



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Estudio de la relación entre Aberraciones Oculares y Acomodación

Autora

Ester Soldevilla Foj

Directores

Isabel Pinilla Lozano
Francisco Javier Segura Calvo

Facultad de Ciencias
Grado en Óptica y Optometría
Curso 2013-2014

ÍNDICE

1.	Introducción	1
2.	Hipótesis	4
3.	Objetivos	4
	3.1. Primario	4
	3.2. Secundarios	4
4.	Material y Métodos	5
	4.1. Población de estudio y protocolo de medida	5
	4.2. Aberrómetro (i-Trace)	6
	4.3. Autorrefractómetro (WAM 5500)	8
	4.4. Análisis estadístico	10
5.	Resultados	11
6.	Discusión	15
7.	Caso especial. Inflexibilidad Acomodativa	17
8.	Conclusiones	21
9.	Bibliografía	22

RESUMEN:

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es establecer si existe alguna relación entre las aberraciones oculares y la acomodación. Para ello se analizará una muestra de sujetos no presbíta mediante pruebas de aberrometría, refracción y medida de las fluctuaciones acomodativas. Finalmente, se presentará un análisis de los resultados globales obtenidos y se compararán con la bibliografía existente sobre el tema.

1. INTRODUCCIÓN

La acomodación es el proceso por el cual el poder refractivo del cristalino, y por extensión del ojo como sistema óptico, aumenta por la contracción de los músculos ciliares. Este proceso, que permite a un sujeto sano no presbíta enfocar en fóvea la imagen de un objeto cercano, también está relacionado con el enfoque de la imagen en visión lejana. Por tanto, la acomodación es una acción neuromuscular que contrae el músculo ciliar para aumentar la potencia del cristalino y su respuesta depende de factores como la edad, el tamaño del objeto y la distancia de observación¹.

El frente de onda se define como una superficie imaginaria que une todos los puntos del espacio que son alcanzados en un mismo instante de tiempo por una onda propagada en un medio. Cuando un sistema óptico es perfecto (Figura 1), los frentes de ondas correspondientes a los haces de luz originados en cada uno de los puntos de un objeto son esféricos.

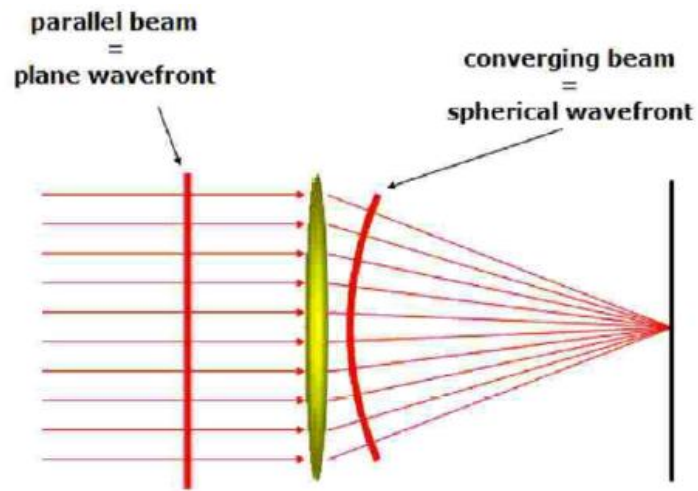


Figura 1. Frente de onda plano (izquierda) y esférico (derecha).

Sin embargo, se conoce que los medios oculares no son perfectamente esféricos o asféricos. El frente de onda medido en ojos humanos es irregular respecto al patrón de desviación del frente de onda ideal, debido a la diferente potencia óptica en cada punto durante la medida. Estas desviaciones entre el frente de onda real y el ideal es lo que se conoce como aberraciones. En 1934, Flitz Zernike publicó un artículo describiendo una serie de polinomios². Los coeficientes de Zernike son un conjunto de polinomios que forman una base ortogonal, de forma que cualquier frente de onda se puede descomponer en un conjunto de estos polinomios (también llamados modos de Zernike) con determinados coeficientes (Figura 2). Cada modo representa un tipo particular de aberración.

$$W(\rho, \theta) = \sum C_n^m Z_n^m(\rho, \theta)$$

Aberración de onda Coeficiente de Zernike Polinomio o modo de Zernike

Figura 2. Ecuación de los polinomios de Zernike.

En la Figura 3 se muestra un gráfico con los modos o polinomios de Zernike hasta 4º orden:

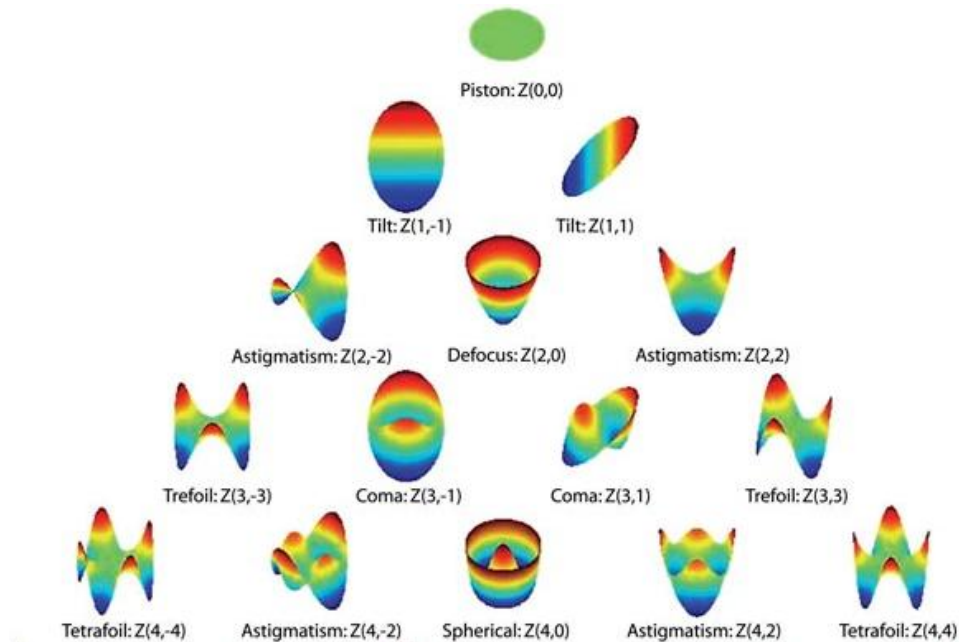


Figura 3. Polinomios de Zernike hasta 4º orden.

Se puede expresar la aberración total como una suma de los diferentes tipos de contribuciones (Figura 4), es decir, podemos descomponer cualquier frente de onda en una combinación de aberraciones específicas (polinomios de Zernike o modos de Zernike).

