

Estudio de aberración cromática usando un sensor Shack-Hartmann

Chromatic aberration study using a Shack-Hartmann sensor

GÓMEZ-VIEYRA, Armando†*¹, DEL CARPIO-CRUZ, Maximiliano¹, HERNÁNDEZ-GÓMEZ, Geovanni² y MIRANDA-TELLO, Jose Raúl¹

¹ Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Azcapotzalco, División de Ciencias Básicas e Ingeniería

² Universidad de Guanajuato, Departamento de Estudios Multidisciplinarios Sede Yuriria

ID 1^{er} Autor: Armando, Gómez-Vieyra / ORC ID: 0000-0003-0290-1518, CVU CONACYT ID: 170266

ID 1^{er} Coautor: Maximiliano, Del Carpio-Cruz

ID 2^{do} Coautor: Geovanni, Hernández-Gómez / ORC ID: 0000-0003-1769-3213, CVU CONACYT ID: 217518

ID 3^{er} Coautor: Jose Raúl, Miranda-Tello / CVU CONACYT ID: 101411

Recibido: Septiembre 29, 2018; Aceptado: Diciembre 09, 2018

Resumen

En este artículo se muestra la implementación de un aberrómetro Shack-Hartmann para la medición de las aberraciones monocromáticas y cromáticas en un solo arreglo experimental. El objetivo de este desarrollo es el de poder medir tanto aberraciones cromáticas como monocromáticas en una lente o espejo tradicional. El sistema emplea optomecánica comercial y elementos especializados fabricados con impresión 3D. Los elementos del sistema óptico son: un sensor de frente de onda comercial, un telescopio Kepleriano y diversas componentes ópticas de bajo costo. La fuente de iluminación consiste esencialmente de un diodo RGB comercial (462nm, 521nm y 631nm), controlado por una plataforma de desarrollo Arduino con una programación de modulación de ancho de pulso (PWM). La medición del frente de onda se realiza con el software del fabricante mientras que el análisis de coeficientes de aberración se realiza de forma analítica. Las tres componentes en evaluación son comerciales, lo cual facilita la validación en el funcionamiento del instrumento. Se analizan las aberraciones monocromáticas y la aberración cromática presente en cada lente. El sistema puede ser empleado en investigación o pruebas ópticas en el proceso de manufactura. Además, es un arreglo experimental que puede ser empleado en los cursos de Tecnología Óptica o Ingeniería Óptica.

Aberrómetro, Pruebas ópticas, Optomecatrónica

Abstract

This paper shows the implementation of a Shack-Hartmann aberrometer that allows the measurement of chromatic and monochromatic aberrations in a single experimental arrangement. The objective of this arrangement is to measure both chromatic and monochromatic aberrations of a traditional lens or mirror. The system was developed using commercial optomechanics and elements manufactured by 3D printing. The elements of the optical system are: commercial wavefront sensor, Keplerian telescope and various low-cost optical components. The light source is consisting essentially of a commercial RGB diode (462nm, 521nm and 631nm), controlled by Arduino development platform with a programming of pulse width modulation (PWM). The wavefront measurement is made with the manufacturer's software while the analysis of aberration coefficients is performed analytically. The three components under evaluation are commercial, which facilitates the assessment the operation of the instrument. The monochromatic aberrations and the chromatic aberration present in each lens are analyzed. The system can be used in research or optical testing in the manufacturing process. In addition, it is experimental arrangement that can be used in the courses of Optical Technology or Optical Engineering.

Aberrometer, Optical tests, Optomechatronic

Citación: GÓMEZ-VIEYRA, Armando, DEL CARPIO-CRUZ, Maximiliano, HERNÁNDEZ-GÓMEZ, Geovanni y MIRANDA-TELLO, Jose Raúl. Estudio de aberración cromática usando un sensor Shack-Hartmann. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. 2018. 5-17: 15-21.

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: agvte@correo.uam.azc.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En el proceso para la fabricación de elementos ópticos y de alineación de sistemas ópticos se han empleado interferómetros y pruebas geométricas. La mayoría de estos arreglos experimentales y algunos comerciales no son capaces de medir en el mismo tiempo las aberraciones monocromáticas y las cromáticas. En este sistema, el cual estaba basado en un sensor de frente de onda Shack-Hartmann, se ha diseñado un arreglo experimental en el que se pueden realizar ambas mediciones y que además se puede ser implementado en un pequeño taller o dentro de los cursos especializados de capacitación o de docencia.

