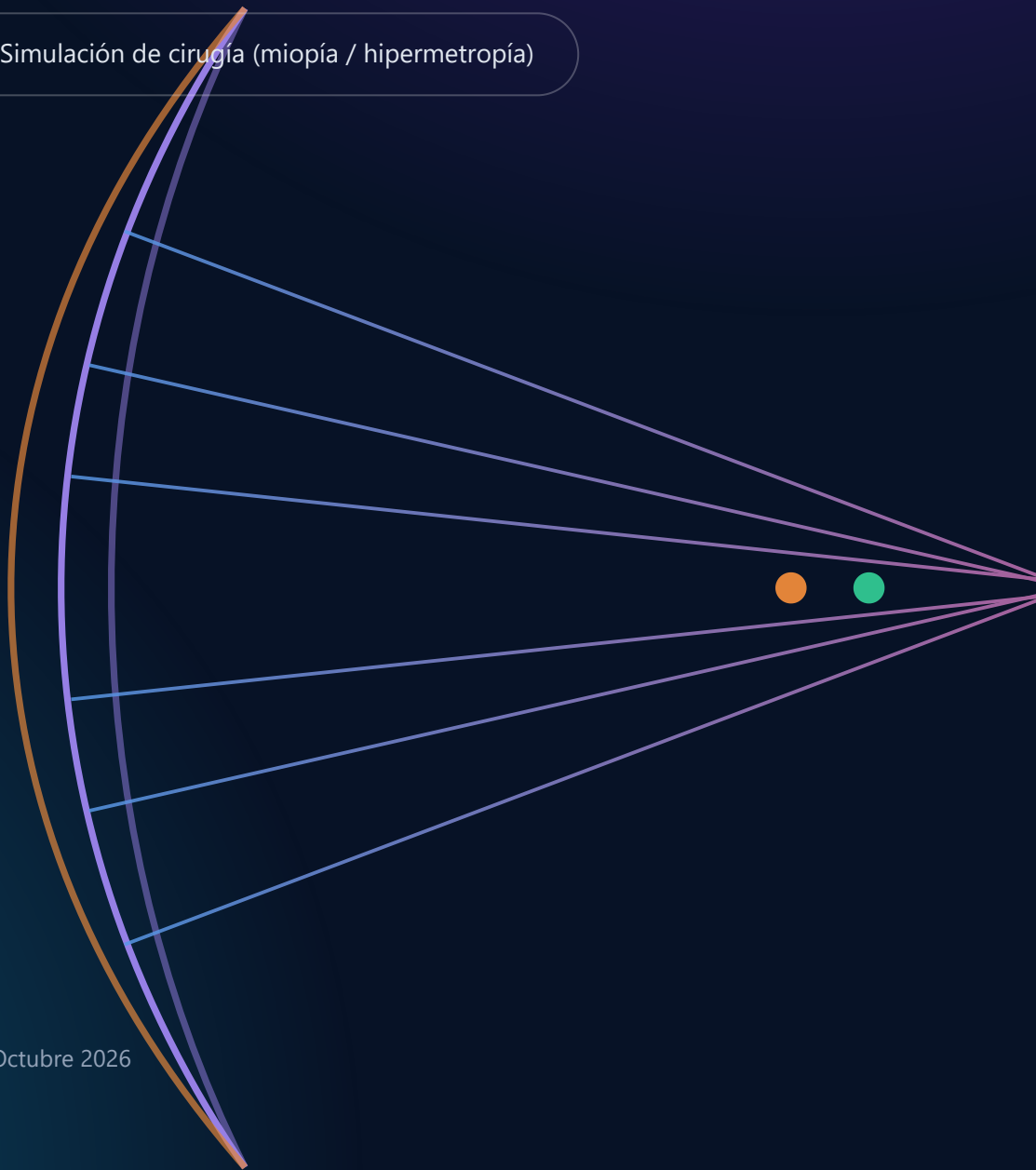


GUÍA DOCENTE · ÓPTICA OFTÁLMICA

Asfericidad **Q** y aberración esférica

Qué son, en qué se diferencian y cómo cambian tras la cirugía refractiva. Manual de uso del simulador interactivo.