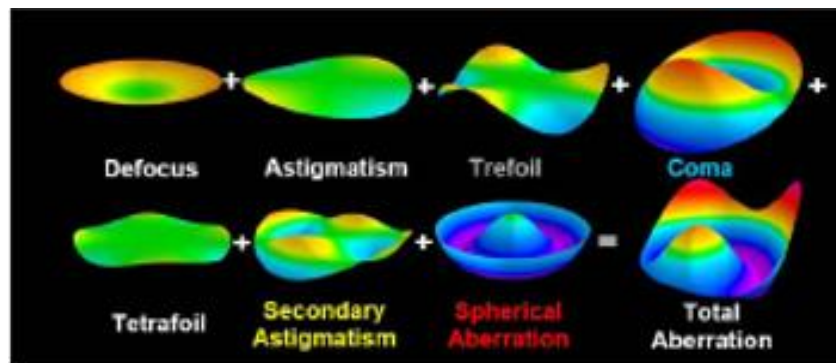


Figura 4. Aberración total como suma de diferentes tipos de contribuciones.

Los modos de Zernike se pueden agrupar por orden. Los de segundo orden incluyen el desenfoque esférico (relacionado con la miopía o hipermetropía) y astigmatismo (dos

modos), que son las llamadas aberraciones de bajo orden. Las aberraciones de tercer orden y superiores se denominan aberraciones de alto orden. Los coeficientes de aberración de Zernike dependen del tamaño de la pupila del sistema.

El RMS (*Root Mean Square*) total es una medida de la desviación total del frente de onda ideal que se obtiene calculando la raíz cuadrada de la suma de cada coeficiente de Zernike al cuadrado. De manera que, si el frente de onda medido es igual que el frente de onda ideal, entonces el error RMS es cero. Existen muchas técnicas para medir el frente de onda pero este trabajo se centra en la aberrometría por trazado de rayos³.

2. HIPOTESIS

Existe una relación entre las aberraciones oculares y la acomodación de cada individuo.

3. OBJETIVOS

3.1. PRIMARIO:

Analizar la relación existente entre las aberraciones oculares y acomodación en un grupo de sujetos no presbítas.

3.2. SECUNDARIOS:

- 3.2.1. Estudiar individuos no presbítas mediante una serie de pruebas como aberrometría, refracción y medida de las fluctuaciones acomodativas.
- 3.2.2. Comparar los valores de aberración en visión lejana y próxima y estudiar cuáles están más presentes.
- 3.2.3. Comparar los valores de la muestra con un caso especial diagnosticado de inflexibilidad acomodativa.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1. Población de estudio y protocolo de medida

Se estudió a un total de 38 personas, 8 varones y 30 mujeres, adultos jóvenes, sin antecedentes de patología ocular o sistémica. Se les midió ambos ojos de forma individual (un total de 76 ojos). La edad de los sujetos estaba comprendida entre 21 y 26 años, con una media de 22,76 años.

Los sujetos incluidos en el estudio tenían que cumplir los siguientes criterios de inclusión/exclusión:

- No antecedentes de ambliopía, estrabismo o astigmatismo alto (superior 3 D).
- No antecedentes de anomalías de la visión binocular significativas que requieran terapia de la visión.
- No antecedentes de lesiones importantes de la córnea.
- Personas no presbitas.

Las medidas se realizaron secuencialmente en un periodo de dos semanas y media, distribuyendo a los sujetos en grupos de cuatro a seis personas, y citándoles indistintamente por la mañana o por la tarde de tal manera que a cada uno se le realizaran todas las medidas necesarias en una misma tarde o mañana.

La toma de medidas de los distintos parámetros oculares se realizó mediante dos instrumentos: un aberrómetro ocular (i-Trace, Tracey Technologies) para la medida de las aberraciones y un autorrefractómetro (WAM-5500, Grand Seiko) para conocer el estado refractivo de los pacientes así como las fluctuaciones en la acomodación.

Todas las medidas se realizaron bajo las siguientes condiciones:

- Luz ambiente que permita obtener una pupila mayor de 4 mm de diámetro.
- Toma de medidas monocular (uso de parche).
- Distancia en visión lejana (VL): 6 m.
- Distancia en visión próxima (VP): 50 cm, con un optotipo de letras negras sobre fondo blanco.

Con el aberrómetro se midieron las aberraciones oculares de cada paciente tanto en visión lejana (VL) como en visión próxima (VP) de forma monocular (uso de parche oclisor) y bajo condiciones de iluminación ambiental que permitiesen obtener una pupila de 4 mm (los resultados fueron analizados con este diámetro). Si la pupila no alcanzaba el diámetro mínimo, se atenuaron las condiciones de iluminación para lograrlo. Para la medida en VP se usó un optotipo acomodativo (letras negras sobre fondo blanco) a 50 cm que los sujetos debieron mantener nítido durante la realización de la prueba. Para VL la distancia fue de 6 m y el sujeto debía mirar a través de una ventana situada al fondo del gabinete. Se realizaron seis medidas en cada ojo, tres en VL y las otras tres en VP.

Con el autorrefractómetro se midieron la refracción y las fluctuaciones de acomodación.

La refracción de los sujetos se midió tanto en VL (6 m) como en VP (50 cm). El optotipo de VP es el mismo que el que se usó para la medida de las aberraciones. En VL las condiciones de iluminación y el punto de fijación de mirada del paciente son los mismos que para el instrumento anterior, así como la secuencia de medidas (seis medidas en cada ojo de manera monocular, tres para VL y otras tres para VP). Una vez obtenidos los valores de esfera, cilindro y eje se calculó la media de estos datos.

Para la medida de las fluctuaciones con el autorrefractómetro, es necesario conectar el autorrefractómetro a un ordenador que dispone de un software adecuado que calcula la variación del equivalente esférico durante un periodo de tiempo determinado (30 segundos). Se realizaron dos medidas por ojo (VL y VP). Las condiciones de medida son las mismas que para los instrumentos anteriores.

4.2. Aberrómetro (i-Trace)

El aberrómetro i-Trace (Tracey Technologies)³ proyecta un haz de luz infrarroja a través de la pupila de entrada del ojo paralelo a su eje visual (Figura 5). La localización en la que el rayo impacta en la retina se obtiene mediante la captura de la luz dispersada y focalizándola en una matriz de detectores lineales.

