



ARTÍCULO ORIGINAL

Aberraciones corneales anteriores y posteriores medidas mediante imágenes de Scheimpflug en el queratocono en niños



Neisy Bernal Reyes^{a,*}, Alejandro Arias Díaz^b y Luis Eduardo Camacho Rangel^c

^a Especialista de I Grado en Medicina General Integral y Oftalmología, Master en Longevidad Satisfactoria, Diplomado en manejo clínico quirúrgico de enfermedades corneales, cirugía refractiva y catarata. Instituto Cubano de Oftalmología (ICO) Ramón Pando Ferrer, La Habana, Cuba

^b Especialista de I Grado en Medicina General Integral y Oftalmología, Diplomado en Oftalmología Pediátrica y Estrabismo, Instituto Cubano de Oftalmología (ICO) Ramón Pando Ferrer, La Habana, Cuba

^c Médico general, Residente de III año de Oftalmología, Instituto Cubano de Oftalmología (ICO) Ramón Pando Ferrer, La Habana, Cuba

Recibido el 13 de octubre de 2014; aceptado el 23 de abril de 2015

Disponible en Internet el 11 de junio de 2015

PALABRAS CLAVE

Queratocono;
Niño;
Aberrometría;
Córnea

Resumen

Objetivo: Establecer la utilidad de las aberraciones anteriores y posteriores en niños para detección del queratocono, mediante imágenes de Scheimpflug con el Pentacam® de Oculus.
Método: Se realizó un estudio retrospectivo comparativo observacional a niños entre 5 y 15 años. Un grupo con córneas sanas y otro con queratocono en estadio 1 y 2. Se estudió: defecto refractivo esférico, defecto cilíndrico, AVMC, queratometría máxima, mínima y media, astigmatismo topográfico y aberraciones anteriores y posteriores. Se aplicó la prueba t de Student no pareada y la prueba de Mann-Whitney cuando no fue posible usar la anterior.

Resultados: En casi todas las aberraciones de la superficie anterior excepto el coma primario y secundario horizontal, existían diferencias significativas entre los grupos. En superficie corneal posterior se hallaron diferencias significativas entre los grupos en: el coma vertical primario, aberración esférica primaria, coma y coma-like RMS. En niños con córneas sanas en superficie posterior se hallaron cifras significativas de coma vertical, aberración esférica, coma y coma-like RMS. Entre la superficie corneal anterior y posterior con queratocono se encontraron diferencias en el coma vertical, coma-RMS y coma-like RMS.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: neisyb@horpf.sld.cu (N. Bernal Reyes).

Conclusiones: Las mediciones de las aberraciones de la superficie anterior medidas por imágenes de Scheimpflug son útiles en la detección precoz de queratocono en niños. Las aberraciones de superficie posterior corneal no son útiles ya que no están acordes a las propiedades ópticas de la córnea.

© 2014 Sociedad Mexicana de Oftalmología. Publicado por Masson Doyma México S.A. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

KEYWORDS

Keratoconus;
Child;
Aberrometry;
Cornea

Anterior and posterior corneal aberrations measurement for Scheimpflug's images in the keratoconus in children

Abstract

Objective: Identify utility of anterior and posterior aberrations in children to differentiate healthy and keratoconus corneas by Scheimpflug imaging with the Oculus Pentacam®.

Method: A retrospective comparative observational study of children between 5 and 15 years was conducted. A group with healthy corneas and another group with keratoconus stage 1 and 2. All patients were examined including Scheimpflug's images. Were studied the following variables: spherical refractive defect, cylindrical defect, BCVA, keratometry maximum, Minimum and medium, topographic astigmatism and anterior and posterior aberrations. Student t-test and unpaired Mann-Whitney test was used.

Results: Almost all aberrations of the anterior surface except the primary and secondary horizontal coma were founded that significant differences between the groups exists. Primary vertical coma, primary spherical aberration, coma and coma-like RMS: posterior corneal surface significant differences between groups were found. In children with healthy corneas was found that in back surface vertical coma, spherical aberration, coma and coma-like RMS frequently. In the keratoconus between the anterior and posterior corneal surface exists significant differences in vertical coma, coma-RMS and coma-like RMS.

Conclusions: The measurements of the aberrations of the anterior surface Scheimpflug imaging measures are useful in early detection of keratoconus in children. The posterior corneal surface aberrations are not useful since they are not in accordance with the optical properties of the cornea.

© 2014 Sociedad Mexicana de Oftalmología. Published by Masson Doyma México S.A. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción

El queratocono es una ectasia corneal caracterizada por el encurvamiento progresivo de la córnea, con disminución de su grosor y sucesivo deterioro visual^{1,2}. Los cambios morfológicos que sufre la córnea con la enfermedad producen astigmatismo irregular, provocando aberraciones cromáticas de alto orden³.

La primera interface ocular (aire-córnea) es el principal factor que contribuye a la refracción total debido a la diferencia que existe en los índices de refracción. Es por esto que la superficie corneal anterior va a ser la fuente más importante de error en el sistema óptico^{4,5}.

Un sistema óptico origina la formación perfecta de una imagen puntual si todos los rayos formadores de imagen coinciden en un único punto. Cuando los rayos salientes correspondientes a un objeto puntual no coinciden en un solo punto estamos en presencia de las aberraciones⁵.

Para describir las aberraciones se ha propuesto un sistema matemático de descomposición de un sistema convencional. Uno de los sistemas propuesto y más utilizado son los Polinomios de Zernike. Los mismos permiten representar funciones bidimensionales⁵⁻⁸.