Simulador principal · Simulación de cirugía (miopía / hipermetropía)



Contenido

1	La idea clave: forma frente a enfoque	Q ≠ AE
2	La asfericidad Q	qué mide y cómo se interpreta
3	La aberración esférica	positiva, negativa y Z4 ⁰
4	Cómo se relacionan Q y AE	de qué depende la AE
5	Pantalla 1: el simulador	guía de uso y ejercicios
6	Pantalla 2: simulación de cirugía	miopía e hipermetropía
7	Glosario	todos los términos
8	Modelo, limitaciones y referencias	

1 · La idea clave

Con frecuencia se usan como sinónimos, pero **Q** y la **aberración esférica** describen cosas distintas. Toda la herramienta está pensada para que esa diferencia se *vea*.

LA CAUSA

Q = la FORMA

Describe la **geometría** de una superficie: cómo cambia su curvatura del centro a la periferia. Es una propiedad de la superficie, sin luz de por medio y sin unidades.

EL EFECTO

AE = el ENFOQUE

Describe **dónde enfocan los rayos**: si los periféricos enfocan antes o después que los centrales. Depende de la forma, pero también del radio, del índice y de la pupila.

En una frase: la Q nos dice si la superficie es **oblata**, **esférica** o **prolata**; la aberración esférica nos dice si es **positiva** (los rayos periféricos enfocan **por delante** de los centrales) o **negativa** (enfocan **por detrás**).

Una misma Q puede producir mucha o casi nada de aberración esférica según el tamaño de la pupila, y una misma aberración esférica puede venir de formas distintas si cambia el radio o el índice. Cambiar Q *modifica* la AE, pero la AE no es una medida de la forma.

2 · La asfericidad Q

La superficie anterior de la córnea se describe muy bien con una **cónica de revolución**. Su perfil (la *sagita* z , profundidad de la superficie a una distancia r del eje) es:

$$z(r) = r^2 / (R \cdot [1 + \sqrt{1 - (1+Q) \cdot r^2 / R^2}])$$

Solo intervienen dos parámetros:

- **R, radio de vértice** (mm): la curvatura en el centro. Es lo que mide el queratómetro ($K = 337.5 / R$ en dioptrías).
- **Q, asfericidad** (sin unidades): cómo se separa la superficie de una esfera de ese mismo radio al alejarnos del centro.

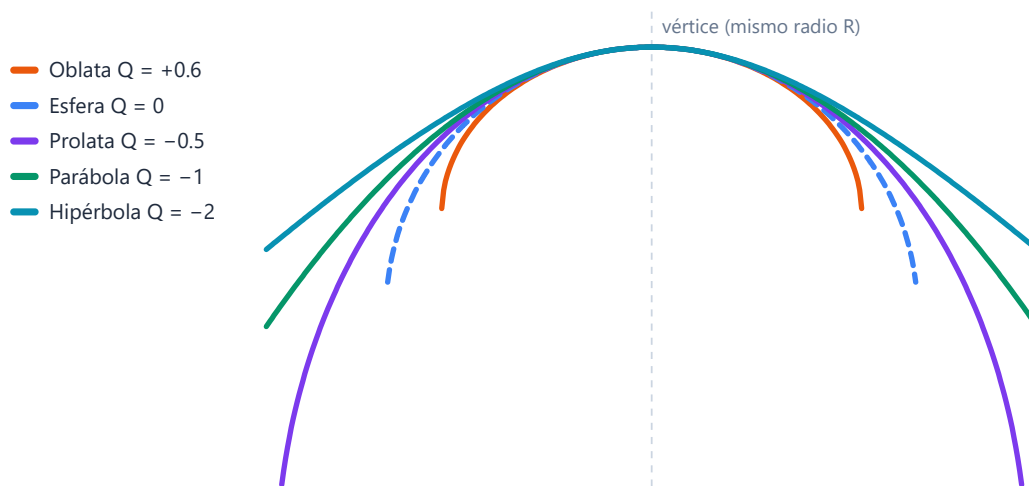


Figura 1. Cinco superficies con el **mismo radio de vértice**: solo cambia Q. En el centro coinciden; la diferencia aparece en la periferia.