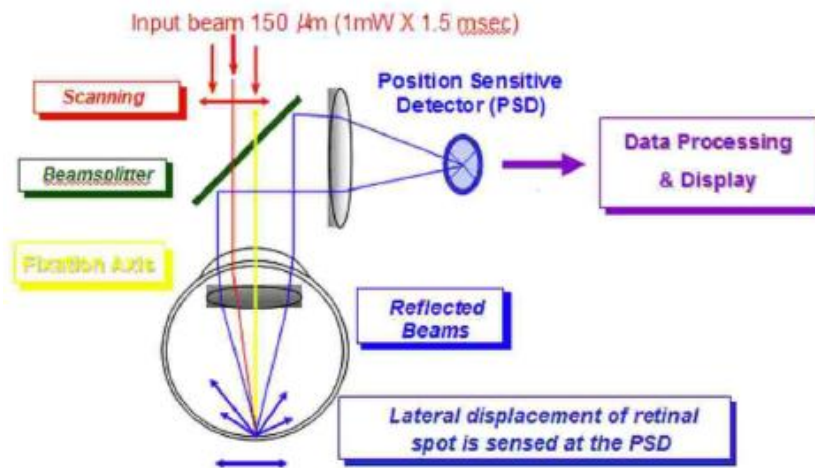


Figura 5. Esquema de la técnica del aberrómetro.

Una vez se determina la posición del primer punto, el haz láser se mueve a una nueva posición y determina la posición de este nuevo punto en la retina. Este proceso continúa hasta que un total de 256 puntos separados una cierta distancia son proyectados a través de la pupila de entrada. Si el ojo fuera emétrope y libre de aberraciones, los 256 puntos se proyectarían en el centro de la mácula. Generalmente, las aberraciones propias de la córnea junto con las de los medios oculares internos, hacen que se produzca una desviación en la trayectoria de cada rayo cuando pasa a través del ojo, causando un cambio en su localización en la retina.

Cuando se proyecta una serie de puntos secuencialmente a través de la pupila de entrada, el software del aberrómetro crea una simulación de un diagrama de impactos en la retina (Figura 6).

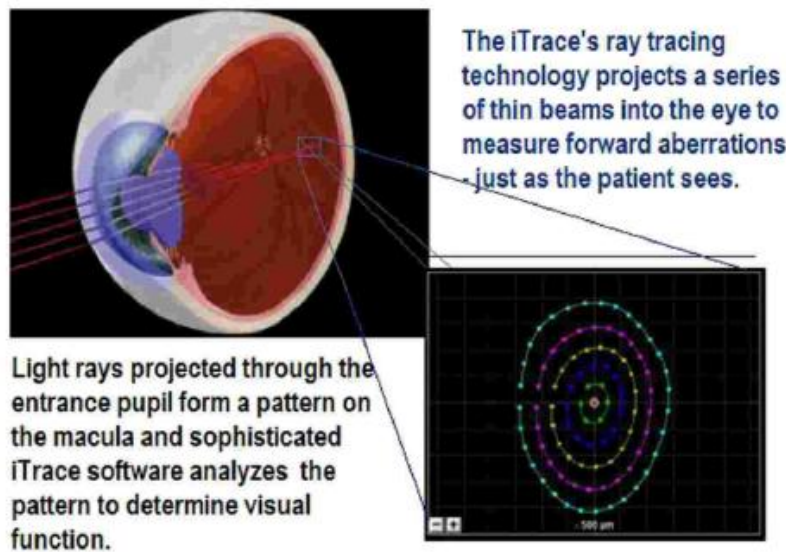


Figura 6. Diagrama de impactos en retina.

La aberrometría por trazado de rayos tiene las siguientes ventajas sobre otras tecnologías: captura de los datos secuencial, por tanto no hay confusión en el análisis; los impactos proyectados se controlan a través de un software, por lo que el sistema puede rastrear el tamaño de la pupila y proyectar los 256 puntos en pupilas de 2 a 8 mm; además, cada punto es medido por separado usando un detector lineal que permite que localizar el centro de cada punto sea más preciso³.

Con el aberrómetro, se obtuvieron resultados de los polinomios de Zernike tanto para VL (6 m) como para VP (50 cm).

4.3. Autorefractómetro (WAM 5500)

El autorefractómetro WAM 5500 (Grand Seiko)^{4,5} es un refractómetro de campo abierto (Figura 7) que nos permite medir el estado refractivo del ojo, la queratometría o la fluctuación de la acomodación.

El WAM 5500 calcula el error refractivo en dos pasos: en un primer paso, se proyectan tres arcos de luz infrarroja sobre la retina. En un segundo paso, la luz procedente de la reflexión retiniana pasa a través de un optómetro de Badal, que se mueve rápidamente para focalizar la imagen. La posición final del Badal permite al software automático del dispositivo determinar la refracción del ojo.



Figura 7. Autorrefractómetro WAM 5500.

El instrumento puede obtener medidas estáticas del error refractivo en un rango de $\pm 22,0$ D esféricas y $\pm 10,0$ D de cilindro en pasos de 0,01 D y 1° de eje del cilindro. La distancia al vértice se puede cambiar (de 0 – 10 – 12 – 13,5 – 15 – 16,5 mm) al igual que el descentramiento del instrumento con $\pm 0,50$ D. Se pueden tomar hasta 45 prescripciones estáticas en 1 minuto. El análisis de la imagen se produce en 0,15 segundos.

La curvatura de la córnea se calcula por el análisis del anillo de luz infrarroja reflejado por la córnea, con el diámetro medido en tres meridianos separados por 60° . Los datos queratométricos se expresan en radios de curvatura (rango de 5,0 a 10,0 mm) o en su poder dióptrico correspondiente (rango de 33,75 a 67,50 D) en pasos de 0,01 mm o 0,12/0,25 D y 1° para el eje del cilindro.

Los datos de refracción se muestran en una pantalla LCD incorporada en el frontal del instrumento, que proporciona además una imagen de la pupila del sujeto, lo que nos permite una correcta alineación pupila-instrumento. Por otro lado, se puede medir simultáneamente la refracción y el diámetro pupilar.

Conectando el aparato a un ordenador y utilizando el software WCS-1, se pueden tomar medidas del equivalente esférico (desenfoque + astigmatismo/2) y del diámetro pupilar del ojo a una frecuencia de 5 Hz.

En este trabajo, el autorrefractómetro se utilizó, tanto en VL (6 m) como en VP (50 cm), para medir la refracción y las fluctuaciones acomodativas de los sujetos.

4.4. Análisis estadístico

Los datos obtenidos de la realización de las diferentes pruebas se introdujeron en una hoja de cálculo de una base de datos Microsoft Office Excel.

Los cálculos estadísticos adecuados para cada tipo de variable se realizaron mediante el paquete estadístico SPSS 11.0.1 para Windows. Se aplicaron los siguientes test estadísticos en cada una de las variables obtenidas:

- Para la descripción de las características poblacionales se emplearon la media y desviación estándar.
- Para la comparación de variables cuantitativas de dos grupos dependientes se utilizaron test no paramétricos para dos muestras pareadas, que permiten comparar las diferencias entre ambos grupos sin necesidad de que se trate de muestras Gaussianas. Para ello se utilizará el test de Wilcoxon, cuya hipótesis nula es que las medias de ambas muestras son las mismas. Un nivel de $p < 0,05$ será considerado estadísticamente significativo.