La tomografía corneal con cámara rotacional utilizando la tecnología de imágenes de Scheimpflug Pentacam® de Oculus adquiere imágenes de la superficie corneal anterior y posterior⁹. El equipo permite el análisis de los polinomios de Zernike de la superficie anterior y posterior basados en las mediciones de los datos de elevación. El software calcula un indicador llamado «coeficiente de aberración», que describe la contribución de cada polinomio al dato de elevación. Este coeficiente es calculado a partir de los coeficientes de Zernike¹⁰.

Las cifras consideradas normales para este coeficiente de aberración son iguales a 0.0. Valores que excedan el 1.0 indican que la superficie corneal contiene componentes atípicos de ondas que pueden causar disminución de la calidad visual. El software también informa de la desviación estándar de los datos desde la medida de elevación hasta el cálculo del dato de elevación¹⁰.

Numerosas investigaciones en adultos con queratocono han demostrado la utilidad de la identificación de aberraciones como herramienta para diagnóstico precoz de queratocono¹¹⁻¹⁴.

Las aberraciones de la superficie anterior corneal más frecuentemente presentadas en pacientes con sospechas o

Tabla 1 Clasificación de queratocono de Amsler-Krumeich modificada según aberrometría (clasificación de Alió y Shabayek)

Estadios	
I	Lectura queratométrica central ≤ 48 D RMS aberración comática entre 1.5 y 2 micras Ausencia de cicatrices
II	Lectura queratométrica central > 48 D y ≤ 53 D RMS aberración comática entre 2.5 y 3.5 micras Ausencia de cicatrices Espesor central mínimo > 400 micras
III	Lectura queratométrica central > 53 D y ≤ 55 D RMS aberración comática entre 3.5 y 4.5 micras Ausencia de cicatrices Espesor central mínimo > 300 y ≤ 400 micras
IV	Lectura queratométrica central > 55 D RMS aberración comática > 4.5 micras Cicatrices corneales centrales Espesor central mínimo 200 micras

con queratocono son: altas cifras de coma vertical, raíz cuadrada media del coma (coma-like RMS). En pacientes con estadios avanzados de la enfermedad se reportan cifras altas de coma-like RMS¹¹⁻¹⁴.

Existen pocas referencias de las aberraciones de la superficie posterior, pero Piñero et al. hallan en su investigación publicada en 2009 en adultos que las aberraciones con diferencias significativas son: aberración esférica primaria, coma vertical primario, coma-RMS, y coma-like RMS¹⁵.

Nuestra investigación se propuso establecer la utilidad de las aberraciones anteriores y posteriores en niños para detección del queratocono, mediante imágenes de Scheimpflug con el Pentacam® de Oculus.

Método

Se realizó un estudio retrospectivo comparativo observacional a 400 ojos de 200 pacientes con edades entre 5 y 15 años que asistieron al Servicio de Córnea de nuestra institución en un periodo de 3 años (enero de 2011 a enero de 2014).

Los mismos se dividieron en 2 grupos, el grupo 1 estuvo constituido por pacientes con córneas sanas, representando el 73.5% de la población en estudio (147 pacientes), y el grupo 2 estuvo constituido por pacientes con diagnóstico de queratocono en estadio 1 y 2 según la clasificación de Queratocono de Alió y Shabayek¹² (tabla 1), representando un 26.5% de la población en estudio (53 pacientes).

Se consideraron ojos con córneas sanas aquellos en los cuales no había antecedentes de enfermedades y/o cirugías oculares, no antecedentes de uso de lentes de contacto,

errores refractivos no significativos que permitían alcanzar una agudeza visual mejor corregida (AVMC) de 1.0 o mejor según la Cartilla de Snellen, y patrones regulares a la topografía corneal. Se consideraron los patrones topográficos descritos por Rabinowitz¹.

Se consideraron ojos con queratocono a la biomicroscopia del segmento anterior aquellos que presentaban uno o más de los siguientes signos: adelgazamiento estromal, protrusión cónica del ápex corneal, anillo de Fleischer, estrías de Vogt y cicatrices estromales anteriores; y en la topografía corneal se consideraron los criterios topográficos de Rabinowitz-McDonnell modificados¹.

A todos los pacientes les fueron realizadas las pruebas de la línea de queratocono que están protocolizadas en nuestra institución, que incluyen: biomicroscopia con lámpara de hendidura, oftalmoscopia directa, agudeza visual sin corrección, AVMC, refracción bajo dilatación con ciclopentolato, queratometría, tensión ocular, topografía corneal con topógrafo Magellan de la Nidek, tomografía corneal con Pentacam® de Oculus, paquimetría, biometría.

Se pidió el consentimiento informado a padres y/o tutores para participar en el estudio, y los que no estuvieron de acuerdo no se incluyeron en la investigación, según la Declaración de Helsinki.

Las variables estudiadas fueron: defecto refractivo esférico, defecto cilíndrico, AVMC y parámetros medibles por el Pentacam®.

Los parámetros medibles por el Pentacam® considerados para superficie anterior y posterior corneales fueron:

K1 = Poder corneal en el meridiano menos curvo en la zona de 3 mm centrales.

K2 = Poder corneal en el meridiano más curvo en la zona de 3 mm centrales.

KM = Poder corneal promedio en la zona de 3 mm centrales.

AST = Cilindro en la zona de 3 mm centrales.

