



ISSN 0370-3908

REVISTA DE LA ACADEMIA COLOMBIANA de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Academia Colombiana de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 39 • Suplemento • Págs. 1-120 • Noviembre de 2015 • Bogotá - Colombia



INTERNATIONAL
YEAR OF LIGHT
2015



ISSN 0370-3908

REVISTA DE LA ACADEMIA COLOMBIANA de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Academia Colombiana de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 39 • Suplemento • Págs. 1-120 • Noviembre de 2015 • Bogotá - Colombia

Comité editorial

Editor invitado	Román Castañeda Profesor Titular, Escuela de Física Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín Medellín, Colombia
Editora en jefe	Elizabeth Castañeda Instituto Nacional de Salud, Bogotá, Colombia

Editores asociados

Ciencias físicas

Bernardo Gómez
Departamento de Física,
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Rubén Antonio Vargas Zapata
Universidad del Valle,
Cali, Colombia

Pedro Fernández de Córdoba
Universidad Politécnica de Valencia, España

Diógenes Campos Romero
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Román Eduardo Castañeda Sepúlveda
Universidad Nacional, Medellín, Colombia

Carlos Alberto Duque Echeverri
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

María Elena Gómez
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Gabriel Téllez
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Luis Álvaro Morales Aramburo
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Germán A. Pérez Alcázar
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Enrique Vera López
Universidad Politécnica, Tunja, Colombia

Jairo Roa-Rojas
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Rafael Baquero
Cinvestav, México

Ángela Stella Camacho Beltrán
Departamento de Física,
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Matemáticas

Victor Albis
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Jorge Ivan Cossio Betancur
Universidad Nacional de Colombia,
Medellín, Colombia

Luis Español González
Universidad de la Rioja, España

Jaime Ignacio Lesmes Camacho
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Luis Carlos Arboleda
Universidad del Valle, Cali, Colombia

José R. Quintero
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Ciencias químicas

Sonia Moreno Guaqueta
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Fanor Mondragón
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Moisés Wasserman Lerner
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Myriam Sánchez de Gómez
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Héctor Fabio Zuluaga Corrales
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Fernando Martínez
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia

Betty Lucy López Osorio
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Ciencias naturales

José Luis Fernández Alonso
Real Jardín Botánico, Consejo Superior de
Investigaciones Científicas, Madrid, España

Jaime Cantera
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Gabriel Roldán
Universidad Católica de Oriente,
Rionegro, Antioquia, Colombia

Juan Armando Sánchez Muñoz
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Patricia Chacón de Ulloa
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Sandra Baena Garzón
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia

Néstor Hernando Campos Campos
Universidad Nacional de Colombia,
Sede Caribe, Colombia

Gerhard Fischer
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Jorge Enrique Llorente
Universidad Nacional Autónoma
de México, México

Santiago Melo Gaviria
Universidad de Viena, Austria

Martha Patricia Ramírez Pinilla
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia

Carlos Daniel Cadena Ordoñez
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Santiago Madriñán
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Ciencias de la tierra

José Ignacio Martínez
Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

Germán Poveda Jaramillo
Universidad Nacional de Colombia,
Medellín, Colombia

Armando Espinosa
Universidad del Quindío,
Armenia, Colombia

Carlos Alberto Vargas
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Fabio Cediél Melo
Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

Jaime Ignacio Vélez Upegui
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Carlos Alberto Jaramillo Muñoz
Smithsonian Tropical Research Institute,
Panamá

Michel Hermelin Arbaux
Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

Ciencias biomédicas

Luis Fernando García
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Felipe Guhl
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Leonardo Puerta Llerena
Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia

Gustavo Adolfo Vallejo
Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

Luis Caraballo
Universidad de Cartagena, Colombia

Eduardo Alberto Egea Bermejo
Universidad del Norte,
Barranquilla, Colombia

Ciencias humanas

Rubén Ardila
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Guillermo Páramo
Universidad Central, Bogotá, Colombia

Comité científico internacional

Ángela María Guzmán
University of Central Florida,
Orlando, Estados Unidos

Antoine M. Cleef
University of Amsterdam, Holanda

Carlos Jiménez
Universidad de La Coruña, España

Gioconda San Blas
Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas
y Naturales, Caracas, Venezuela

José Rubens Pirani
Universidade de São Paulo, Brasil

Wolfgang Gieren
Universidad de Concepción, Chile

Asistencia y coordinación editorial Carolina Acosta

Corrección de estilo y ortografía
Marta Renza

Diagramación
Johanna Morales

Impresión y acabados
Gente Nueva

Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

Actualidad Iberoamericana

Agris

CIRS

Current Mathematical Publications

Dialnet

EBSCO

Historia Mathematica

Index Kewensis

Latindex

Mathematical Reviews

MathSciNet (on line data base)

OCLC (Online Computer Library Center)

PERIODICA

Publindex, Colciencias

RLG

SciELO

Zentralblatt für Mathematik

Zoological Record

Periodicidad: trimestral

Fecha de inicio: 1936

Tamaño: 21,5 x 28 cm

Papel: propalmate de 90 gr.