El mayor campo de aplicación en el que se ha utilizado el sensor Shack-Hartmann es en los sistemas de óptica adaptativa astronómica, así como en los oftalmoscopios de nueva generación. Otra aplicación importante es la medición de las aberraciones oculares de alto orden de sujetos in vivo. La ventaja principal del sensor Shack-Hartmann radica en que es un método geométrico y tiene versatilidad para ser integrado en sistemas ópticos comerciales y experimentales.

Recientemente se ha empleado el sensor Shack-Hartmann para la medición de la aberración cromática ocular. Sin embargo, la instrumentación es muy costosa al emplear fuentes de luz especiales y por los subsistemas de acondicionamiento para elegir la longitud de onda con la que se realiza la medición (filtros, interferómetros y espectrómetros).

Aún con sus grandes características y versatilidad de implementación, éste no ha sido aprovechado en el ámbito de pruebas y metrología óptica. En este trabajo se ha realizado un arreglo experimental que permite estudiar las aberraciones monocromáticas y cromáticas empleando un sensor Shack-Hartmann y un sistema LED RGB para lograr un sistema de bajo costo y adaptable tanto en un taller óptico como en los laboratorios de docencia.

Marco Teórico

El sensor Shack-Hartmann es una herramienta sencilla y elegante para la medición de la forma del frente de onda.

El cual es una modificación de la prueba de Hartmann, inventada en 1900 para realizar pruebas ópticas de espejos de grandes dimensiones.

La prueba de Hartmann (Fig. 1.a) se basa en el uso de una pantalla con orificios que permiten el paso de la luz en posiciones bien definidas, la pantalla es colocada en la pupila del sistema óptico que se desea analizar. A partir de este arreglo, se genera un parton de manchas en el detector, el cual será evaluado con respecto a un patrón de referencia.

Si el sistema no presenta aberraciones ópticas, producidas principalmente en el proceso de fabricación, formará un patrón de manchas pequeñas (casi puntos) que respetarán la geometría de la pantalla construida. Si el sistema óptico presenta aberraciones, los puntos creados por el sistema evaluado, se alejarán de las posiciones ideales (Fig 2). A la diferencia de la posición real respecto a la posición ideal, se le denomina Aberración Transversal (TA). Esta última podrá integrarse para obtener la Aberración de Frente de Onda (W), o bien podrá interpolarse para realizar una descripción completa de la Aberración Transversal.

El sensor de Shack-Hartmann (Fig. 1.b) surgió durante la Guerra Fría por Estados Unidos, el motivo de su desarrollo se debió al deseo de detectar los satélites desde un telescopio terrestre. Originalmente se observó que al realizar la prueba de Hartmann, se reduce drásticamente la cantidad de luz, esto se debe a que la pantalla con orificios bloquea gran cantidad de luz y únicamente se aprovechan los fotones que pasan por los orificios.

Por lo que Ronald Shack, hacia 1970, colocó lentes en cada uno de los agujeros de la pantalla de Hartmann, además de eliminar la pantalla y colocar un arreglo de lentes (actualmente arreglo de microlentes). Esto propició un aumento en la densidad de fotones captados y todos los fotones que incidieran en el arreglo de microlentes seguirían su camino al detector.

A mediados de la década de 1980, Shack visitó a Josef Bille en la Universidad de Heidelberg, quien aprovechó los desarrollos de Shack aplicándolos en el área de las Ciencias de la Visión.

Por lo que la técnica se aplicó por primera vez en la medición topográfica de la córnea y más tarde en la medición de las aberraciones del ojo. La aplicación del sensor Shack-Hartmann en medición de aberraciones monocromáticas ha sido muy prolífico.