De los polinomios de Zernike (tabla 2) se analizaron los que se han reportado más frecuentes asociados al queratocono en otras publicaciones¹¹⁻¹⁴, los cuales han sido los polinomios centrales, además de que está bien demostrado que las aberraciones esféricas y el coma (centrales), tienen un mayor impacto en la disminución de la agudeza visual¹⁵:

Z3¹ = Coeficiente de Zernike para el coma primario horizontal.

Z3⁻¹ = Coeficiente de Zernike para el coma primario vertical.

Z5¹ = Coeficiente de Zernike para el coma secundario horizontal.

Z5⁻¹ = Coeficiente de Zernike para el coma secundario vertical.

Z4⁰ = Coeficiente de Zernike para aberración primaria esférica.

Z6⁰ = Coeficiente de Zernike para aberración secundaria esférica.

Coma RMS = Raíz cuadrada media calculada para la aberración del coma primario (Z3^{±1})

Coma-like RMS = Raíz cuadrada media calculada para la aberración del coma secundario (Z3^{±1} y Z5^{±1}).

Tabla 2 Polinomios de Zernike hasta el 14.º orden

Término	Representación de coordenadas polares	Representación de coordenadas cartesianas	Significado
$Z_0(x,y)$	1	1	Término constante
$Z_1(x,y)$	$\rho \text{ sen } \theta$	x	Inclinación en la dirección x
$Z_2(x,y)$	$\rho \text{ cos } \theta$	y	Inclinación en la dirección y
$Z_3(x,y)$	$\rho^2 \text{ sen } (2\theta)$	2 xy	Astigmatismo con eje $\pm 45^\circ$
$Z_4(x,y)$	$2 \rho^2 - 1$	$-1+2y^2+ 2x^2$	Desenfoque (miopía e hipermetropía)
$Z_5(x,y)$	$\rho^2 \text{ cos } (2\theta)$	$y^2 -x^2$	Astigmatismo con eje $\pm 90^\circ$
$Z_6(x,y)$	$\rho^3 \text{ sen } (3\theta)$	$3 xy^2-x^3$	
$Z_7(x,y)$	$(3\rho^3-2\rho) \text{ sen } \theta$	$-2x+3xy^2+ 3x^3$	Coma de 3.º orden en el eje de la x
$Z_8(x,y)$	$(3\rho^3-2\rho) \text{ cos } \theta$	$-2y+3x^2+ 3x^2y$	Coma de 3.º orden en el eje de la y
$Z_9(x,y)$	$\rho^3 \text{ cos } (3\theta)$	y^3-3x^2y	
$Z_{10}(x,y)$	$\rho^4 \text{ sen } (4\theta)$	$4y^3x-4x^3y$	
$Z_{11}(x,y)$	$(4\rho^4-3\rho^2) \text{ sen } (2\theta)$	$-6xy+8y^3x+8x^3y$	
$Z_{12}(x,y)$	$6\rho^4-6\rho^2+$	$1-6y^2-6x^2+6y^4+12x^2y^2-6x^4$	Aberración esférica de 3.º orden
$Z_{13}(x,y)$	$(4\rho^4-3\rho^2) \text{ cos } (2\theta)$	$-3y^2+3x^2+4y^4-4x^2y^2-4x^4$	
$Z_{14}(x,y)$	$\rho^4 \text{ cos } (4\theta)$	$y^4- 6x^2y^2 + x^4$	

Todos los coeficientes de Zernike y las raíces cuadradas medias fueron calculados con diámetros pupilares de 6 mm.

La cámara rotacional utilizando la tecnología de imágenes de Scheimpflug Pentacam® de Oculus obtiene en menos de 2 s imágenes tridimensionales de alta resolución del segmento anterior del ojo. Una segunda cámara corrige cualquier movimiento del ojo detectado durante el proceso. El equipo calcula un modelo tridimensional del segmento anterior del ojo a partir de los 25,000 puntos de elevación real del ojo examinado. Las imágenes de Scheimpflug tomadas son digitalizadas en la unidad central y transferidas a un ordenador. Al finalizar la captura, el software calcula un modelo virtual en 3 dimensiones del segmento anterior del ojo a partir del cual se genera toda la información adicional. El programa realiza automáticamente la conversión de los datos de elevación en datos de frente de ondas, utilizando los polinomios de Zernike hasta el 10.º orden¹⁰.

En la investigación todas las imágenes se tomaron con el modo de alineación en OK. A todos los pacientes se les indicaba parpadear 2 veces y luego fijar la mirada. El examinador, una vez lograda la adecuada alineación, presionaba el botón de capturar. Todas las imágenes se centraron en el centro de la pupila. La versión del software utilizado por el equipo fue la 6.02r10¹⁰.

En nuestro estudio todos los coeficientes de Zernike y las raíces cuadradas medias fueron calculados con diámetros pupilares de 6 mm debido a que está bien demostrado que las aberraciones varían con el tamaño del diámetro pupilar⁶. Investigaciones que intentan estandarizar la descripción de los patrones de frente de onda en el ojo, han descrito que la distribución de los tamaños pupilares en una población es una curva sinusoidal con una media de 5.86 \pm 0.9 mm⁷.

Se confeccionó una base de datos en sistema Microsoft Access y con los resultados obtenidos se realizaron tablas. Se aplicó la prueba t de Student no pareada y la prueba de Mann-Whitney cuando no fue posible usar la primera para la comparación entre grupos. Se consideró estadísticamente

significativo cuando la $p < 0.05$. Se utilizó el paquete estadístico SPSS versión 19.