Solicitud de canje

Esta publicación se ha financiado mediante la transferencia de recursos del Gobierno Nacional a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

La Academia no es responsable de las opiniones aquí expresadas.

Reservados todos los derechos. El contenido de la presente publicación no puede ser reproducido, ni transmitido por ningún procedimiento electrónico, mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética, ni registrado por ningún sistema de recuperación de información, en ninguna forma, ni por ningún medio, sin la previa autorización por escrito del titular de los derechos de explotación de la misma.

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización previa de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.

Impreso en Colombia



Portada

Título: *Memorias de una casa*

Técnica: Instalación con intervenciones
en pintura acrílica transparente.

Autora: Ana Mejía McMaster



INTERNATIONAL
YEAR OF LIGHT
2015

La atmósfera intimista del espacio arquitectónico tocado por el tiempo almacena la memoria de sus habitantes en las sombras que alguna vez fueron proyectadas en las paredes por luz que ya no está y, al tiempo, también el presente en las sombras de las rejas proyectadas por luz filtrada a través de las ventanas. La luz que estuvo y que está llena el volumen del recinto sin ser advertida. Así, no hay evolución que, bajo la luz apropiada, no revele su pasado primordial y su esplendor presente. Bella metáfora de otros fenómenos luminosos, por ejemplo, el fondo de radiación de microondas que nos revela la historia de las galaxias en la luz que percibimos desde tantos pasados como puntos luminosos observamos en el firmamento; o las luces espectrales que nos revelan los componentes íntimos de la materia y su estructura fundamental. A la vez, es metáfora de las abstracciones racionales que hacemos de nuestras impresiones visuales, permitiéndonos “(to) picture the reality to ourselves” en palabras de Einstein; y también metáfora de nuestras sensaciones psicológicas y emocionales, hasta llegar a la apreciación estética de un escenario literario, quizá lírico, un poema escrito en luz, que reúne elementos virtuales y reales para crear una escena posible para nuestros ojos. Lo real-maravilloso de la luz está allí, delante de nosotros.

Página web de la revista: www.raccefyn.co • Correo electrónico: revista@accefyn.org.co

Sede de la Academia: Cra. 28a No.39a - 63 Bogotá, Colombia • Teléfonos: (571) 244 3186 - 268 3290 - 268 2846



ISSN 0370-3908

REVISTA DE LA ACADEMIA COLOMBIANA de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Academia Colombiana de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 39 • Suplemento • Págs. 1-120 • Noviembre de 2015 • Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

Editorial

El dominio del segundo fuego

The mastery of the second fire

Román Castañeda Sepúlveda 6

Holography: origin, basic principle and applications of a revolutionary communication method in art and science

Holografía: origen, principio básico y aplicaciones de un método de comunicación revolucionario en arte y ciencia

Giorgio Matteucci 11

Microscopía holográfica digital sin lentes con resolución micrométrica y fuentes multispectrales

Digital lensless holographic microscopy with micrometric resolution and multispectral sources

Jorge Garcia-Sucerquia 20

Estudio del efecto de la relación de intensidades relativas entre la onda de referencia y la onda objeto en holografía digital

Study of the relative ratio of the intensities between the reference and the object waves in digital holography

Raúl Castañeda, Diego Hincapié, Sebastián Bedoya, Jorge Herrera-Ramírez, Jorge Garcia-Sucerquia 29

Ojo y visión: un posible origen del entrecruzamiento en el quiasma óptico

Eye and vision: A possible origin of the crosslinking in the optic chiasm

Juan Diego Vélez, Antonio Vélez 38

Encriptación óptica de información con recuperación libre de ruido

Optical encryption with noise-free recovery

John Fredy Barrera-Ramírez, Roberto Daniel Torroba 48

Protección de datos usando un sistema experimental de encriptación de correlador de transformada conjunta