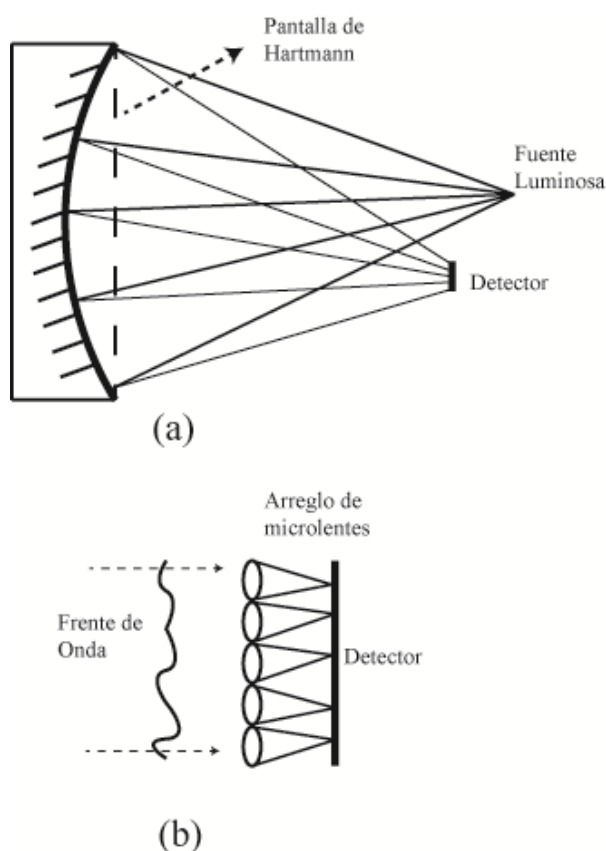


Figura 1 (a) Prueba de Hartmann, (b) Sensor Shack-Hartmann

Fuente: Elaboración propia

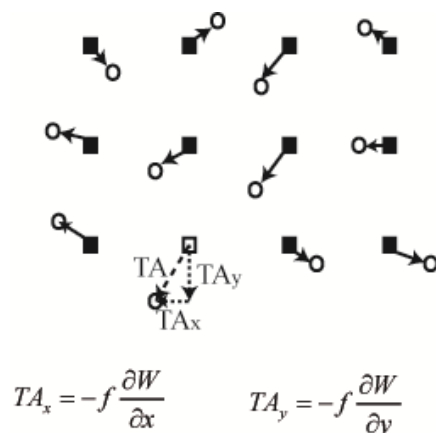


Figura 2 Posición de los puntos de los patrones de Hartmann ideal (cuadrados) y de la prueba (círculos)

Fuente: Elaboración propia

La representación matemática del frente de onda puede implementarse usando serie de polinomios como se empleaba comúnmente a principios del siglo XX, funciones gaussianas, entre muchas otras.

Actualmente se emplean los polinomios de Zernike ortonormales, conocidos comúnmente como la notación de Mahajan, o los polinomios ortogonales de Zernike. En el ámbito de la ingeniería óptica no hay una tendencia tan definida como en el campo de las ciencias de la visión. En el trabajo presentado se realiza el análisis del frente de onda empleando la notación clásica de Noll (Malacara, 1992), que viene predefinida en el sensor.

La aberración cromática de la lente se debe tanto al factor de forma de la lente como al índice de refracción del material de construcción, esto debido a que el índice es dependiente de la longitud de onda empleada en el instrumento. Para estudiar y caracterizar la aberración cromática, regularmente se recurren a fuentes de emisión de luz discreta y monocromadores o, en su caso, filtros ópticos altamente especializados para obtener las longitudes de onda necesarias que permitan realizar las mediciones correspondientes de la aberración cromática. Esto consiste en medir la aberración monocromática para cada longitud de onda, con lo cual, al analizar todas las mediciones a diferentes longitudes de onda se puede determinar tanto las aberraciones cromáticas laterales y como las longitudinales.

La ventaja de esta propuesta es que se ocupa una fuente de luz semiconductor, integrada en un mismo encapsulado, la cual con una prueba geométrica de bajo costo, puede ser integrada a un laboratorio de pruebas ópticas o a un laboratorio de docencia.

Arreglo experimental

El sistema se compone de un sensor Shack-Hartmann WFS150-5C, un telescopio kepleriano que realiza la función de relevador óptico, un divisor de haz, una lente colimadora y un LED RGB como fuente de luz (Fig.3).

El sensor Shack-Hartmann WFS150-5C, tiene un tamaño de apertura de 5.95mm x 4.76mm, con un número de lentes máximo de 39x31 cuya distancia focal es de 7.4mm. El relevador óptico se ensambló con lentes acromáticas, con una amplificación de 0.57, todo montado en sistema optomecánico de caja para facilitar la alineación.