5. RESULTADOS

Se estudió a un total de 38 personas, 8 varones y 30 mujeres. La media de edad fue de 22,76 años (en un rango de 21 a 26 años), el error refractivo esférico medio para VL fue de $-0,97 \pm 2,07$ D con un rango de (-10,52 a 2,20 D), y el error refractivo cilíndrico medio para VL fue de $-0,62 \pm 0,49$ D (con un rango de -0,05 a -2,38 D).

En la Tabla 1 se muestran los valores medios y desviación estándar de las aberraciones oculares, refracción, fluctuación acomodativa y diámetro pupilar, obtenidos tanto para VL como para VP.

	VISIÓN LEJANA		VISIÓN PRÓXIMA	
	Media	Desviación (\pm)	Media	Desviación (\pm)
RMS Total (μm)	1,029	1,093	1,349	0,984
RMS Alto Orden (μm)	0,103	0,037	0,104	0,049
RMS Bajo Orden (μm)	1,016	1,100	1,344	0,985
Desenfoque (μm)	0,828	1,200	1,284	0,990
RMS Astigmatismo (μm)	0,270	0,212	0,289	0,254
RMS Coma (μm)	0,061	0,039	0,062	0,045
RMS Trefoil (μm)	0,056	0,029	0,058	0,035
Esférica (μm)	0,025	0,025	0,017	0,026
Coma Vertical (μm)	-0,024	0,054	-0,016	0,053
Coma Horizontal (μm)	0,014	0,040	0,013	0,051
Trefoil Y (μm)	0,027	0,043	0,034	0,047
Trefoil X (μm)	-0,010	0,036	-0,008	0,036
Tetrafoil Y (μm)	0,002	0,018	0,001	0,019
Astigmatismo Oblicuo (μm)	0,002	0,012	-0,002	0,012
Astigmatismo HV (μm)	-0,002	0,017	0,000	0,022
Tetrafoil X (μm)	0,005	0,017	0,004	0,018
Refracción Esfera (D)	-0,97	2,06	-1,79	1,75
Refracción Cilindro (D)	-0,62	0,49	-0,64	0,49
Fluctuación Acomodativa (D)	0,58	0,21	0,66	0,38
Diámetro Pupilar (mm)	5,8	0,9	5,7	1,0

Tabla 1. Valores medios y desviación estándar de las aberraciones oculares, refracción, fluctuación acomodativa y diámetro pupilar.

En las Figuras 8 y 9 se representan los resultados promedio en VL y VP de RMS, aberraciones de 3º y 4º orden y fluctuación acomodativa.

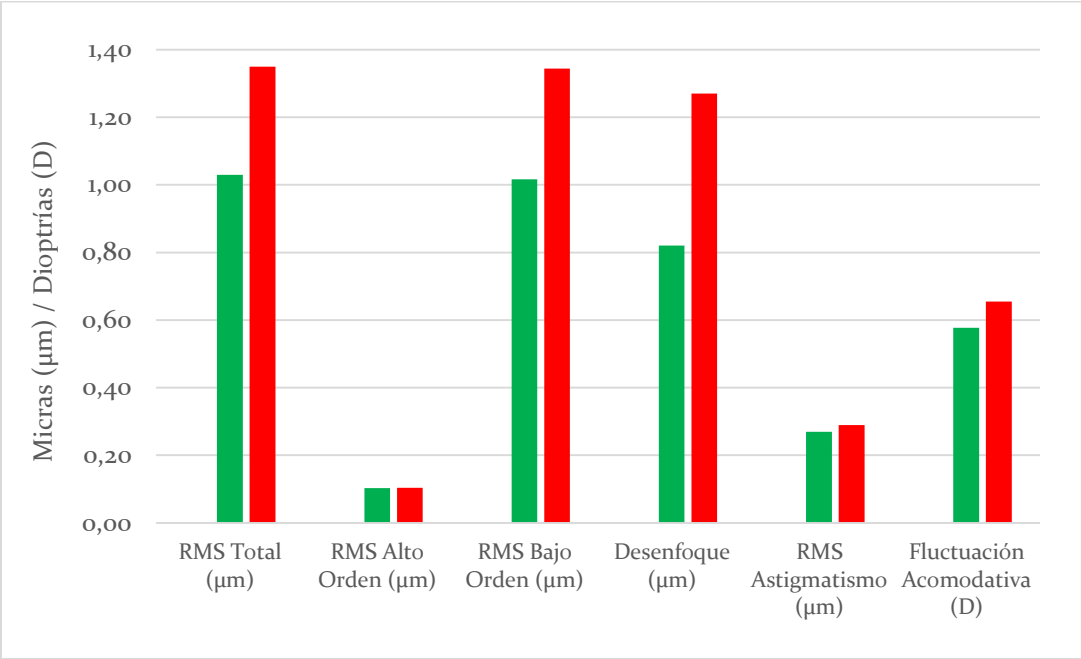


Figura 8. Valores medios de RMS total, RMS alto orden, RMS bajo orden, Desenfoque, RMS astigmatismo y fluctuación acomodativa. Verde, VL; Rojo, VP.