Valor de Q	Superficie	Curvatura del centro a la periferia
$Q > 0$	Elipsoide oblató	Aumenta: se curva más hacia la periferia
$Q = 0$	Esfera	Constante
$-1 < Q < 0$	Elipsoide prolato	Disminuye: se aplana hacia la periferia
$Q = -1$	Paraboloide	Se aplana más
$Q < -1$	Hiperboloide	Se aplana todavía más

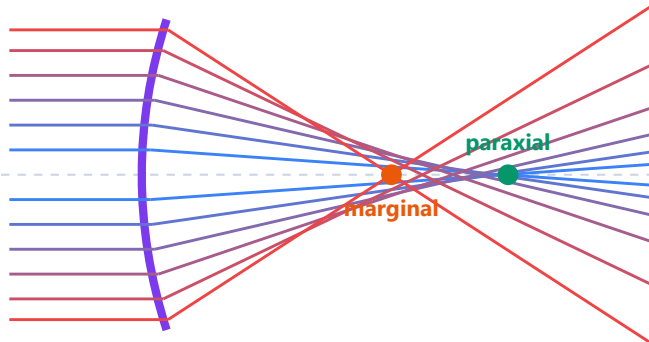
La córnea humana normal es prolata. Su Q media es ≈ -0.26 (desviación típica ± 0.18 ; rango habitual aprox. -0.2 a -0.3). Es más curva en el centro y se aplana hacia el limbo.

Otras notaciones. Q se relaciona con la excentricidad e y el factor de forma p : para un elipsoide prolato $Q = -e^2$, y $p = 1 + Q$. Una córnea con $Q = -0.26$ tiene $p = 0.74$ y $e \approx 0.51$.

3 · La aberración esférica

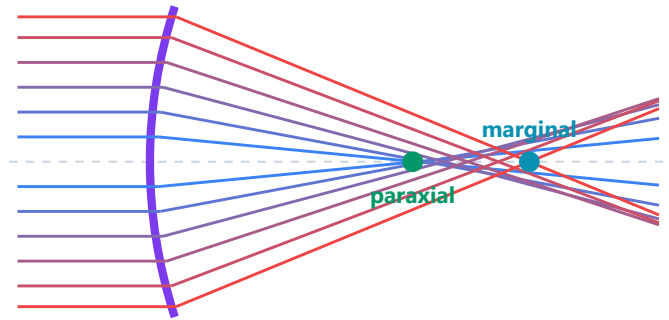
Si una superficie enfocara perfectamente, todos los rayos paralelos al eje se cruzarían en un único punto. En la práctica, los rayos que pasan por la **periferia** de la pupila (rayos **marginales**) no enfocan en el mismo sitio que los que pasan cerca del **centro** (rayos **paraxiales**). Esa diferencia es la **aberración esférica (AE)**.

AE POSITIVA



Los rayos periféricos enfocan **por delante** de los centrales. Es lo que ocurre en una esfera y en la córnea normal.

AE NEGATIVA



Los rayos periféricos enfocan **por detrás** de los centrales. Aparece con superficies muy prolatas o tras cirugía hipermetrópica.

Dos formas de medirla

1. AE longitudinal (mm). Es la distancia entre el foco paraxial y el foco marginal, medida sobre el eje. Es la más intuitiva y es la flecha que dibuja el trazado de rayos de la app ("*separación de focos*"). Su valor depende mucho de la escala del sistema.

2. Coeficiente de Zernike Z_4^0 (μm). Es la forma **clínica**, la que dan topógrafos y aberrómetros. Se calcula a partir del **frente de onda**: la diferencia de camino óptico entre la onda real y una onda esférica perfecta que convergería en el foco paraxial. Esa deformación se descompone en polinomios de Zernike, y el término que corresponde a la aberración esférica es:

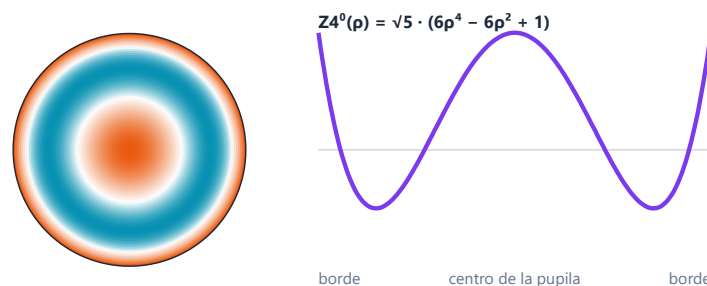


Figura 2. El polinomio Z_4^0 es simétrico en rotación: el centro y el borde de la pupila se adelantan o retrasan respecto a la zona intermedia.