Data protection using a joint transform correlator experimental system

Roberto Torroba, John Fredy Barrera-Ramírez 55

Ciencias físicas

Ciencias físicas	The spatial coherence wavelets and second-order correlation Onditas de coherencia espacial y correlación de segundo orden <i>Juan Manuel González-Toro</i> 61	61
	Propiedades ópticas de impurezas donadoras en anillos cuánticos sometidos a los efectos combinados de campo eléctrico y radiación láser intensa no resonante Optical properties of donor impurities in quantum rings under the combined effects of electric field and nonresonant intense laser radiation <i>Carlos Alberto Duque, Álvaro Morales, Miguel Mora-Ramos</i> 67	67
	Photoanodes modified with reduced graphene oxide to enhance photoelectrocatalytic performance of B-TiO₂ under visible light Fotoánodos modificados con óxido de grafeno reducido para mejorar el rendimiento fotoelectrocatalítico de B-TiO ₂ bajo luz visible <i>Andrés Fabián Gualdrón-Reyes, Angel M. Meléndez, Martha Eugenia Niño-Gómez, Vicente Rodríguez-González, María Isabel Carreño-Lizcano</i> 77	77
Ciencias naturales	Modificaciones fotomorfogénicas inducidas por la calidad de la luz en plantas cultivadas Photomorphogenic changes induced by the quality of light in crops <i>Fávor Casierra-Posada, Jaime E. Peña-Olmos</i> 84	84
Crónicas	La luz a Antioquia llegó desde Austria y perdura Light came to Antioquia from Austria and last <i>Francisco Medina-Estrada, Jorge Garcia-Sucerquia</i> 93	93
	Colombia en el Año Internacional de la Luz 2015: Conferencia Internacional <i>Enrique Forero</i> 98	98
	Conferencia Colombia en el Año Internacional de la Luz 2015 102	102
	Agradecimientos Acknowledgements 111	111
	Reseña Ana Mejía 111	111
	Enfoque y alcance Focus and Scope 112	112



INTERNATIONAL
YEAR OF LIGHT
2015

El dominio del segundo fuego

*De luz son las palabras con las que la materia habla
y también las que a menudo escucha*

En su Asamblea General de 2013, las Naciones Unidas aceptaron la recomendación de la Unesco de declarar el 2015 como “Año Internacional de la Luz y de las tecnologías basadas en ella”, para exaltar la importancia que el conocimiento de ese fenómeno físico ha tenido para la humanidad a lo largo de toda su historia, particularmente, durante el siglo XX y los albores del XXI.

Sin duda, la importancia de la luz como fenómeno natural supera en mucho nuestro interés inmediato. Los fotones fueron las primeras partículas originadas en el *Big Bang*, seguidos por las partículas masivas. Sin embargo, se convirtieron en los mensajeros cósmicos: la luz es absorbida y emitida por la materia, y tanto al absorberla como al emitirla, la materia cambia de estado, evoluciona. Su evolución queda impresa como un mensaje en la luz que emite, y este mensajero lo propaga hasta los confines del cosmos, a la máxima velocidad posible. Una parte importante del conocimiento científico actual consiste en los procedimientos y claves para descifrar tales mensajes, y así, dilucidar la historia completa del universo.

Con la luz que absorbe, la materia desencadena procesos internos que suelen modificar también el entorno. En nuestro planeta, la evolución más maravillosa de la materia en su relación con la luz es la vida, evolución que ahora sospechamos como algo posible en otros planetas. El dosel vegetal que cubrió la mayor parte de la superficie sólida de la tierra, especialmente en eras como el Cretácico Medio, operó como una gran antena de captación de luz para la fotosíntesis, un proceso vital no solo para la cadena trófica que asegura la supervivencia de los demás seres vivos, sino también para la regulación de los ciclos de lluvias, de las cuencas hidrográficas, de la renovación de la atmósfera. La luz y el agua hicieron posible la vida y la vida hizo habitable el planeta.