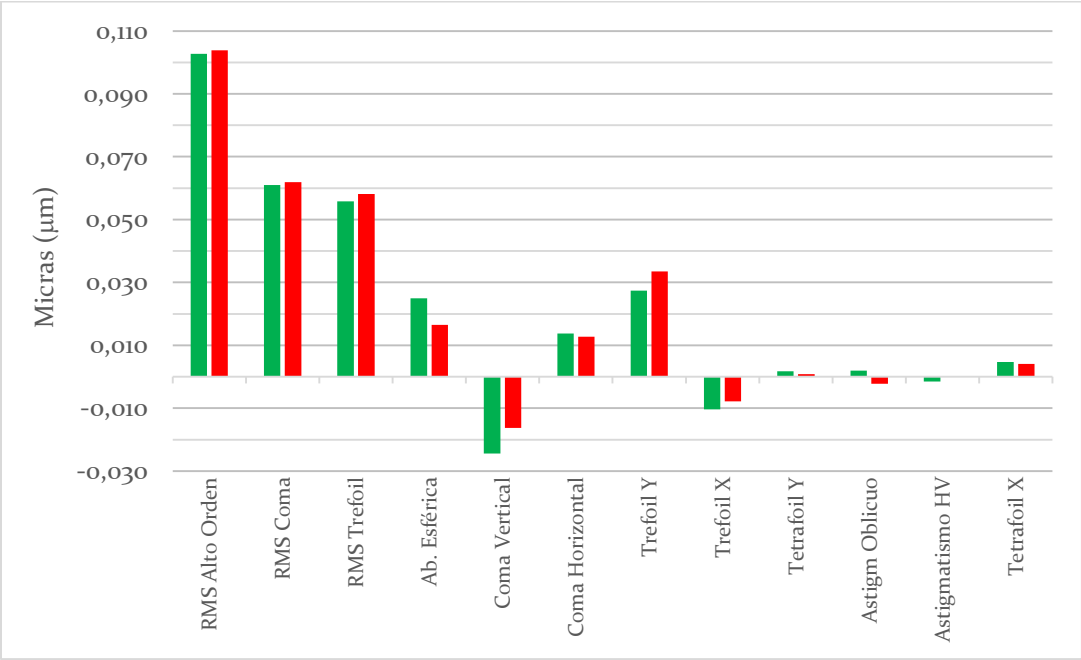


Figura 9. Valores medios de RMS alto orden, RMS coma, RMS trefoil y aberraciones de 3º y 4º orden. Verde, VL; Rojo, VP.

La Tabla 1 muestra que el RMS total, RMS de bajo orden y el desenfoque son mayores en VP que en VL tomando valores de $1,349 \pm 0,984 \mu\text{m}$, $1,344 \pm 0,985 \mu\text{m}$ y $1,284 \pm 0,990 \mu\text{m}$ en VP y $1,029 \pm 1,093 \mu\text{m}$, $1,016 \pm 1,100 \mu\text{m}$ y $0,828 \pm 1,200 \mu\text{m}$ en VL, respectivamente. El RMS del astigmatismo varía muy ligeramente: $0,289 \pm 0,254 \mu\text{m}$ en VP frente a $0,270 \pm 0,212 \mu\text{m}$ en VL.

En cuanto a los valores de RMS de coma y trefoil, se encontró que eran muy similares en lejos ($0,061 \pm 0,039 \mu\text{m}$ y $0,056 \pm 0,029 \mu\text{m}$) y en cerca ($0,062 \pm 0,045 \mu\text{m}$ y $0,058 \pm 0,035 \mu\text{m}$). El RMS de alto orden también se mantuvo estable: $0,104 \pm 0,049 \mu\text{m}$ en VP frente a $0,103 \pm 0,037 \mu\text{m}$ en VL.

En el caso de aberración esférica y coma vertical, se encontró que el valor era mayor en VL ($0,025 \pm 0,025 \mu\text{m}$ y $-0,024 \pm 0,054 \mu\text{m}$) que en VP ($0,017 \pm 0,026 \mu\text{m}$ y $-0,016 \pm 0,053 \mu\text{m}$). Sin embargo, el trefoil Y aumentó su valor medio en VP: $0,034 \pm 0,047 \mu\text{m}$ frente a $0,027 \pm 0,043 \mu\text{m}$ en VL.

En cuanto a la fluctuación acomodativa, se observó un aumento medio en visión cercana ($0,66 \pm 0,38 \text{ D}$) respecto a la VL ($0,58 \pm 0,21 \text{ D}$).

En el resto de parámetros no se observan grandes diferencias en valor promedio.

En la Tabla 2 se muestra la relación entre los resultados obtenidos en VL y VP de las aberraciones oculares, refracción, fluctuación acomodativa y diámetro pupilar. Se consideraron estadísticamente significativos aquellos valores de $p < 0,05$.

	p		p
RMS Total	0,000	Trefoil Y	0,291
RMS Alto Orden	0,626	Trefoil X	0,942
RMS Bajo Orden	0,000	Tetrafoil Y	0,488
Desenfoque	0,000	Astigmatismo Oblicuo	0,015
RMS Astigmatismo	0,988	Astigmatismo HV	0,612
RMS Coma	0,808	Tetrafoil X	0,413
RMS Trefoil	0,832	Refracción Esfera	0,000
Esférica	0,000	Refracción Cilindro	0,223
Coma Vertical	0,008	Fluctuación Acomodativa	0,006
Coma Horizontal	0,296	Diámetro Pupilar	0,047

Tabla 2. Valor del coeficiente p para cada uno de los parámetros estudiados. Los valores que alcanzaron significación estadística aparecen en rojo.

Se obtuvieron valores significativos de RMS Total, RMS de bajo orden, desenfoque y refracción esférica debido a la diferencia de refracción que se produce en la acomodación de los sujetos. Por tanto, los valores que dependen del desenfoque fueron estadísticamente significativos.

Teniendo en cuenta que un valor estadísticamente significativo es aquel cuya $p < 0,05$, se obtuvieron resultados de aberración esférica, coma vertical, astigmatismo oblicuo, fluctuación acomodativa y diámetro pupilar estadísticamente significativos.

Se obtuvieron resultados menores de aberración esférica cuando el sujeto fue examinado en VP en 56 de los 76 ojos.

En la mayoría de los casos (49 de los 76 ojos) se obtuvo un coma vertical menor (en valor absoluto) en VP que en VL.

En el caso del astigmatismo oblicuo, la tendencia que se obtiene es que el astigmatismo oblicuo en VP es menor que en VL (44 de los 76 ojos).

En el caso de la fluctuación acomodativa se observó que era mayor en VP que en VL en 50 de los 76 ojos analizados.

En cuanto al diámetro pupilar, la diferencia significativa viene determinada porque la pupila en VP es más pequeña que en VL (26 de los 76 ojos, en 36 no hubo cambio y en 14 fue al contrario) debido a la contracción que se produce por la vergencia del objeto conforme éste se acerca.

6. DISCUSIÓN

Se observó que las aberraciones que más predominaron en este trabajo tanto en lejos como en cerca son el desenfoque y el astigmatismo (aberraciones de bajo orden), siendo la primera mayor en cerca que en lejos. Es por esto que el valor de RMS de las aberraciones de bajo orden es mayor que el valor RMS para las aberraciones de alto orden. El valor de desenfoque para visión lejana es de $0,828 \pm 1,200 \mu\text{m}$ y $1,284 \pm 0,990 \mu\text{m}$ para visión próxima. Por otro lado, el valor de astigmatismo que se obtiene en VL ($0,270 \pm 0,212 \mu\text{m}$) y VP ($0,289 \pm 0,254 \mu\text{m}$) son muy similares. Esta dominancia de las aberraciones de desenfoque y astigmatismo se describió previamente en otros estudios⁶.

Como en otros estudios⁷, se obtuvo un valor de RMS total que aumenta en VP (para un diámetro de pupila de 4 mm), puesto que se estimula la acomodación. Este valor de RMS debería ser mayor conforme aumentara la demanda acomodativa⁷.