Resultados

La media (M) de edad para todo el estudio fue de 10.22 años \pm 2.08 desviaciones estándar (DE). En pacientes con queratocono la media de edad fue de 12.77 años \pm 3.07 DE (tabla 3).

La media del equivalente esférico para córneas normales fue de -1.16 ± 0.48 DE (rango [R] -1.25 a -2.75); y para córneas con queratocono fue de -4.12 ± 2.98 DE (R = -2 a -6.25) existiendo diferencias significativas entre las cifras ($p = 0.000$, Mann-Whitney) (fig. 1).

La media del equivalente cilíndrico para córneas normales fue de -1.25 ± 0.35 DE (R = -0.5 a -3.5), y para córneas con queratocono fue de -3.70 ± 2.53 DE (R = -1.50 a -6) existiendo diferencias significativas entre las cifras ($p < 0.05$, Mann-Whitney) (fig. 2).

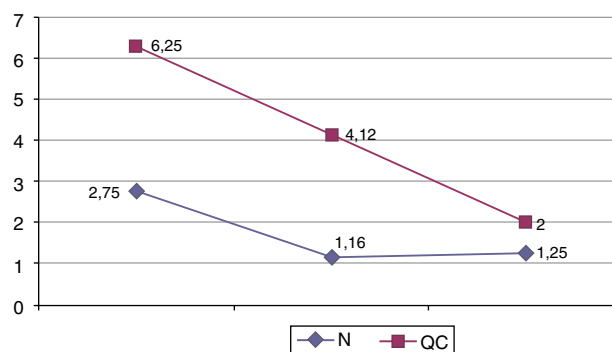


Figura 1 Equivalente esférico. QC: queratocono; N: normales.

Fuente: base de datos.

Tabla 3 Distribución de pacientes según diagnóstico y edad

Parámetros	Córneas sanas	Queratocono
Edad M ± DE	10.22 ± 2.08	12.77 ± 3.07
Edad (rango)	5-15	9-15
Número de pacientes	147	53
Porcentaje de pacientes	73.5%	26.5%

DE: desviación estándar; M: media.

El análisis de los valores de AVMC media en córneas normales fue de 1 ± 0.2 DE (R=0.6 a 1.2) y para córneas con queratocono fue de 0.6 ± 0.28 DE (R=0.4 a 0.8) existiendo diferencias significativas entre las mismas. ($p=0.001$, Mann-Whitney) (fig. 3).

Al comparar las medias de los datos de curvatura en la superficie anterior, las diferencias entre los valores para córneas sanas y con queratocono en niños fueron significativas para todos los parámetros analizados. Para K1 ($p=0.0022$, Mann-Witney), K2 ($p=0.0012$, t de Student), KM ($p=0.0018$, t de Student), AST ($p=0.0030$, Mann-Witney) (tabla 4).

En la superficie posterior, los datos de curvatura igualmente resultaron estadísticamente significativos al comparar córneas normales y con queratocono en niños.

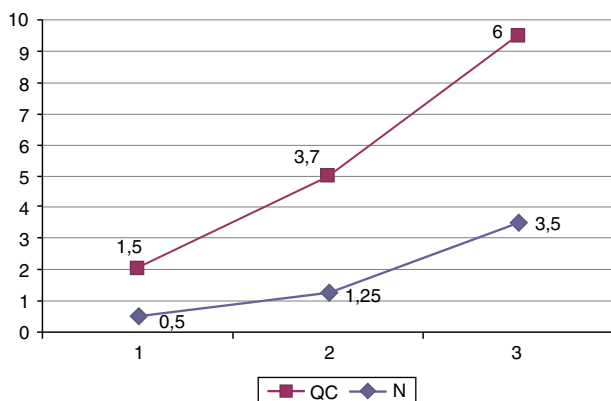


Figura 2 Equivalente cilíndrico refractivo. QC: queratocono; N: normales.

Fuente: base de datos.

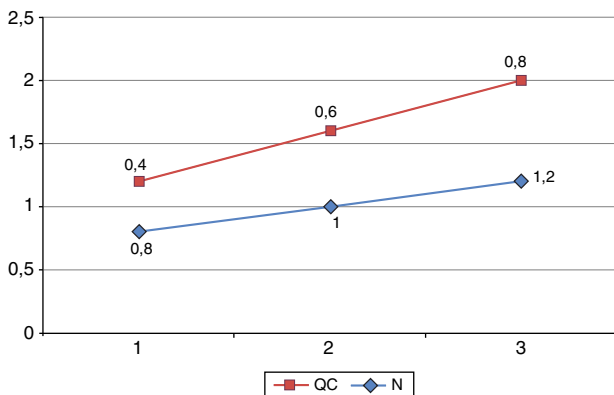


Figura 3 Agudeza visual mejor corregida. QC: queratocono; N: normales.

Fuente: base de datos.

Para K1 ($p=0.0019$, t de Student), K2 ($p=0.0016$, t de Student), KM ($p=0.0015$, t de Student), AST ($p=0.0027$, t de Student) (tabla 4).

En cuanto al análisis de las aberraciones, resultó que en casi todas las aberraciones de la superficie anterior ($p < 0.05$, t de Student) excepto en el coma primario y secundario horizontal ($p > 0.05$, t de Student) existían diferencias significativas entre los grupos (tabla 5).

En la superficie corneal posterior se hallaron diferencias significativas entre los grupos: el coma vertical primario, aberración esférica primaria, coma y coma-like RMS ($p < 0.01$, t de Student) (tabla 5).