Otros componentes como la montura del LED RGB comercial ($D=5\text{mm}$), fueron diseñados en un programa CAD y fabricados en una impresora 3D. El LED RGB fue pulido para eliminar la superficie cóncava y obtener una superficie plana, lo cual es ventajoso debido a que la fuente de luz tiene un comportamiento más puntual, esto permite un mejor acople del sistema de iluminación.

El diodo RGB fue caracterizado espectralmente (Fig. 4), utilizando un espectrómetro instrumentado en la UAM-Azcapotzalco, con el objetivo de validar nuestras mediciones de las aberraciones monocromáticas.

Un doblete acromático fue empleado para colimar la luz emitida por la fuente. El sistema de control de intensidad del diodo se basa en una tarjeta ARDUINO UNO, programado para una modulación PWM (Fig. 4) y de esta forma variar la intensidad de luz en el sistema, es importante evitar saturar el CCD del sensor Shack-Harmann.

Cabe mencionar que el sistema de iluminación tiene una apertura de 8mm de diámetro, y que puede ser modificado cambiando la amplificación del telescopio.

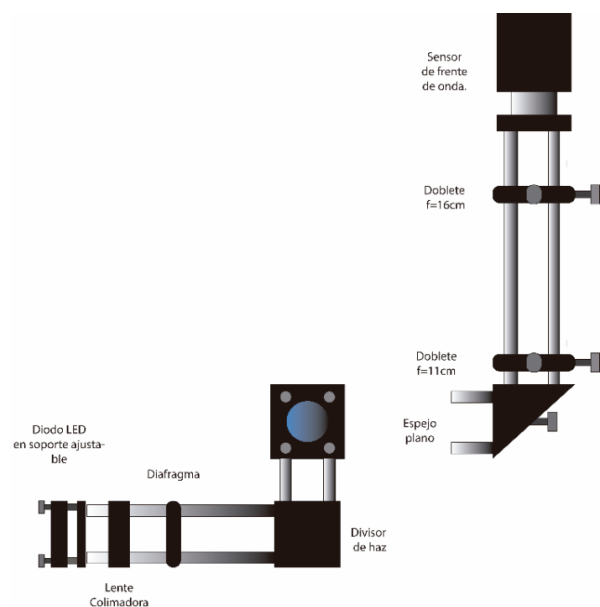


Figura 3 Arreglo Experimental, vista superior y vista lateral

Fuente: Elaboración propia

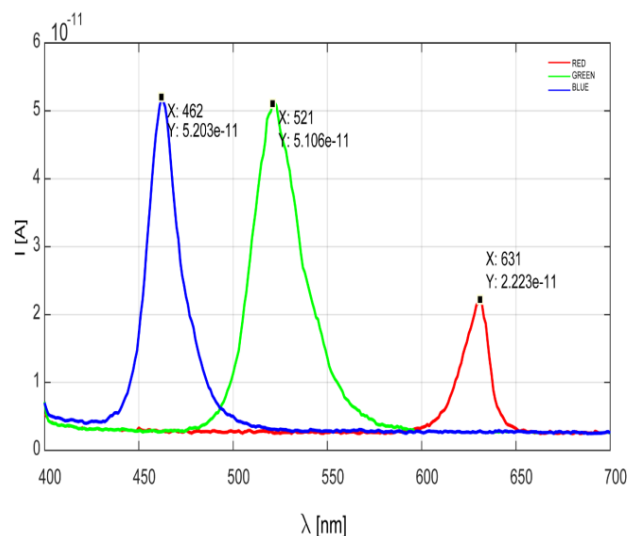
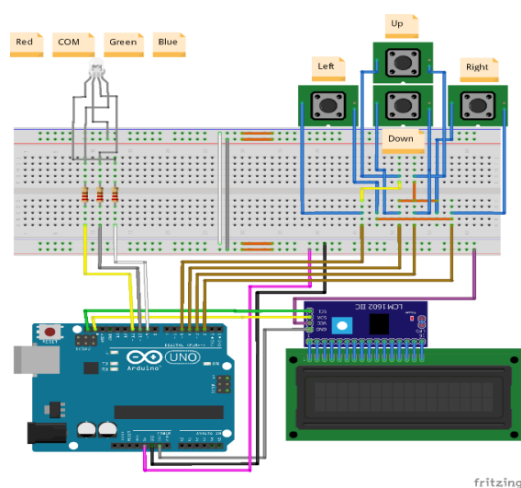