Se observan resultados similares comparando los valores de RMS de alto orden obtenidos en este trabajo ($0,103 \pm 0,037 \mu\text{m}$ en VL y $0,104 \pm 0,049 \mu\text{m}$ en VP, para un diámetro de pupila de 4 mm y un estímulo acomodativo a 50 cm) con los publicados en otros estudios⁸ ($0,110 \pm 0,030 \mu\text{m}$ en VL y $0,110 \pm 0,040 \mu\text{m}$ para el mismo diámetro pupilar y con un estímulo a 33 cm).

En cuanto al valor de aberración esférica obtenido en VP, está clara la tendencia que han descrito otros autores^{8,9,10}, que consiste en que el valor de aberración esférica se hace más negativo con la acomodación. Esto implica que aparezca un valor de $0,025 \pm 0,025 \mu\text{m}$ para VL y un valor de $0,017 \pm 0,026 \mu\text{m}$ para VP.

Otros estudios¹¹ han establecido unos valores normales esperables (para VL y diámetro de pupila de 4 mm) de RMS de alto orden ($0,100 \pm 0,040 \mu\text{m}$), RMS coma ($0,061 \pm 0,039 \mu\text{m}$), RMS aberración esférica ($0,028 \pm 0,022 \mu\text{m}$), RMS tercer orden ($0,087 \pm 0,043 \mu\text{m}$) y RMS cuarto orden ($0,043 \pm 0,022 \mu\text{m}$) para una población de sujetos jóvenes. Los valores obtenidos en este trabajo de RMS de alto orden ($0,103 \pm 0,037 \mu\text{m}$), RMS coma ($0,061 \pm 0,039 \mu\text{m}$), RMS de aberración esférica ($0,025 \pm 0,025 \mu\text{m}$), RMS tercer orden ($0,088 \pm 0,039 \mu\text{m}$) y RMS cuarto orden ($0,043 \pm 0,020 \mu\text{m}$) son muy similares.

En el caso de RMS de coma y RMS de astigmatismo se vio que cambiaban con la acomodación aumentando su valor. En estudios¹² previos, se observó que RMS coma y

RMS astigmatismo cambiaban con la acomodación, pero la dirección de cambio era variable, unas veces hacia valores positivos y otras hacia valores negativos.

En cuanto al astigmatismo oblicuo, que es un valor que en esta muestra es estadísticamente significativo, no se encontraron estudios que refieran nada sobre esta aberración.

Se observó que el valor de fluctuación acomodativa era mayor para visión próxima, puesto que en general, las fluctuaciones acomodativas aumentan con la vergencia del objeto, como ya decían estudios anteriores¹³. En cuanto a los valores normales de fluctuación acomodativa a 50 cm, los obtenidos en este trabajo para VP ($0,66 \pm 0,38$ D) son inferiores a los obtenidos en estudios anteriores¹³ ($0,93 \pm 0,12$ D). Si los comparamos con otros estudios¹⁴ ($0,11$ D para VL y $0,18$ D para VP) se observó que los valores obtenidos en este trabajo son mayores ($0,58 \pm 0,21$ D para VL y $0,66 \pm 0,38$ D en VP). Esta diferencia puede deberse a la edad de la muestra, ya que, mientras la edad media de nuestra muestra es de 22,76 años, la del estudio anterior¹⁴ es de 30 años.

7. CASO ESPECIAL: INFLEXIBILIDAD ACOMODATIVA

Mujer de 24 años con síntomas de visión borrosa y fotofobia, con una refracción de +0,50 D de esfera en ambos ojos para VL y diagnosticada de inflexibilidad acomodativa.

La amplitud de acomodación es de 9,25 D en el ojo derecho (OD) y 7,50 D en el ojo izquierdo (OI).

A continuación, se muestran los valores de aberraciones, fluctuación acomodativa y diámetro pupilar para ambos ojos en VL y VP (Tabla 3).

	Ojo Derecho		Ojo Izquierdo	
	VL	VP	VL	VP
RMS Total (μm)	0,305	0,841	0,150	0,752
RMS Alto Orden (μm)	0,146	0,143	0,133	0,135
RMS Bajo Orden (μm)	0,268	0,829	0,069	0,740
Desenfoque (μm)	0,004	0,780	-0,002	0,738
RMS Astigmatismo (μm)	0,173	0,281	0,069	0,062
RMS Coma (μm)	0,110	0,112	0,109	0,108
RMS Trefoil (μm)	0,079	0,078	0,025	0,042
Esférica (μm)	0,034	0,020	0,059	0,037
Coma Vertical (μm)	-0,110	-0,111	-0,094	-0,105
Coma Horizontal (μm)	0,010	-0,013	0,055	0,023
Trefoil Y (μm)	0,072	0,077	0,023	0,041
Trefoil X (μm)	0,034	0,013	-0,009	-0,002
Tetrafoil Y (μm)	-0,007	-0,003	-0,010	-0,007
Astigmatismo Oblicuo (μm)	0,005	0,004	0,004	0,002
Astigmatismo HV (μm)	0,001	-0,003	-0,001	-0,021
Tetrafoil X (μm)	0,039	0,035	0,032	0,051
Fluctuación Acomodativa (D)	0,82	1,49	0,81	1,52
Diámetro Pupilar (mm)	6,4	6,6	5,6	5,6

Tabla 3. Valores de aberraciones, fluctuación acomodativa y diámetro pupilar.

En la Figura 10 se comparan gráficamente los valores de aberrometría del sujeto con los valores medios de la muestra:

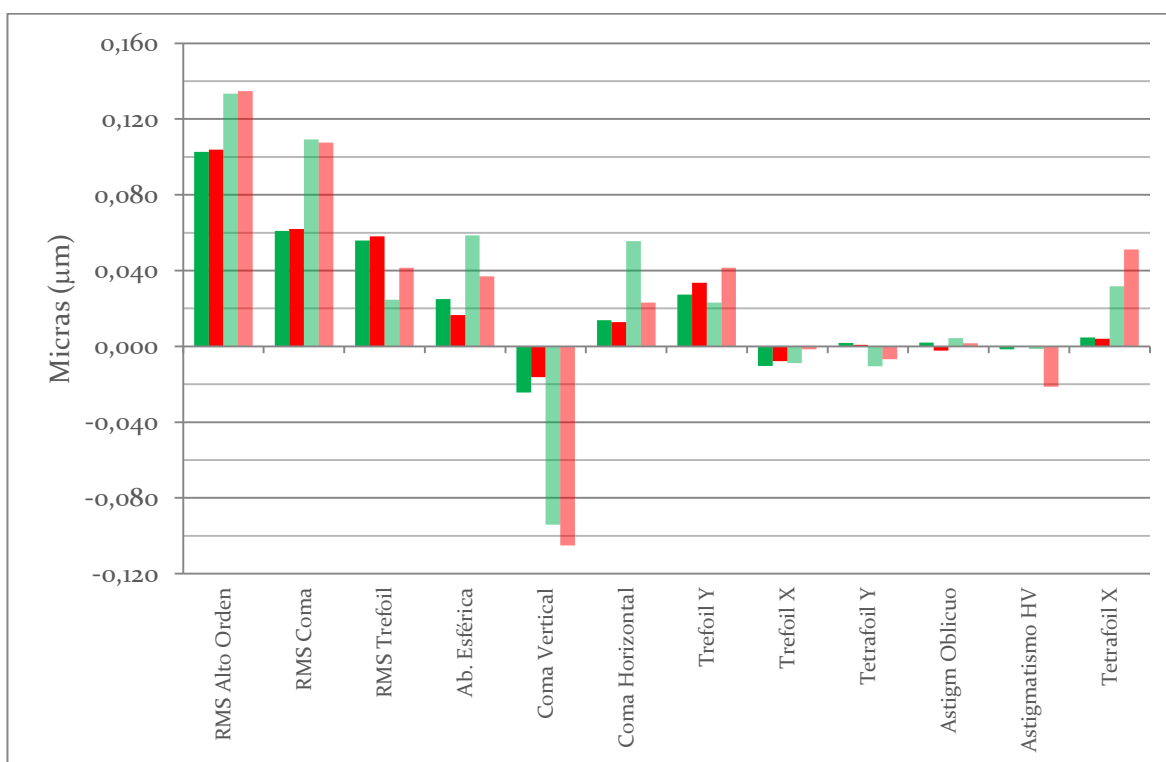
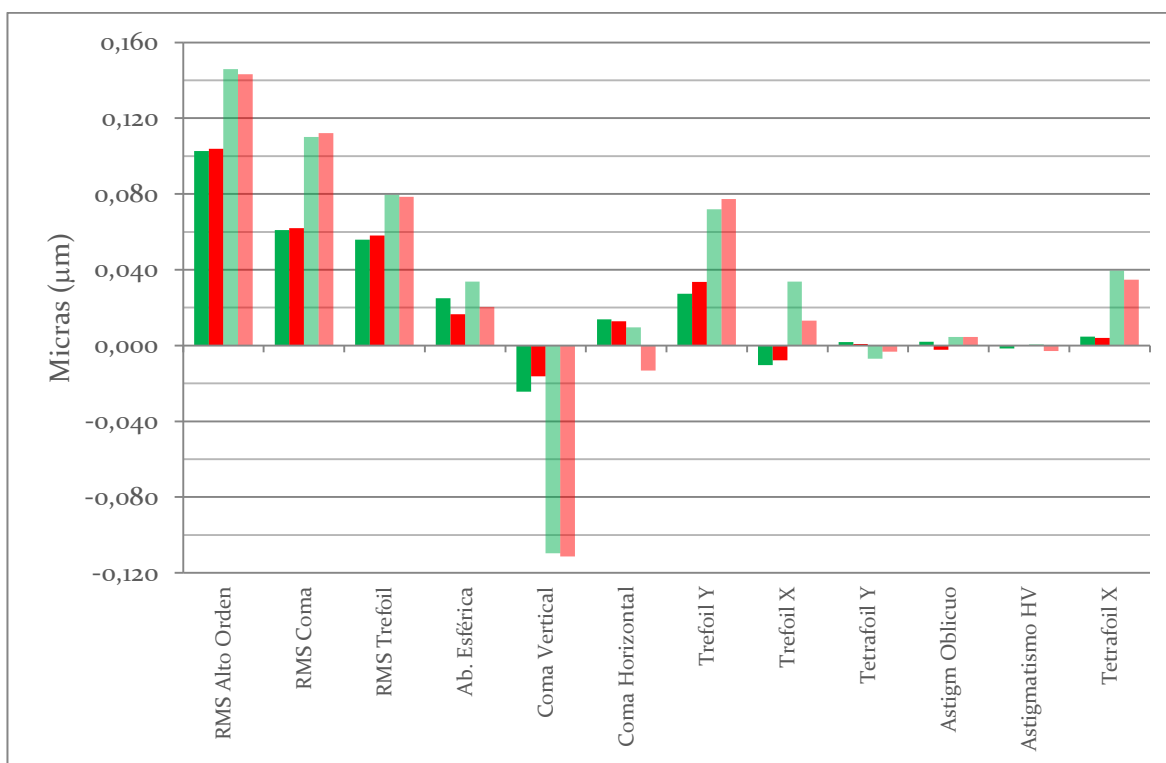


Figura 10. Comparación de los valores de aberrometría del sujeto con la media de la muestra. Verde, valores medios en VL; Rojo, valores medios en VP; Verde claro, valores del sujeto en VL; Rojo claro, valores del sujeto en VP. Arriba, ojo derecho; Abajo, ojo izquierdo.

Se compararon los valores individuales en el caso de inflexibilidad acomodativa con los que se obtuvieron en la muestra (Tabla 1):

- El RMS de alto orden en VL ($0,146 \mu\text{m}$ OD y $0,133 \mu\text{m}$ OI) fue superior al de la muestra ($0,103 \pm 0,037 \mu\text{m}$).
- El RMS de alto orden en VP ($0,143 \mu\text{m}$ OD y $0,135 \mu\text{m}$ OI) fue superior al de la muestra ($0,104 \pm 0,049 \mu\text{m}$).
- En el caso de RMS de coma en VL ($0,110 \mu\text{m}$ OD y $0,109 \mu\text{m}$ OI) se obtuvo un valor superior al de la muestra ($0,061 \pm 0,039 \mu\text{m}$), al igual en VP ($0,112 \mu\text{m}$ OD y $0,108 \mu\text{m}$ en OI, frente a $0,062 \pm 0,045 \mu\text{m}$ para la muestra).
- El valor de aberración esférica en VL ($0,034 \mu\text{m}$ OD y $0,059 \mu\text{m}$ OI) también fue superior al valor medio obtenido para la muestra ($0,025 \pm 0,025 \mu\text{m}$).
- Se obtuvieron valores de coma vertical en VL y VP, tanto en OD como en OI, mucho más negativos en el sujeto ($-0,110 \mu\text{m}$ VL OD, $-0,094 \mu\text{m}$ VL OI, $-0,111 \mu\text{m}$ VP OD y $-0,105 \mu\text{m}$ OI VP) que en la muestra ($-0,024 \pm 0,054 \mu\text{m}$ VL y $-0,016 \pm 0,053 \mu\text{m}$ VP).
- Respecto al tetrafoil X, en el caso de inflexibilidad acomodativa en VL ($0,039 \mu\text{m}$ OD y $0,032 \mu\text{m}$ en OI) se obtuvieron valores muy superiores a los de la muestra ($0,005 \pm 0,017 \mu\text{m}$ VL). En visión próxima, se observa la misma tendencia ($0,035 \mu\text{m}$ OD y $0,051 \mu\text{m}$ en OI, frente a $0,004 \pm 0,018 \mu\text{m}$ para el total de la muestra).
- Los valores de fluctuación de la acomodación en VP ($0,82 \text{ D}$ OD y $0,81 \text{ D}$ OI) fueron superiores a los de la muestra ($0,66 \pm 0,38 \text{ D}$).