En los pacientes con córneas sanas en superficie posterior se halló cifras significativas de coma vertical, aberración esférica, coma y coma-like RMS ($p < 0,01$, t de Student) (tabla 5).

Al analizar las diferencias entre superficie corneal anterior y posterior en niños con queratocono se hallaron diferencias en el coma vertical, coma RMS y coma-like RMS. ($p = <0.01$, t de Student) (tabla 5).

Discusión

El análisis aberrométrico del frente de ondas del ojo nos permite una evaluación más completa de la calidad del sistema óptico⁶. Existen diferentes métodos para evaluar el mismo basándose en: aberrometría de frente de onda saliente, aberrometría de frente de onda entrante, aberrometría de doble paso y aberrometría de retroalimentación¹⁶⁻²².

El sistema de imágenes de Scheimpflug mide los datos de elevación real en 25,000 puntos de la superficie corneal anterior y posterior, y el sistema lo convierte en datos de frente de onda automáticamente¹⁰.

Al realizar el análisis del equivalente esférico entre córneas sanas y con queratocono se obtuvo una diferencia significativa entre los grupos, siendo similar a lo descrito por otros autores, como Piñero et al.¹⁵ para los cuales la media de equivalente esférico para córneas sanas fue de -1.89 ± 2.36 dioptrías(D) y en córneas con la enfermedad fue de -3.07 ± 3.42 D.

Se hallaron cifras significativamente altas de cilindro en los pacientes con queratocono, con respecto a los normales, como se ha reportado en la literatura por múltiples autores^{15,23-26}. Piñero et al.¹⁵ en su estudio en adultos reporta en pacientes normales una media de 0.27 ± 0.62 D, y en pacientes con queratocono de -4.52 ± 2.44 D; al compararlo con el presente estudio las cifras son muy similares, ligeramente menor en la media de los pacientes con queratocono.

La AVMC es uno de los parámetros que nos sirven para diferenciar córneas sanas de córneas con queratocono,

Tabla 4 Datos de curvatura en superficie anterior y posterior corneal

Datos de curvatura		Normales		Queratocono	
		Anterior	Posterior	Anterior	Posterior
K1	M ± DE	42.25 ± 0.28	-5.03 ± 0.22	45.95 ± 1.69	-5.58 ± 0.52
	Rango	42.0-46.6	-5.1 a -5.25	44.6-49.6	-6.30 a -5.40
K2	M ± DE	43.7 ± 0.70	-5.39 ± 0.27	49.95 ± 1.63	-6.40 ± 0.70
	Rango	43.3-45.6	-5.10 a -6.10	47.2- 53.1	-7.40 a -5.70
KM	M ± DE	44.85 ± 0.21	-6.25 ± 0.29	47.4 ± 1.41	-7.07 ± 0.49
	Rango	43.5- 46.25	-6.80 a -5.70	45.4-53.35	-6.97 a -5.55
AST	M ± DE	1.05 ± 1.06	0.47 ± 0.15	4.1 ± 1.97	1.18 ± 0.38
	Rango	0.6-3.02	0.20-0.60	1.75-6.5	0.50-1.80

K1: queratometría en el meridiano más plano.

K2: queratometría en el meridiano más curvo.

KM: queratometría media.

AST: astigmatismo por tomografía.

Fuente: Base de datos.

numerosos trabajos lo han demostrado, como el de Piñero et al.²⁷ en su estudio realizado específicamente sobre volumen corneal, paquimetría y correlación con la forma corneal anterior y posterior en el que queratocono subclínico y diferentes grados de queratocono, en el cual obtienen diferencias significativas en la AVMC entre los grupos, logrando una media para córneas normales de 1.12 ± 0.10 DE, para queratocono grado 1 de 0.80 ± 0.19 DE y para queratocono grado 2, de 0.44 ± 0.20 DE. El comportamiento de la AVMC en nuestro estudio halló diferencias significativas entre los grupos, al igual que en otros estudios publicados por diferentes autores^{15,23-26}.

La media de poder corneal para superficie anterior y posterior con el sistema de imágenes de Scheimpflug reportada en córneas sanas y con queratocono en nuestro estudio fue muy similar a otras investigaciones realizadas en adultos, como la de Piñero et al.¹⁵ en la cual para pacientes con córneas sanas la media del poder corneal para superficie

anterior fue de $43,51 \pm 1,78$ (R=40.70 a 46.60), para superficie posterior fue de -6.32 ± 0.32 (R=-6,90 a -5,80), en córneas con queratocono la media del poder corneal anterior fue de 47.81 ± 2.33 (R=44.80 a 52.40), y para superficie corneal posterior fue de -7.13 ± 0.56 (R=-7.90 a -5.90). Estos datos coincide también con otros estudios como los de Shankar et al.²³ Chen y Lam²⁴ y Dubbelman et al.²⁵.

La repetibilidad para la queratometría mediante esta tecnología ha sido demostrada por varios autores en investigaciones en superficie corneal anterior como la de Shankar et al.²³, la cual reporta para la queratometría media anterior un coeficiente de repetibilidad = ± 0.28 D, con una repetibilidad relativa = 0.64%; y para la posterior un coeficiente de repetibilidad = ± 0.11 D y una repetibilidad relativa = 1.85%. Para superficie posterior también ha sido demostrada la repetibilidad con esta técnica en trabajos como los de Chen y Lam²⁴, Dubbelman et al.²⁵ y Piñero et al.²⁶.