La fascinación que el hombre ha tenido por la luz pudo originarse en dos tipos de percepciones sensoriales: la vista y el tacto. Mucho esfuerzo hemos dedicado a la comprensión del mecanismo de la visión y a ampliar su capacidad mediante instrumentos, lo que dio lugar a la síntesis matemática de las leyes fundamentales que gobiernan el comportamiento de la luz, bautizadas como reflexión y refracción. También condujo a diferentes apreciaciones sobre la naturaleza misma del fenómeno, siendo la más arraigada en la historia aquella que concibe la luz como compuesta de partículas incommensurables. Hubo que esperar hasta la revolución científica del siglo XVII para evidenciar que la luz “también a menudo incluso ondula”, como lo señala Francesco María Grimaldi en su tratado de 1665 *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride*, y por ello se difracta cuando ilumina objetos suficientemente pequeños, un siglo y medio más para aceptar que la luz es en esencia una ondulación susceptible de distribuirse en franjas de interferencia, algo más de medio siglo adicional para comprender la naturaleza electromagnética de esa ondulación, clave para su interacción con la materia, que también tiene naturaleza electromagnética, y llegar a los albores del siglo XX para sorprendernos con el hecho de que, a diferencia de las ondas mecánicas, las luminosas no requieren de un medio material de soporte, lo que dejó sin sentido la convicción sobre la existencia del éter, cuyas raíces alcanzaron la Grecia clásica. La sorpresa fue aún mayor en el siglo XX, con el retorno imbatible de la concepción corpuscular de la luz, que se manifiesta con toda claridad en su absorción y emisión por la materia. Las explicaciones de la emisión de radiación producida por un cuerpo negro, de la absorción de radiación en el efecto fotoeléctrico y de la emisión de radiación a partir de un gas de átomos de hidrógeno, basadas todas en la apreciación de la luz como una composición de cuantos de energía electromagnética, que hoy denominamos fotones, se consideraron los avances científicos de mayor importancia en las décadas iniciales del siglo XX.

La asociación de la luz con el fuego tiene la fuerza de una constante histórica. La sensación térmica que produce, de naturaleza táctil, y su empleo para la cocción de alimentos jugó un papel definitivo en la supervivencia y el desarrollo de la especie. Mucho después vendría su aplicación a la fabricación de objetos de metal, que caracterizó la conformación de civilizaciones avanzadas. Uno de los pilares del salto tecnológico dado en el siglo XX, sin parangón en la historia de la humanidad, es el dominio de la electricidad y el magnetismo, particularmente en su manifestación por excelencia: la luz. Por su enorme potencial, pareciera justo considerar el conocimiento que hemos alcanzado sobre la luz como el “dominio del segundo fuego”.

Con esta separata especialmente dedicada a la celebración del Año Internacional de la Luz 2015, la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales se une a la efemérides mundial con la publicación de artículos inéditos de reconocidos investigadores, tanto colombianos como de otros países, en temas relacionados explícitamente con la luz. Aunque sus contribuciones constituyen una muestra puntual del amplio panorama de estudios sobre y con la luz, son en su mayoría aportes vanguardistas que ilustran particularmente el momento por el que atraviesa la investigación de esas áreas en Colombia. Se han incluido algunos artículos de cultura científica general y de crónicas para situar al lector no especializado en un contexto amplio, en el que los temas más específicos adquieren pleno sentido.

Abrimos la separata con un artículo del profesor Giorgio Matteucci, de la Universidad de Bologna (Italia), que ofrece al lector el panorama histórico de la evolución del conocimiento de la luz, el cual desemboca en el importante descubrimiento del siglo XX denominado *holografía*, con impacto tanto en la ciencia como en el arte. Plantea el profesor Matteucci que semejante esfuerzo ha sido motivado por una pulsión humana, presente en todas las etapas de la humanidad: la comunicación, e ilustra esta idea con los logros de la holografía realizada tanto con luz (holografía óptica) como con electrones (holografía electrónica).

Uno de los avances distintivos del siglo XX fue el desarrollo de la computación numérica, haciendo de los computadores elementos indispensables de los canales y redes de comunicación de datos. La holografía no fue ajena a ese desarrollo, como tampoco a su aplicación en la formación de imágenes microscópicas sin lentes. El profesor Jorge García, de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, es un líder con reconocimiento internacional en *microscopía holográfica digital* y pionero del desarrollo de estos dispositivos en el país. Con su grupo, el profesor García se ha hecho presente con dos importantes artículos, que incluyen el tema de frontera de las imágenes holográficas multiespectrales y la generalización de un criterio de control para la reconstrucción digital de imágenes holográficas.

Pero la comunicación requiere de la noción de realidad, la cual está ligada estrechamente con la del sentido de la *visión*, como lo explican los profesores de matemáticas Antonio Vélez (Universidad de Antioquia) y Juan Diego Vélez (Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín), al abordar los aspectos cognitivos relacionados con la visión desde una perspectiva de cultura científica no especializada.