Convención de signo (norma OSA/ANSI): Z_4^0 **positivo** = AE positiva (periféricos por delante). Z_4^0 **negativo** = AE negativa. Un Z_4^0 siempre debe ir acompañado del **diámetro de pupila** para el que se calcula: el valor de referencia habitual es **6 mm**.

Valores de referencia. La AE de la cara anterior de la córnea normal es positiva: en promedio $\approx +0.27 \mu\text{m}$ (pupila de 6 mm). En el ojo joven, el cristalino aporta AE negativa que compensa en parte la de la córnea; con la edad esa compensación se pierde.

¿Por qué importa? La AE positiva aumenta los halos y el deslumbramiento nocturno con pupila grande, pero también da algo de profundidad de foco. Por eso las LIO esféricas se diseñan para aportar AE negativa o neutra.

4 · Cómo se relacionan Q y la AE

La forma de la superficie (Q) es la **causa** principal de la aberración esférica, pero no la única. En aproximación de tercer orden (Seidel), para rayos paralelos que pasan del aire a la córnea:

$$AE \propto (n' - n) \cdot h^4 / R^3 \cdot [(n / n')^2 + Q]$$

De esta expresión se leen cuatro ideas que el simulador permite comprobar:

1. **Q mueve la AE de forma continua.** Cuanto más positiva (oblata), más AE positiva; cuanto más negativa (prolata), menos AE, hasta volverse negativa.
2. **La AE se anula cuando $Q = -(n/n')^2$.** Para la córnea ($n' = 1.376$) eso ocurre en $Q \approx -0.53$, no en el paraboloide ($Q = -1$). El paraboloide anula la AE de un *espejo*, no la de una superficie refractiva.
3. **Depende de la cuarta potencia de la pupila (h^4).** Duplicar el diámetro multiplica la AE por unas 16 veces, **sin que la forma cambie**.
4. **Depende del radio y del índice.** Dos córneas con la misma Q pero distinto R tienen distinta AE.

Q frente a AE — córnea modelo (R = 7.8 mm, $n' = 1.376$, pupila 6 mm)

Q	Superficie	Z_4^0 (frente de onda)	Separación de focos
+0.50	Oblata	+0.76 μm	+2.29 mm
+0.25	Oblata	+0.55 μm	+1.71 mm
0.00	Esfera	+0.36 μm	+1.15 mm
-0.26	Prolata (córnea media)	+0.18 μm	+0.58 mm
-0.53	Prolata (AE = 0)	0.00 μm	0.00 mm
-0.75	Prolata	-0.14 μm	-0.47 mm
-1.00	Parábola	-0.29 μm	-0.99 mm

La misma forma, distinta AE: el efecto de la pupila

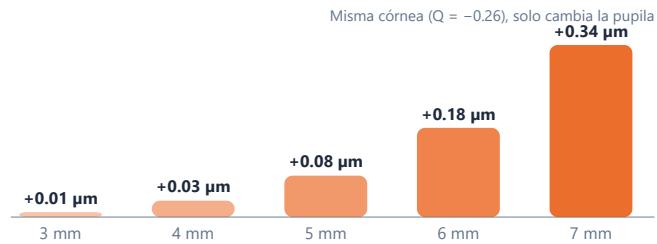


Figura 3. Córnea con $Q = -0.26$ fija. Solo se cambia el diámetro de pupila y la AE crece de forma muy rápida: la forma no ha cambiado.