Tabla 5 Aberraciones de superficie anterior y posterior corneales

Aberraciones	Normales		Queratocono	
	Anterior	Posterior	Anterior	Posterior
Z3 ¹	-0.001 ± 0.123	0.021 ± 0.243	0.144 ± 1.155	0.021 ± 2.217
Z3 ⁻¹	0.001 ± 0.211	0.305 ± 0.357 -	1.737 ± 0.943 -	3.661 ± 1.791
Z5 ¹	-0.005 ± 0.018	0.030 ± 0.087	0.019 ± 0.166	0.038 ± 0.399
Z5 ⁻¹	-0.003 ± 0.034	0.052 ± 0.136	0.191 ± 0.312	0.366 ± 0.615
Z4 ⁰	0.510 ± 0.077	1.107 ± 0.326	0.004 ± 0.785	0.198 ± 2.108
Z6 ⁰	-0.009 ± 0.013	-0.027 ± 0.032	0.070 ± 0.157	0.072 ± 0.298
Coma RMS	0.215 ± 0.97	0.431 ± 0.311	2.138 ± 0.821	4.249 ± 1.795
Coma-like RMS	0.218 ± 0.99	0.476 ± 0.298	2.181 ± 0.789	4.334 ± 1.749

Z3¹ = coeficiente de Zernike para el Coma Primario Horizontal.

Z3⁻¹ = coeficiente de Zernike para el coma primario vertical.

Z5¹ = coeficiente de Zernike para el coma secundario horizontal.

Z5⁻¹ = coeficiente de Zernike para el coma secundario vertical.

Z4⁰ = coeficiente de Zernike para aberración primaria esférica.

Z6⁰ = coeficiente de Zernike para aberración secundaria esférica.

Coma RMS = raíz Cuadrada Media calculada para la aberración del coma primario (Z3^{±1}).

Coma-like-RMS = raíz cuadrada media calculada para la aberración del coma secundario (Z3^{±1} y Z5^{±1}).

Fuente: Base de datos.

Muchas publicaciones han demostrado la utilidad de la aberrometría en el diagnóstico de queratocono en adultos, mediante topógrafos y aberrómetros según los principios descritos anteriormente, reportándose en superficie corneal anterior como más frecuentes el coma vertical y el coma-like RMS¹¹⁻¹⁴.

En nuestra serie de casos se reportaron diferencias estadísticamente significativas para todas las aberraciones en superficie corneal anterior y posterior cuando se comparan córneas sanas y con queratocono ($p < 0.03$), siendo similar a lo notificado por Piñero et al.¹⁵ en su trabajo, el cual obtiene una $p < 0.02$, con la prueba t de Student no pareada para todas las aberraciones. Shankar et al.²³ en sus investigaciones también reporta diferencias significativas ($p < 0.001$) en todas las aberraciones analizadas entre córneas sanas y con queratocono, excepto en los polinomios de 9.º y 10.º orden.

Las aberraciones más frecuentes observadas en córneas con queratocono en niños en este estudio fueron: el coma vertical primario y secundario, coma-RMS y coma-like RMS, coincidiendo con las aberraciones informadas como más frecuentes en queratocono con otros autores^{11,23-27} y con el artículo de Piñero et al. en adultos¹⁵.

Las aberraciones de la superficie corneal posterior no han sido ampliamente analizadas como las de superficie anterior, debido a las limitaciones de los aberrómetros que existían anteriores al surgimiento de equipos que permiten el análisis de la superficie posterior corneal¹⁵.

En la superficie corneal posterior se hallaron en córneas normales y con queratocono aberraciones mayores que en la superficie corneal anterior según las cifras medidas por imágenes de Scheimpflug con el Pentacam®, datos que coinciden con lo notificado por Piñero et al.¹⁵, los cuales obtienen una $p < 0.01$, según la prueba t de Student no pareada, siendo no congruente esto con las propiedades ópticas de la córnea.

La zona óptica esta conformada por los 3 mm centrales de la córnea, la cual es casi esférica, con un radio de curvatura entre 7.5 y 8.0 mm. La superficie corneal posterior es casi esférica y su radio de curvatura es aproximadamente de 6.8 mm. Se describe el poder de refracción de la superficie anterior de la córnea de +48 D, y el de la superficie posterior de -5.8 D²⁸. Ambas superficies (anterior y posterior) de la córnea contribuyen a la función óptica. El índice de refracción total de la córnea es el resultado de la suma de las refracciones en esta 2 interfaces así como de las propiedades de transmisión del tejido. El poder refractivo de una superficie curva está determinado por el índice de refracción y el radio de curvatura. El poder refractivo de la córnea central promedio es alrededor de +43 D, el cual proviene de la suma de las interfaces: aire-lágrima (+44 D), lágrima-córnea (+5 D) y córnea-humor acuoso (-6 D). El índice de refracción del aire es de 1.000, de las lágrimas es de 1.336, del tejido corneal 1.376 y del acuoso es 1.336²⁶. El índice de refracción de la superficie anterior corneal es de 1.376, aunque se utiliza un índice de refracción de 1.3375 en los queratómetros para combinar el poder óptico de la curvatura anterior y posterior corneal²⁹.