Hoy en día denominamos *información* aquello que, con diferentes soportes físicos (uno de ellos la luz), fluye a través de los canales de comunicación. Desde el punto de vista técnico se invierte tanto esfuerzo en asegurar la calidad de la información como en garantizar su protección, de modo que alguien distinto al destinatario específico no pueda recibir o, en último caso, comprender la información enviada por un remitente dado. Tal esfuerzo de protección ha impulsado la novedosa disciplina de la *encriptación de la información* en lo que va corrido del siglo XXI. Referentes internacionales de la encriptación óptica son los profesores Roberto Torroba, de la Universidad Nacional de La Plata (Argentina), y John Freddy Barrera, de la Universidad de Antioquia. En los últimos años, el profesor Barrera ha sido galardonado a nivel nacional e internacional por sus contribuciones en dicho tema. Dos artículos, fruto de su colaboración, hacen parte de esta separata.

Son diferentes las escalas involucradas en los canales y redes de comunicación. La holografía óptica y la encriptación de información óptica se desarrollan usualmente en la escala de nuestras dimensiones cotidianas, pero la microscopía holográfica digital y la holografía electrónica se realizan en las escalas micro y nanoscópica. También disponemos de información luminosa a escala astronómica o estelar, que ha sido motivo de estudio desde la antigüedad. La observación detallada de estrellas y galaxias nos ha obligado a profundizar en el conocimiento de los atributos de la luz, uno de los cuales es la correlación de orden superior. El investigador Juan Manuel González, de la Fundación Universidad Autónoma de Colombia, nos informa sobre un novedoso método para analizar las sorprendentes observaciones astronómicas reportadas por primera vez a fines de los años 50, conocidas hoy como *efecto Hanbury–Brown and Twiss* (HBT).

La comprensión del fenómeno luminoso no sería completa, no obstante, si no se tiene en cuenta su interacción con la materia inorgánica y orgánica, en la que su naturaleza electromagnética y cuántica se manifiesta plenamente. El artículo del destacado profesor de la Universidad de Antioquia, Carlos Duque, y sus colaboradores, reporta el estudio teórico de un problema considerado de punta, como es el comportamiento de un anillo de propiedades específicas en presencia de campos eléctricos y luminosos; así mismo, el artículo del profesor Ángel Meléndez, de la Universidad Industrial de Santander, y sus colaboradores, aborda un tema de alta tecnología para aplicaciones que involucran la luz, mientras que el investigador Fanor Casasierra, de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, reporta el efecto de la calidad de la luz sobre las modificaciones morfogénicas de los cultivos.

No podría cerrarse una separata conmemorativa como esta sin crónicas sobre sucesos de importancia para el desarrollo de la óptica en Colombia. Los profesores Francisco Medina (Universidad de Antioquia) y Jorge García (Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín) narran el desarrollo de la óptica en Medellín, desde su iniciación con el profesor austriaco

Peter Barlai, hasta la actualidad, cuando Medellín se ha constituido como uno de los polos de mayor productividad en óptica del país. Finalmente, la invaluable crónica del Presidente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Doctor Enrique Forero, quien cuenta el hecho histórico de haber conseguido reunir a los profesores David Wineland y Serge Haroche, galardonados con el Premio Nobel de Física 2012, al lado de otros investigadores de talla mundial, así como de colombianos destacados a nivel internacional, once científicos que disertaron sobre el “Año Internacional de la Luz y de las tecnologías basadas en ella” en Bogotá y en Medellín, en un evento científico sin precedentes en nuestro país.

Con esta separata especial, la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales entrega a la comunidad científica nacional e internacional un aporte pequeño pero muy significativo al año de conmemoración del dominio del segundo fuego, la luz, por parte del hombre.

Román Castañeda Sepúlveda

Dr.rer.nat.

Editor invitado

Miembro correspondiente

Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales



INTERNATIONAL
YEAR OF LIGHT
2015

The mastery of the second fire

*Of light are the words with which matter speaks
and also those it often hears*

In its 68th session in 2013, the United Nations General Assembly accepted UNESCO's recommendation to declare 2015 as the International Year of Light and Light-based Technologies to highlight the impact that the knowledge on this physical phenomenon has had for mankind throughout its history, especially during the 20th century and the beginning of the 21st.