Figura 4 Curvas características por color de la emisión del diodo RGB

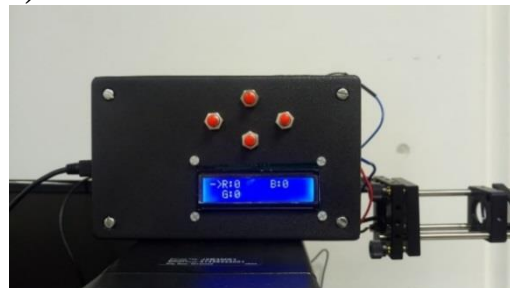
Fuente: Elaboración propia

Para caracterizar y calibrar el sistema se coloca un espejo plano con recubrimiento de aluminio, como elemento de prueba.

Después se analizaron: Un doblete acromático ($f=45\text{mm}$), un singlete BK7 ($f=52\text{mm}$) y un singlete de plástico ($f=45\text{mm}$).



a)



b)

Figura 5 Sistema electrónico de control de intensidad; (a) Esquemático, (b) Implementado

Fuente: Elaboración propia

Resultados

La Figura 6 muestra el histograma de los polinomios de Zernike (del 4 al 15) medidos para las tres lentes y que fueron evaluadas con los tres anchos banda de luz, donde claramente se observa que la calidad óptica varía drásticamente dependiendo de la lente analizada. La lente de plástico presenta variaciones drásticas en sus aberraciones monocromáticas. La Figura 7 muestra los valores del defoco de las diversas lentes, donde se observa la compensación de la lente acromática. En las otras dos lentes, los valores del defoco muestran el comportamiento lineal de la aberración cromática longitudinal.

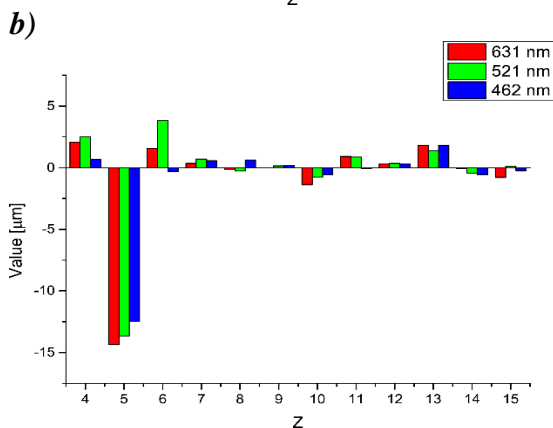
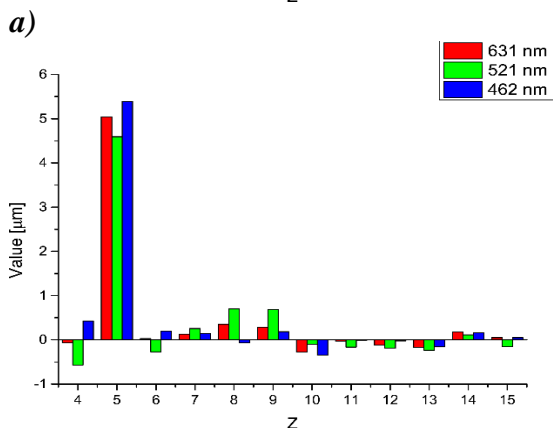
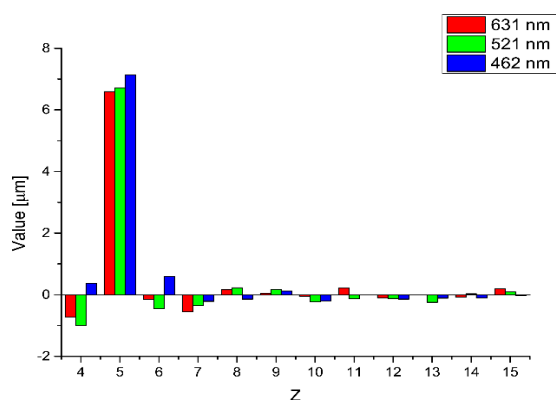