Según las propiedades ópticas de la córnea, debido a las diferencias entre los índices de refracción entre aire y superficie anterior y entre humor acuoso y superficie posterior, la refracción de la superficie posterior debe ser aproximadamente 1/14 de la refracción de la superficie anterior³⁰, por

lo que las aberraciones de la superficie posterior deben ser menores que las de la superficie anterior, aun cuando tengan mayor irregularidad en su superficie¹⁵. Piñero et al. sugieren como teoría que este cálculo se debe a que probablemente el software del Pentacam® asume la diferencia entre los índices de refracción para la superficie anterior, como la misma para la superficie posterior, originando errores al calcular las aberraciones posteriores¹⁵. Otra circunstancia que justifica el cálculo erróneo son los signos opuestos en las superficies, ya que la superficie anterior es convergente y la posterior divergente; por lo que ellos estiman que las aberraciones en superficie posterior medidas no están acordes con los valores reales, por limitaciones en la tecnología, por lo que no deben considerarse aún en la evaluación de las diferencias entre córneas sanas y enfermas¹⁵.

Estudios que investigan la repetibilidad intraobservador e inter-observadores de las mediciones de aberraciones en superficie anterior corneal mediante imágenes de Scheimpflug con Pentacam® en córneas con queratocono, hallaron una pobre fiabilidad de las mismas³¹. La repetibilidad de las mediciones de aberrometría en superficie posterior con Pentacam® ha sido validada en córneas sanas solamente por Piñero et al.²⁶.

Los estudios de Shankar et al.³⁰ y el de Piñero et al.²⁶ sobre repetibilidad concluyen que los polinomios de Zernike no son adecuados para describir las aberraciones de frente de onda medidas por imágenes de Scheimpflug mediante Pentacam® debido a la alta variabilidad encontrada intraobservador e interobservadores, sobre todo cuando existen anomalías en la superficie corneal como en el queratocono y córneas sometidas a cirugías refractivas de superficie. La desalineación se propone como otro factor que influye, aunque la obtención de las imágenes por el equipo lleva solo 2 s, se considera suficiente para afectar la variabilidad^{26,33}.

Montalbán et al.³² demostraron recientemente la repetibilidad intrasujetos de las mediciones de la curvatura anterior y posterior corneal, del factor de forma, diámetro corneal blanco a blanco, la paquimetría central, la paquimetría en el punto más delgado y la profundidad de la cámara anterior, pero con el nuevo sistema topográfico que combina las imágenes de Scheimpflug con la tecnología de discos de Plácido, el topógrafo Sirius Scheimpflug-Plácido (Costruzione Strumenti Oftalmici)³².

Bayhan et al.³³ en su publicación informan de la repetibilidad intraexaminador de alta a moderada de las mediciones de las aberraciones de superficie anterior corneal en ojos normales y con queratocono, y una moderada repetibilidad para las aberraciones de superficie posterior corneal, pero también con el topógrafo Sirius Scheimpflug-Plácido.

Conclusiones

Las mediciones de las aberraciones de la superficie anterior medidas por imágenes de Scheimpflug son útiles en la detección precoz de queratocono en niños. Las aberraciones más frecuentes observadas fueron: el coma vertical primario y secundario, coma-RMS y coma-like RMS.

Las aberraciones de superficie posterior corneal no son útiles en la detección de queratocono en niños ya que los resultados hallados no son congruentes con las propiedades ópticas de la córnea.

Recomendaciones

Se necesitan estudios que hallen descriptores matemáticos adecuados para la aberrometría corneal mediante imágenes de Scheimpflug medidas por Pentacam® e investigaciones que validen la repetibilidad de estas mediciones para que se consideren útiles en la detección de queratocono.

Responsabilidades éticas

Protección de personas y animales. Los autores declaran que los procedimientos seguidos se conformaron a las normas éticas del comité de experimentación humana responsable y de acuerdo con la Asociación Médica Mundial y la Declaración de Helsinki.

Confidencialidad de los datos. Los autores declaran que han seguido los protocolos de su centro de trabajo sobre la publicación de datos de pacientes

Derecho a la privacidad y consentimiento informado. Los autores han obtenido el consentimiento informado de los pacientes y/o sujetos referidos en el artículo. Este documento obra en poder del autor de correspondencia.

Financiamiento

Los autores no recibieron patrocinio para llevar a cabo este artículo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