Undoubtedly, the importance of light as a natural phenomenon far exceeds our immediate interest. Photons, which were the first particles originated in the Big Bang, followed by massive particles, became cosmic messengers: light is absorbed and emitted by matter, which, as a result, changes and evolves. Such evolution is printed as a message in the emitted light, and this messenger propagates to the confines of the cosmos at the maximum possible speed. A very important part of the current scientific knowledge consists of the procedures and keys to decode such messages, and thus elucidate the complete history of the universe.

Using the light it absorbs, matter triggers internal processes which usually modify the environment too. The most wonderful evolution of matter in its relationship with light on our planet is life, which we now conceive as possible on other planets. The canopy that covered most of the solid surface of the Earth during the Middle Cretaceous, for example, behaved as a large antenna to capture light for photosynthesis, which is vital not only for the food chain that ensures all other living beings' survival, but also to regulate rainfall cycles, watersheds and the renewal of the atmosphere. Light and water made life possible and life made the planet habitable.

Man's fascination for light responds to two types of sensory perceptions: sight and touch. The many efforts devoted by man to understand the mechanism of vision and to expand its capacity using instruments led to the mathematical synthesis of the fundamental laws that govern light's behavior, i.e., reflection and refraction. This endeavor has also helped establish the different concepts on light nature, among which the one that conceives it as composed of immeasurable particles is the most engrained in history. We had to wait the coming of the scientific revolution during the 17th century to understand that light "*saltem aliquandi etiam undulatum*" ("sometimes also waves"), as established by Francesco Maria Grimaldi in his 1665 treaty *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride*, and that, therefore, it diffracts when it illuminates small enough objects. A century and a half later, scientists demonstrated that light is essentially a wave whose energy can be distributed in fringe patterns due to interference, and half a century elapsed before understanding its electromagnetic nature, which is the key to its interaction with matter given that the nature itself of matter is also electromagnetic. At the onset of the 20th century we were surprised with the discovery that, unlike mechanical waves, light waves do not require material support, which toppled to the ground the conviction on the existence of the ether, deeply rooted in man's mind since ancient Greece. The surprise was even greater with the rebirth of the corpuscular conception of light, clearly manifested in its absorption and emission by matter. The theories explaining phenomena such as black-body radiation, radiation absorption in the photoelectric effect, and radiation emissions from a gas of hydrogen atoms, which are based on the appreciation of light as composed of electromagnetic energy quanta known as photons, are considered as the most important scientific developments achieved in the early decades of the 20th century.

The association of light with fire is a historical constant. The thermal sensation produced by fire, of tactile nature, and its use for cooking played a crucial role in the survival and development of the human species, and, much later, its use for manufacturing metal objects characterized the formation of advanced civilizations. The 20th century technological leap has no precedents in the history of mankind, and one of its pillars is the mastery of electricity and magnetism, particularly in its manifestation par excellence: light. Because of its enormous potential, it seems fair to consider our knowledge about light as the "mastery of the second fire."

With this special issue, the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences and its journal joins in the celebration of the International Year of Light 2015. Renowned scientists from Colombia and other countries have contributed with original articles on topics and subjects explicitly related to light. Although they constitute only a grab sample of the wide panorama of studies on and with light, they are mostly avant-garde contributions that illustrate the current research status in these fields in Colombia. Some articles and chronicles on general scientific culture were also included to guide and contextualize non-specialized readers so as to aid them in fully understanding the meaning of more specialized topics.

The opening paper by Professor Giorgio Matteucci (University of Bologna, Italy) offers a historical overview of how our knowledge regarding light has led to the important discovery of holography in the 20th century and its application both in science and arts. As Professor Matteucci states, holography seems to be the result of man's need to communicate, and he illustrates this idea explaining achievements in holography using light (optical holography) and electrons (electron holography).

Computers and numerical computation are distinctive characteristics of the 20th century. They are indispensable elements to transport data through channels and networks. Holography was not indifferent to this development or to its application to microscopy lensless imaging. Professor Jorge Garcia (National University of Colombia at Medellín) is internationally recognized as a pioneer in the development of digital holographic microscopy in Colombia. Together with his group he contributed two important papers to this issue: one on the border topic of multispectral holographic imaging, and another one on the generalization of a useful control criterion for digital holographic imaging.

Communication, however, requires a notion of reality, which is closely linked to the sense of vision, as explained by mathematicians Antonio Vélez (Antioquia University) and Juan Diego Vélez (National University of Colombia at Medellín), who address the cognitive aspects of vision from the perspective of non-specialized scientific culture.