Nota sobre los valores medios. En un modelo de cónica perfecta, la Q media (-0.26) da $Z_4^0 \approx +0.18 \mu\text{m}$, mientras que el valor clínico medio medido es $\approx +0.27 \mu\text{m}$ (que en el modelo corresponde a $Q \approx -0.13$). La diferencia es razonable: las córneas reales no son cónicas perfectas, Q suele ajustarse sobre zonas de 6–8 mm o más y los valores proceden de poblaciones distintas. Es un buen ejemplo de que **Q y AE no se traducen una en otra de forma directa.**

5 · Pantalla 1: el simulador

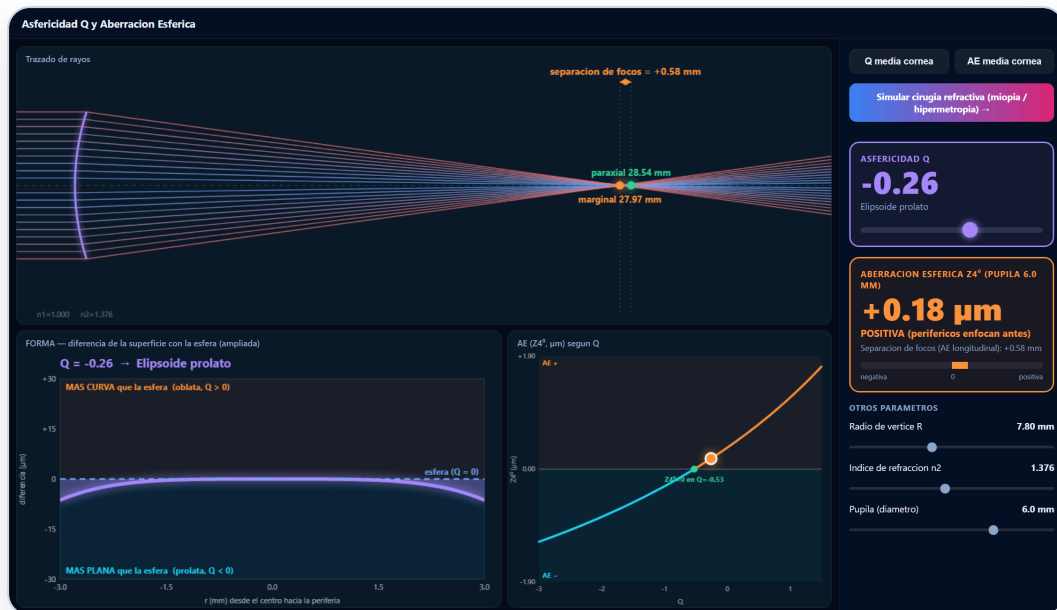
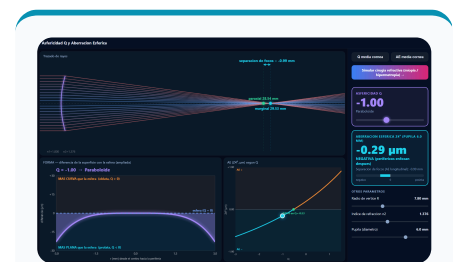
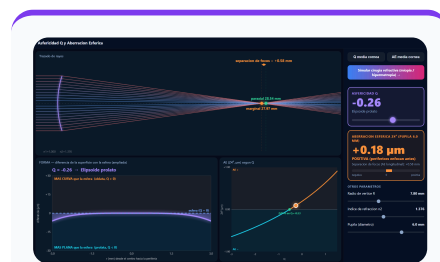
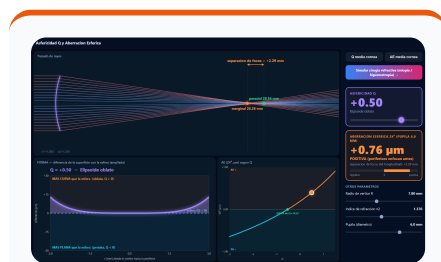


Figura 4. Pantalla principal con la córnea media ($Q = -0.26$, pupila 6 mm).