- Rabinowitz Y. Definición, etiología y diagnóstico de queratocono. En: Alió JL, editor. Tratamiento del astigmatismo irregular y del queratocono. Ciudad Panamá: Highlights of ophthalmology internacional; 2004. p. 241–60.
- Ambrosio R. El uso de la topografía en el diagnóstico de las patologías corneales. En: Boyd BF, editor. «Wawefront analysis», aberrómetros y topografía corneal. Ciudad Panamá: Highlights of ophthalmology internacional; 2003. p. 117–30.
- Smoleck MK, Boxer Wachler BS. Corneal topography. En: Boxer Wachler BS, editor. Modern management of keratoconus. New Delhi: Jaypee; 2008. p. 35–61.
- Applegate RA, Hilmantel G, Howland HC, et al. Corneal first surface optical aberrations and visual performance. *J Refract Surg.* 2000;16:507–14.
- Haman H. Las aberraciones y su impacto en la calidad de la visión. En: Boyd BF, Agarwal A, editores. «Wawefront analysis», aberrómetros y topografía corneal. Ciudad Panamá: Highlights of ophthalmology internacional; 2003. p. 191–214.
- Alió JL, Montes-Micó R. Aberrometría en astigmatismo irregular. En: Boyd BF, Agarwal A, editores. «Wawefront analysis», aberrómetros y topografía corneal. Ciudad Panamá: Highlights of ophthalmology internacional; 2003. p. 369–74.
- Ambrosio RJ, Caldas DL, Netto MV, et al. Tecnología de frente de ondas y ablaciones personalizadas. En: Boyd S, Gutiérrez AM, McCulley JP, editores. Atlas y texto de patología y cirugía corneal. Ciudad Panamá: Jaypee-Highlights Medical Publishers, Inc; 2011. p. 339–60.
- Carvalho LA, Castro JC, Chamón W, et al. Entendiendo las aberraciones ópticas del ojo y los principios de su medición. En: Boyd BF, Agarwal A, editores. «Wawefront analysis», aberrómetros y topografía corneal. Ciudad Panamá: Highlights of ophthalmology internacional; 2003. p. 244–62.
- Belin MW, Ambrosio R, Steinmuller A. The brains behind the bad. Simplifying pre-operative keratoconus screening. *Ophthalmology Times Europe.* 2009 [consultado 2 Sep 2014]. Disponible en: <http://www.oteurope.com/ophthalmologytimeseurope/Cornea/The-brains-behind-the-BAD/ArticleStandard/Article/detail/626901>
- Oculus. Pentacam®. Instruction manual. Measurement and evaluation system for the anterior eye segment [consultado 2 Sep 2014]. Disponible en: <http://www.iom.es/manual-pentacam.pdf>.
- Bühren J, Kühne C, Kohlen T. Defining subclinical keratoconus using corneal first surface higher-order aberrations. *Am J Ophthalmol.* 2007;143:381–9.
- Alió JL, Shabayek MH. Corneal higher order aberrations: A method to grade keratoconus. *J Refract Surg.* 2006;22:539–45.
- Gobbe M, Guillon M. Corneal wavefront aberration measurements to detect keratoconus patients. *Cont Lens Anterior Eye.* 2005;28:57–66.
- Barbero S, Marcos S, Merayo-Llodes J, et al. Validation of the estimation of corneal aberrations from videokeratography in keratoconus. *J Refract Surg.* 2002;18:263–70.
- Piñero DP, Alió JL, Alesón A, et al. Pentacam posterior and anterior corneal aberrations in normal and keratoconic eyes. *Clin Exp Optom.* 2009;92:297–303.
- Liang J, Grimm B, Goelz S, et al. Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor. *J Opt Soc Am A.* 1994;11:1949–57.
- Howland B, Howland HC. Subjective measurement of high-order aberrations of the eye. *Science.* 1976;193:580–2.
- Mrochen M, Kaemmerer M, Mierdel P, et al. Principles of Tscher-ning aberrometry. *J Refract Surg.* 2000;16:S570–1.
- Molebny VV, Panagopoulou SI, Molebny SV, et al. Principles of ray tracing aberrometry. *J Refract Surg.* 2000;16:S572–5.
- Burns SA. The spatially resolved refractometer. *J Refract Surg.* 2000;16:S566–9.
- MacRae S, Fujieda M. Slit skiascopic-guided ablation using the Nidek laser. *J Refract Surg.* 2000;16:S576–80.
- Krueger RR. Requerimientos tecnológicos para la ablación corneal personalizada. En: Boyd BF, Agarwal A, editores. «Wawefront analysis», aberrómetros y topografía corneal. Ciudad Panamá: Highlights of ophthalmology internacional; 2003. p. 353–66.
- Shankar H, Taranath D, Santhirathelagan CT, et al. Anterior segment biometry with the Pentacam: Comprehensive assessment of repeatability of automated measurements. *J Cataract Refract Surg.* 2008;34:103–13.
- Chen D, Lam AKC. Intrasession and intersession repeatability of the Pentacam system on posterior corneal assessment in the normal human eye. *J Cataract Refract Surg.* 2007;33:448–54.
- Dubbelman M, Weeber HA, van der Heijde RG, et al. Radius and asphericity of the posterior corneal surface determined by corrected Scheimpflug photography. *Act Ophthalmol Scand.* 2002;80:379–83.
- Piñero DP, Saenz C, Alió JL. Intraobserver and interobserver repeatability of curvature and aberrometric measurements of the posterior corneal surface in normal eyes using the Pentacam system. *J Cataract Refract Surg.* 2009;35:113–20.
- Piñero DP, Alió JL, Alesón A, et al. Corneal volume, pachymetry, and correlation of anterior and posterior corneal shape in sub-clinical and different stages of clinical keratoconus. *J Cataract Refract Surg.* 2010;36:814–25.

28. Arffa RC. Grayson. *Enfermedades de la córnea*. 3th ed Madrid: Harcourt Grace; 1999.
29. Nishida T. *Cornea*. En: Krachmer JH, Mannis MJ, Holland EJ, editores. *Cornea*. 3th ed. Philadelphia: Elsevier Mosby; 2011. p. 3–26.
30. American Academy of Ophthalmology. *Cornea and external disease*. USA. American Academy of Ophthalmology. Basics and Clinical Science Course. 2011.
31. Shankar H, Taranath D, Santhirathelagan CT, et al. Repeatability of corneal first-surface wavefront aberrations measured with Pentacam corneal topography. *J Cataract Refract Surg*. 2008;34:727–34.
32. Montalbán R, Alió JL, Javaloy J, et al. Intrasubject repeatability in keratoconus-eye measurements obtained with a new Scheimpflug photography-based system. *J Cataract Refract Surg*. 2013;39:211–8.
33. Bayhan HA, Bayhan SA, Muhafız E, et al. Repeatability of aberrometric measurements in normal and keratoconus eyes using a new Scheimpflug–Placido topographer. *J Cataract Refract Surg*. 2014;40:269–75.