Figura 6. Histogramas de las diferentes lentes para los tres frentes de onda a) Singlete b) Doblete c) Lente de acrílico

Fuente: Elaboración propia

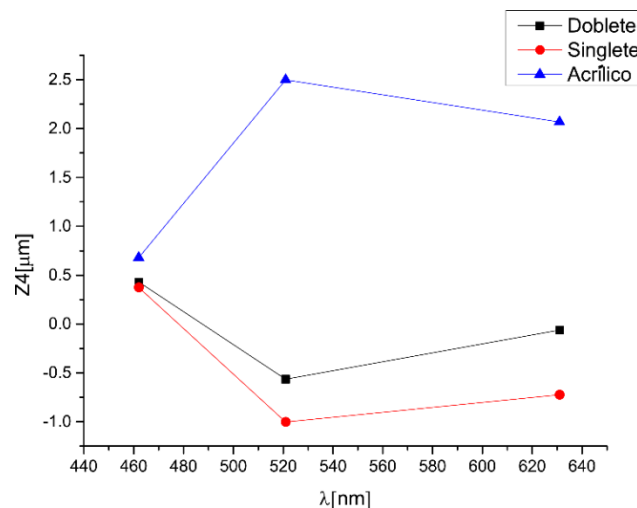


Figura 7 Comparación de los valores de defoco evaluados en las tres lentes de prueba

Fuente: Elaboración propia

La Figura 8 muestra los mapas del frente de onda reconstruidos ($\lambda=462\text{nm}$), donde se observa que el doblete está mejor compensado que el singlete. Del mismo modo, el mapa de aberraciones de la lente de acrílico es la que presenta mayor cantidad de aberraciones.

Conclusiones

En este trabajo se presentó el diseño y construcción de un arreglo experimental que permite evaluar las aberraciones monocromáticas, así como la cromática longitudinal. Con este sistema se evalúan tres componentes ópticas donde los coeficientes de Zernike presentan el comportamiento esperado.

El análisis del comportamiento del defoco en cada lente demuestra que el sistema propuesto puede ser utilizado para la medición de la aberración cromática, dentro de un taller de fabricación de elementos ópticos, así como en un laboratorio de investigación y en un laboratorio de docencia donde se impartan las clases de óptica general, ingeniería óptica o tecnología óptica.