- 1 Trazado de rayos (arriba).** Rayos paralelos llegan desde la izquierda, se refractan en la superficie (en morado) y convergen. El punto **verde** es el foco paraxial y el **naranja** (o **cian**) el foco marginal. La flecha indica la **separación de focos**: es la AE vista directamente.
- 2 FORMA (abajo izquierda).** Muestra cuánto se separa la superficie de una esfera del mismo radio (línea azul discontinua), en micras y ampliado. Si la curva sube, la superficie es **más curva** que la esfera (oblata); si baja, es **más plana** (prolata). **Esta gráfica solo depende de Q y R**: es la forma.
- 3 AE según Q (abajo derecha).** Curva de referencia de Z_4^0 para todos los valores de Q, con el punto actual y el valor de Q donde la AE es cero.
- 4 Tarjeta Q (morada) y tarjeta AE (naranja o cian).** Los dos valores protagonistas, separados a propósito: la forma y el enfoque. La tarjeta de AE da el Z_4^0 en μm y, debajo, la separación de focos en mm.
- 5 Botones y controles.** *Q media córnea* pone $Q = -0.26$; *AE media córnea* pone una córnea que da $+0.27 \mu m$. El botón degradado abre la simulación de cirugía. Debajo: radio R, índice n2 y diámetro de pupila.



Ejercicios propuestos — Pantalla 1

A. De la esfera a la parábola

Partid de $Q = 0$ y bajad lentamente hasta $Q = -1$. Observad en el trazado de rayos cómo el foco marginal se acerca al paraxial, coincide con él y luego lo adelanta. Anotad el valor de Q donde la AE se hace cero. (Respuesta: ≈ -0.53 .)

B. Misma forma, distinta AE

Pulsad *Q media córnea* y no toquéis Q . Cambiad solo la pupila de 3 a 7 mm. ¿Cambia la gráfica de FORMA? ¿Cambia la AE? (La forma no cambia; la AE pasa de ≈ 0 a $\approx +0.35 \mu\text{m}$.)

C. El radio también cuenta

Con $Q = -0.26$ y pupila de 6 mm, moved R de 7.0 a 8.5 mm. ¿Qué córnea tiene más AE, la curva o la plana? Relacionadlo con el término $1/R^3$.

D. Oblata frente a prolata

Comparad $Q = +0.5$ y $Q = -0.5$. Describid con vuestras palabras la gráfica de FORMA de cada una y el signo de la AE que producen.

Cómo calcula la app

No usa fórmulas aproximadas: **traza rayos reales** aplicando la ley de Snell en la superficie cónica exacta. Para el Z_4^0 , calcula la diferencia de camino óptico de cada rayo respecto a una esfera de referencia centrada en el foco paraxial y proyecta ese frente de onda sobre el polinomio de Zernike Z_4^0 normalizado según la norma OSA. El resultado se ha validado con la fórmula de tercer orden (Seidel) y con el cero teórico en $Q = -1/n'^2$.

6 · Pantalla 2: simulación de cirugía refractiva

Se abre con el botón *Simular cirugía refractiva*. Compara a la vez tres córneas: una **operada de miopía** (izquierda), la **córnea estándar** sin operar (centro) y una **operada de hipermetropía** (derecha). Un único control fija las dioptrías corregidas en ambas cirugías.



Figura 5. Simulación con 3 D corregidas y pupila de 6 mm.

Miopía: se APLANA el centro

El láser retira tejido sobre todo en el centro. El radio central aumenta (K baja) y la periferia queda relativamente más curva: la córnea pasa de prolata a **oblata** (Q sube). Resultado: **más AE positiva**.

Estándar: referencia

R = 7.80 mm, K = 43.27 D, Q = -0.26, Z4° = +0.18 μm. Su foco se marca con una línea discontinua en las otras dos columnas.

Hipermetropía: se ABOMBA el centro

El láser retira tejido en la periferia. El centro queda más curvo (K sube) y la córnea se vuelve **más prolata** (Q más negativa). Resultado: la AE baja y se hace **negativa**.

Qué muestra cada zona

- **Columnas:** K, R, **Q** y **Z4°** de cada córnea, con el cambio respecto a la estándar y su propio trazado de rayos.
- **FORMA (abajo izquierda):** perfil de cada córnea operada comparado con la estándar. La miopía cae en la zona **más plana**; la hipermetropía sube a la zona **más curva**. La escala es fija: al aumentar las dioptrías se ve cómo se separan.
- **Evolución (abajo derecha):** Q (morado) y Z4° (naranja) frente a las dioptrías corregidas: miopía a la izquierda, hipermetropía a la derecha.