Today we conceive information as a kind of energy flowing through different physical means (one of them light) and channels. Huge technical efforts are deployed to ensure information quality and protection, so that only the intended recipient will completely and truly understand the information received from a given sender. Such effort has boosted the novel discipline of information encryption. Professors Roberto Torroba (National University of La Plata, Argentina) and John Freddy Barrera (University of Antioquia) are well-known international researchers in the field of optical information encryption. Recently, Professor Barrera has received awards both nationally and internationally for his achievements in this field, which are reflected in the two articles he has contributed to our special issue.

The dimension of the operation scale of communication channels and networks is different. Optical holography and optical information encryption are usually developed at our everyday scale dimensions, but digital holographic microscopy and electron holography are performed at micro and nanometric scales, although there is also optical information at the astronomical or stellar scale, which has been studied since ancient times. Our observation of stars and galaxies has forced us to deepen our knowledge on light attributes, one of which is high-order correlation. Researcher Juan Manuel González (University Foundation of Colombia) reports on a new method for analyzing the amazing astronomical observations reported for the first time in the late 50s and known today as the Hanbury-Brown and Twiss (HBT) effect.

Our understanding of luminous phenomena would not be complete if their interaction with inorganic and organic matter is disregarded. Such interactions fully reveal both the electromagnetic and the quantum nature of light. The contribution of the connoted Professor Carlos Duque (Antioquia University) and his colleagues regards the cutting-edge theoretical study of the behavior of a matter ring of specific properties in the presence of electrical and light fields. On the other hand, the paper contributed by Professor Ángel Meléndez (Industrial University of Santander) and his colleagues also addresses a high-technology application involving light, while researcher Fanor Casasierra (Pedagogical and Technological University of Colombia) reports on the effects of light quality on morphogenetical variations of crops.

This commemorative issue would not be complete without the chronicle on the most important events in the evolution of optics in Colombia. Professors Francisco Medina (Antioquia University) and Jorge Garcia (National University of Colombia at Medellín) give an account of the development of optics in Medellín since its inception by the Austrian professor Peter Barlai until today when the city has become an important center for optics in the country. Finally, the President of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences, Doctor Enrique Forero, offers an invaluable account of the visit to Bogotá and Medellín of the 2012 Physics Nobel Laureates, Professors David Wineland and Serge Haroche, who alongside with other world-class researchers and internationally renowned Colombian scientists spoke about the International Year of Light and Light-based Technologies during an unprecedented scientific event in our country.

With this special issue, the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences aspires to offer to the national and international scientific community a small but very significant contribution to mark the commemoration of this year dedicated to celebrate man's mastery of the second fire: light.

Román Castañeda Sepúlveda

Dr.rer.nat.

Guest Editor

Member of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences



INTERNATIONAL
YEAR OF LIGHT
2015

Holography: origin, basic principle and applications of a revolutionary communication method in art and science

Giorgio Matteucci

Department of Physics and Astronomy - University of Bologna, V/le B. Pichat, Bologna, Italy

Abstract

History of human kind shows that man has developed various communication methods such as language, art, writing, photography, etc. The most revolutionary of these methods is holography, a completely new way to look at the world around us. Here we describe how art, writing and holography, that at a first hasty analysis might be considered different unrelated disciplines, have actually an interesting common background. This include the basic men's need to transfer information as well as the contribution of a few important actors who developed the information transfer process. A short account is set of the origin and the working principle of holography against this multi-disciplinary framework. Although a large number of applications of holography has been devised, here only one example is reported to demonstrate the potential of electron holography to display pictorial maps of magnetic lines of force in matter.

Key words: Optical holography, electron holography, magnetic domains, magnetic flux lines.

Holografía: origen, principio básico y aplicaciones de un método de comunicación revolucionario en arte y ciencia

Resumen

La historia de la humanidad muestra que el hombre ha desarrollado varios métodos de comunicación como el lenguaje, el arte, la escritura, la fotografía, etc. El más revolucionario de estos métodos es la holografía, una nueva manera de mirar el mundo que nos rodea. En este artículo se describe cómo el arte, la escritura y la holografía, que en un primer análisis apresurado podrían considerarse como disciplinas diferentes y no relacionadas entre sí, tienen en realidad un interesante fondo común. Esto incluye la necesidad básica del hombre de transferir información, como también la contribución de algunos actores importantes que desarrollaron el proceso de transferencia de información. Brevemente se establecen el origen y principio de funcionamiento de la holografía frente a este marco multidisciplinar. Aunque ha sido inventado un gran número de aplicaciones de la holografía, solo reportaremos aquí un ejemplo quedemuestra el potencial de la holografía de electrones para desplegar mapas pictóricos de líneas de fuerza magnética en la materia.