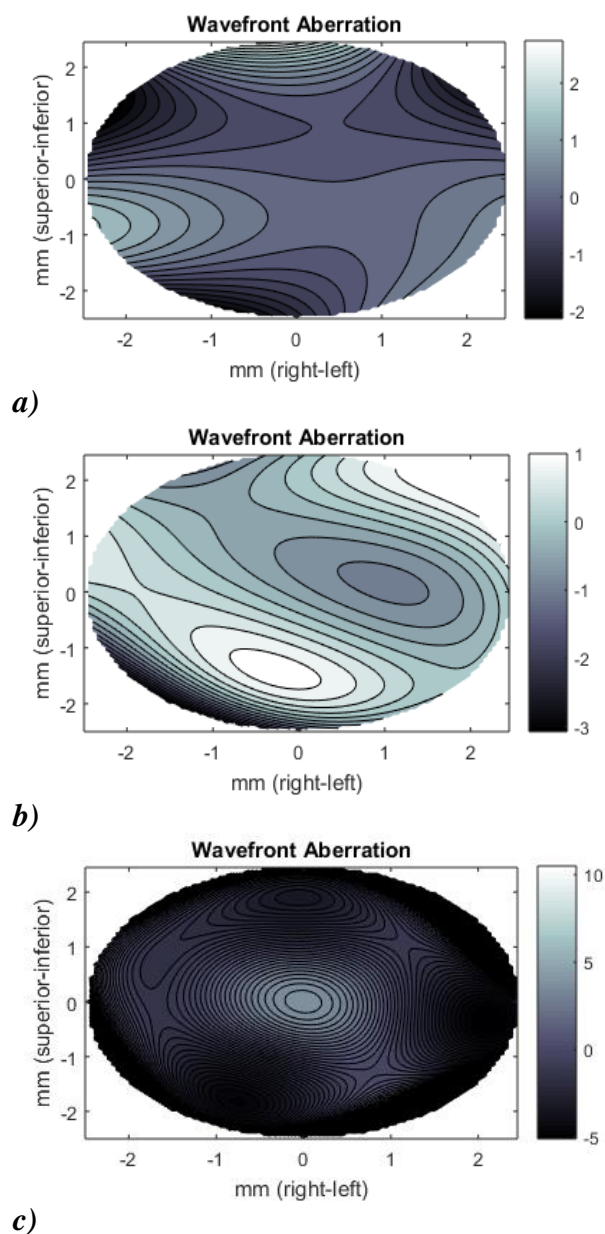


Figura 8. Mapas de aberraciones con $\lambda=462\text{nm}$ (a) Singlete, (b) Doblete y (c) Lente de acrílico
Fuente: Elaboración propia

Referencias

Artoni, P., Landi, S., Sato, S. S., Luin, S., Ratto, G. M. (2016). Arduino Due based tool to facilitate in vivo two-photon excitation microscopy. *Biomed. Opt. Express*, 7(4), 1604-1613.

Dörband, H., Müller, H., Gross, H. (2012), *Handbook of Optical Systems (Vol. 1)*. Federal Republic of Germany: Wiley-VCH.

Fernández, E. J., Artal, P. (2008). Ocular Aberrations up to the Infrared Range: from 632.8 to 1070 nm. *Opt. Express*, 16(26), 21199-21208.

Greivenkamp, J., Smith, D., Goodwin, E. (2004). Calibration issues with Shack-Hartmann sensors for metrology applications. *Proceedings of SPIE*, 5252, 372-380.

Jain, P. (2006). *Multiwavelength Shack-Hartmann Aberrometer* (PhD. Thesis). The University of Arizona, Arizona, United States of America.

Kaschke, M., Donnerhacke, K., Rill, M. S. (2014). *Optical Devices in Ophthalmology and Optometry: Technology, Design Principles, and Clinical Applications*. Wiley-Interscience; New Jersey.

Liang, J., Grimm, B., Goelz, S., Bille, J. F. (1994). Objective measurement of wavefront aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor. *J. Opt. Soc. Am. A*, 11(7), 1949-1957.

Malacara, D. (1992). *Optical shop testing* (2nd. ed.). United States of America: Wiley.

Malacara, D. (2007). *Optical shop testing* (3rd. ed.). United States of America: Wiley.

Malacara-Hernández, D. Gomez-Vieyra A., Rodriguez-Vera R. Basurto-Urbe E. (2011). Different polynomial expressions for wavefront aberrations. *Proceedings of SPIE*, 8001, 800108-1-7.

Manzanera, S. Canovas, C. M. Prieto, P. Artal, P. (2008). A Wavelength Tunable Wavefront Sensor for the Human Eye. *Opt. Express*, 16(11), 7748-7755.

Marcos, S. Burns, S. A. Moreno-Barriusop, E. Navarro, R. (1999). A New Approach to the Study of Ocular Chromatic Aberrations. *Vision Res.*, 39(26), 4309-4323.

Nakajima, M., Hiraoka, T., Hirohara, Y., Oshika, T., Mihashi, T. (2015). Verification of the Lack of Correlation between Age and Longitudinal Chromatic Aberrations of the Human Eye from the Visible to the Infrared. *Biomed. Opt. Express*, 6 (7), 2676-2694.

Porter, J., Queener, H., Lin, J., Thorn, K., Awwal, A. (2006). *Adaptive Optics for Vision Science: Principles, Practices, Design and Applications*. New Jersey: Wiley-Interscience.

Pratt, B., Shack, R. (1971). Lenticular Hartmann Screen. Optical Science Center Newsletter, 5, 15-16.

Prieto, P. M., Vargas-Martín, F., Goetz S., Artal, P. (2000). Analysis of the Performance of the Hartmann-Shack Sensor in the Human Eye. J. Opt. Soc. Am. A., 17(8), 1388-1398.

Teikari, P., Najjar, R. P., Malkki, H., Knoblauch, K., Dumortier, D., Gronfier, C., Cooper, H. M. (2012). An inexpensive Arduino-based LED stimulator system for vision research. J. Neurosci. Methods 211(2), 227–236.