Resultados del modelo (pupila de 6 mm)

Corrección						
	K	Q	Z4 ⁰	K	Q	Z4 ⁰
0 D	43.27 D	-0.26	+0.18 μm	43.27 D	-0.26	+0.18 μm
2 D	41.27 D	+0.06	+0.35 μm	45.27 D	-0.66	-0.10 μm
4 D	39.27 D	+0.38	+0.47 μm	47.27 D	-1.06	-0.42 μm
6 D	37.27 D	+0.70	+0.56 μm	49.27 D	-1.46	-0.79 μm

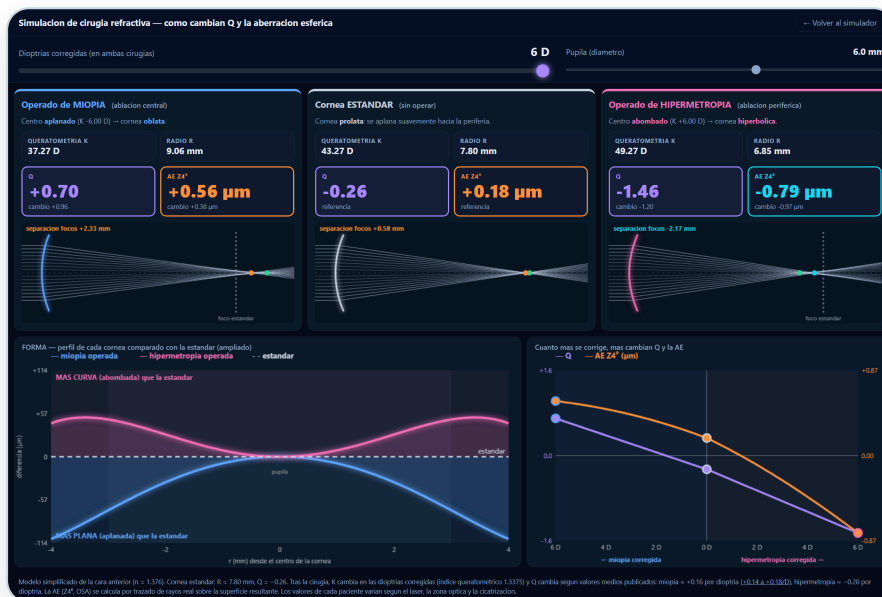


Figura 6. Con 6 D corregidas los cambios son mucho mayores: la córnea miópica operada es claramente oblata y la hipermetrópica, muy prolata con AE negativa.

Consecuencia clínica — miopía. El aumento de AE positiva explica parte de los halos y la pérdida de calidad visual nocturna tras correcciones altas con pupila grande. Los perfiles de ablación “asféricos” u optimizados intentan limitar este cambio.

Consecuencia clínica — hipermetropía. La AE se vuelve negativa. Se debe tener en cuenta, por ejemplo, al elegir la asfericidad de una LIO en una cirugía de catarata posterior.

Ejercicio E. ¿Cuánto cambia por dioptría?

Moved el control de 0 a 6 D. Anotad Q y Z4⁰ de las dos cirugías cada 2 D. ¿Es el cambio igual en las dos? ¿En cuál crece más rápido la AE?

Ejercicio F. Pupila nocturna

Fijad 4 D y comparad pupila de 4 mm y de 7 mm. ¿Qué paciente notará más halos de noche y por qué?

7 · Glosario

Aberración esférica (AE)

Aberración por la que los rayos que atraviesan la periferia de la pupila enfocan en un punto distinto de los que pasan por el centro. Es simétrica en rotación.

AE positiva

Los rayos periféricos (marginales) enfocan **por delante** de los centrales (paraxiales). $Z_4^0 > 0$.

AE negativa

Los rayos periféricos enfocan **por detrás** de los centrales. $Z_4^0 < 0$.

AE longitudinal / separación de focos

Distancia, sobre el eje, entre el foco paraxial y el marginal. En la app: foco paraxial – foco marginal (mm).