En general, se puede hablar de un aumento generalizado de las aberraciones en el sujeto diagnosticado de inflexibilidad acomodativa. No obstante, se cumplió la tendencia de que tanto RMS de bajo orden, RMS total y fluctuación acomodativa fuesen mayores en VP que en VL.

Los valores del RMS del alto orden y RMS de coma fueron muy similares en VL y VP, al igual que ocurre para el total de los sujetos. La misma tendencia se observó en la aberración esférica, con valores en VL mayores que en VP.

Para el RMS de trefoil, la muestra obtuvo valores similares en VL y VP, siendo en VP un poco mayor. El sujeto obtuvo valores similares para el OD pero en el caso del OI el valor de VP ($0,042 \mu\text{m}$) fue mayor que el de VL ($0,025 \mu\text{m}$).

En el caso del coma vertical, para la muestra se obtuvieron valores mayores en VL que en VP. En el caso del sujeto, no se siguió la tendencia, ya que los valores no se acercaron hacia valores más positivos en VP sino al contrario, en VP los valores del sujeto se hicieron mucho más negativos en ambos ojos.

Si se comparan OD y OI, se observó un comportamiento asimétrico en parámetros como RMS de trefoil, aberración esférica, coma horizontal, trefoil Y y trefoil X, que coincidió que se alteraron en mayor medida en el ojo con menor capacidad acomodativa.

Además, el RMS de alto orden, RMS del coma, el coma vertical y el tetrafoil X adquirieron valores bastante más grandes en ambos ojos en el sujeto con inflexibilidad acomodativa que en la muestra.

Por tanto se podría establecer que hubiese cierta relación entre las aberraciones mencionadas anteriormente, y que no cumplían la tendencia de la muestra, y la acomodación para este caso de inflexibilidad acomodativa.

8. CONCLUSIONES

Tras la realización de este trabajo, las conclusiones obtenidas para la población estudiada han sido las siguientes:

1. El RMS de bajo orden aumenta con la acomodación, mientras en el RMS de alto orden no se observa apenas variación.
2. La aberración esférica disminuye con la acomodación.
3. El RMS de coma y el RMS de trefoil no cambian significativamente para VP.
4. Se ven diferencias estadísticamente significativas en las aberraciones de coma vertical y astigmatismo oblicuo, siendo la tendencia del primero acercarse a valores positivos en VP y la del segundo acercarse a valores negativos en VP.
5. Se observa una contracción pupilar en VP debida a la vergencia del objeto.
6. La fluctuación de la acomodación en VP es mayor que en VL.
7. En el caso de inflexibilidad acomodativa, se observa que las aberraciones que más cambios sufren con la acomodación es el coma vertical y el tetrafoil X, así como un comportamiento asimétrico en otras aberraciones.

La realización de este trabajo me ha aportado conocimientos más profundos de las aberraciones y de los cambios que en ellas se producen durante el proceso de acomodación. También he visto que no todas cambian de la misma manera y que algunas no siguen patrones establecidos en su cambio. En un futuro creo que será útil (en cuanto a calidad de visión y cirugía refractiva) haber conocido tanto las aberraciones que predominan en visión lejana como los cambios que en ellas se producen en visión próxima.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Martín Herranz R, Vecilla Antolinez G. Manual de optometría. Madrid: Médica panamericana; 2010. ISBN: 978-84-9835-272-6.
2. Zernike F. Beugungstheorie des Schneidenverfahrens und Seiner Verbesserten Form, der Phasenkontrastmethode. Physica 1 1934; (8): 689–704.
3. Molebny VV, Panagopoulou SI, Molebny SV, Wakil YS, Pallikaris IG. Principles of ray tracing aberrometry. J Refract Surg 2000; 16(5):572-5.
4. Leon ND, Mallen EA, Wolffsohn JS, Gilmartin B. Clinical evaluation of the Shin-Nippon NVision-K 5001/Grand Seiko WR-5100K Autorefractor. Optom Vis Sci 2003; 80(4):320-4.
5. Mallen EA, Wolffsohn JS, Gilmartin B, Tsujimura S. Clinical evaluation of the Shin-Nippon SRW-5000 autorefractor in adults. Ophthalmic Physiol Opt 2001; 21:101–7.
6. Castejón Mochón JF, López Gil N, Benito A, Artal P. Ocular wave-front aberration statistics in a normal young population. Vision Res 2002; 42(13):1611-7.
7. Shi G, Wang Y, Yuan Y, Wei L, Lv F, Zhang Y. Measurement of ocular anterior segment dimension and wavefront aberration simultaneously during accommodation. J Biomed Opt 2012; 17(12):120501.
8. Ninomiya S, Fujikado T, Kuroda T, Maeda N, Tano Y, Oshika T, Hirohara Y, Mihashi T. Changes of ocular aberration with accommodation. Am J Ophthalmol 2002; 134(6):924-6.
9. López Gil N, Fernández Sánchez V, Legras R, Montés Micó R, Lara F, Nguyen-Khoa JL. Accommodation-related changes in monochromatic aberrations of the human eye as a function of age. Invest Ophthalmol Vis Sci 2008; 49(4):1736-43.

10. Li YJ, Choi JA, Kim H, Yu SY, Joo CK. Changes in ocular wavefront aberrations and retinal image quality with objective accommodation. *J Cataract Refract Surg* 2011; 37(5):835-41.
11. Salomon TO, van de Pol C. Normal-eye Zernike coefficients and root-mean-square wavefront errors. *J Cataract Refract Surg* 2006; 32(12):2064-74.
12. Cheng H, Barnett JK, Vilupuru AS, Marsack JD, Kasthurirangan S, Applegate RA, Roorda A. A population study on changes in wave aberrations with accommodation. *J Vis* 2004; 4(4):272-80.
13. Martín Prieto S. Caracterización de las microfluctuaciones de la respuesta acomodativa en miopes. Trabajo final de máster, UPC, Escola universitària d'òptica i optometria de Terrassa, 2011 [Biblioteca Universitat Politècnica de Catalunya]
14. Leahy C, Leroux C, Dainty C, Diaz-Santana L. Temporal dynamics and statistical characteristics of the microfluctuations of accommodation: dependence on the mean accommodative effort. *Opt Express* 2010; 18(3):2668-81.