Asfericidad (Q)

Parámetro sin unidades que indica cómo se aparta una superficie cónica de una esfera del mismo radio de vértice. $Q = 0$ esfera; $Q > 0$ oblata; $Q < 0$ prolata.

Cónica

Familia de curvas (elipse, parábola, hipérbola) que, al girar sobre el eje, generan las superficies usadas para modelar la córnea.

Excentricidad (e)

Otra forma de expresar la asfericidad. Para un elipsoide prolato $Q = -e^2$.

Factor de forma (p)

$p = 1 + Q$. Usado en algunos topógrafos y textos clásicos.

Foco paraxial

Punto en el que enfocan los rayos muy próximos al eje (centro de la pupila).

Foco marginal

Punto en el que enfocan los rayos que pasan por el borde de la pupila.

Frente de onda

Superficie de igual fase de la luz. Si el sistema fuera perfecto, sería una esfera centrada en el foco; sus desviaciones son las aberraciones.

Índice de refracción (n)

Relación entre la velocidad de la luz en el vacío y en el medio. Córnea ≈ 1.376 ; para la queratometría se usa el índice convencional 1.3375.

Oblata / prolata

Oblata: se curva más hacia la periferia ($Q > 0$). Prolata: se aplana hacia la periferia ($Q < 0$), como la córnea normal.

Polinomios de Zernike

Conjunto de funciones sobre un círculo con el que se descompone el frente de onda. Cada término representa una aberración (desenfoque, astigmatismo, coma, AE...).

Queratometría (K)

Potencia corneal central en dioptrías: $K = 337.5 / R$ (R en mm).

Radio de vértice (R)

Radio de curvatura en el centro de la superficie.

Sagita (z)

Profundidad de la superficie a una distancia r del eje, medida desde el plano tangente al vértice.

Z_4^0

Coefficiente de Zernike de la aberración esférica primaria, en μm , según la norma OSA/ANSI. Siempre se indica junto al diámetro de pupila.

8 · Modelo, limitaciones y referencias

Supuestos del simulador

- Se modela una única superficie refractiva (la cara anterior de la córnea) entre aire ($n = 1.000$) y córnea ($n' = 1.376$). No se incluyen la cara posterior ni el cristalino.
- La superficie es una cónica perfecta. Las córneas reales tienen además irregularidades y asimetrías.
- Cirugía: K cambia exactamente en las dioptrías corregidas (índice 1.3375) y Q cambia con coeficientes medios publicados: **+0.16 por dioptría** en miopía (rango publicado +0.14 a +0.18/D) y **-0.20 por dioptría** en hipermetropía (valor elegido para reproducir el cambio de AE publicado, $\approx -0.19 \mu\text{m/D}$). La AE resultante se calcula por trazado de rayos.
- Cada paciente responde de forma distinta según el láser, el perfil y la zona óptica de ablación y la cicatrización. Los valores son ilustrativos y docentes, no predictivos.

Referencias

1. Kiely PM, Smith G, Carney LG. The mean shape of the human cornea. *Optica Acta*. 1982;29:1027–1040.
2. Wang L, Dai E, Koch DD, Nathoo A. Optical aberrations of the human anterior cornea. *J Cataract Refract Surg*. 2003;29:1514–1521.
3. Holladay JT, Piers PA, Koranyi G, et al. A new intraocular lens design to reduce spherical aberration of pseudophakic eyes. *J Refract Surg*. 2002;18:683–691.
4. Thibos LN, Applegate RA, Schwiegerling JT, Webb R. Standards for reporting the optical aberrations of eyes. *J Refract Surg*. 2002;18:S652–S660.
5. Review of mathematical descriptors of corneal asphericity. pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11965125
6. Corneal asphericity and spherical aberration after refractive surgery. researchgate.net/publication/51150111
7. Changes in corneal asphericity and spherical aberration after femtosecond LASIK. *Delta J Ophthalmol*. 2021. journals.lww.com/djop
8. Corneal spherical aberration and its impact on choosing an intraocular lens for cataract surgery. sciencedirect.com/.../S131945341400071X