Palabras clave: holografía óptica, holografía de electrones, dominios magnéticos, líneas de flujo magnético

Introduction

Imagine you are the first person entering the Altamira caves discovered in Spain or the Lascaux ones in France. Prehistoric graffiti representing an animal will unexpectedly appear in front of you. It was to favour his hunting that primitive man made the first graffiti and afterwards the first paintings inside the caverns where he lived. Very suggestive evidence was also found in central and south America as well as in the Fumane cave in Italy, almost certainly the world's oldest ones.

In 1799 close to the ruin of Fort Rashid near the River Nile a grey granite stone, later world wide known as the Stele of Rosetta, was recovered and is now at the British Museum. Due to damage caused by the elements, the central engravings

are partly unreadable. Further down, 54 lines in Greek and Greek symbols are engraved. In the upper part, 14 lines in antique Egyptian hieroglyphics, figures of human beings, birds, etc. are reproduced. It turned out that an interpretation of the message through the symbols only allowed a limited comprehension level to be reached. A developed language must be able to report suitably about facts belonging to every day life, to give a full account of logical connections and describe satisfactory abstract concepts. Both in the case of prehistoric graffiti and Egyptian hieroglyphics we are faced with messages to decipher whose correct interpretation

Corresponding author:

Giorgio Matteucci, giorgio.matteucci@unibo.it

Recibido: 30 de junio de 2015

Aceptado: 9 de septiembre de 2015

open the way towards a deeper understanding of the spirit which animated our forefathers or, even more simply, a clear understanding of the techniques used to transmit information. While in the case of the depicting of animals the message can have a fairly rapid explanation, it was far more difficult conceptually and time consuming to decode the hieroglyphics of the Stele of Rosetta.

The reader can rightly wonder what all this has to do with holography and its possibility to disclose the peculiarities of nature. It is interesting to note that two of the really brilliant minds in the last two hundred years gave a more or less direct contribution to the decoding of the information to be found on the Stele of Rosetta. One of these men was Thomas Young, born in Milverton, U.K. in 1773, six years before the finding of the Stele. A man of far-reaching cultural ideas, he was interested in mathematics and physics and graduated in medicine at Gottingen in 1795. In his lectures read before the Royal Society he supported the wave theory of light and implemented it with a new basic concept, the principle of interference. In 1814 it seems that some friends reminded Young of the problems connected with the Stele of Rosetta. Up to 1819 Young made good progress in the understanding of that document called triglot (there were three texts) but a number of reasons seem to have prevented him from doing much more to complete the undertaking. The person who contributed to solving the problem even though not directly, was the famous French mathematician, Jean Baptiste Joseph, Baron de Fourier, who was born in 1768 and had taken part in the Napoleonic expedition to Egypt as scientific adviser. Like Young, he too had a 'wave vision of nature', regarding the universe as a great organ which oscillated in a complicated way. The understanding of the single phenomena of the physical world could then be reached by trying to reduce this particular gigantic oscillation into thousands of elementary harmonic oscillations that existed in clear determined ratios. In 1801 Fourier presented the 'mystery of the Stele' to a very bright precocious fifteen year old, Francois Champollion. With incredible persistence, difficult to find in someone so young, in 1821 Champollion was able to decipher the famous document.

We have seen how two great men were able to contribute in some way to decoding the information obtained from incisions, that is, from elements which are part of reality and can be perceived directly with our main sensorial organ, the eye. In the following we will describe how, differently from the eye, holography is able to display a three-dimensional image of an object or, alternatively, maps of magnetic fields in matter. The holographic method is based fundamentally on two distinct stages (**Gabor, 1948; Hariharan, 2002; Johnston, 2006**). In the first, the information regarding the size to be examined is 'frozen' in an interference pattern of which Young could be considered the discoverer. As we shall see in the second stage, the information is decoded and processed utilizing the known properties of

the Fourier transform. After the sharpened stone chisel used to engrave the walls of the caves, the use of more sophisticated technological methods, like hammer and iron chisel inaugurated the Hellenistic period first and then the Renaissance, during which works of extraordinary worldwide acknowledged beauty were passed down in history. In the great surprising changes in the history of art which took place in Greece around the 6th century BC, the Greek artists, differently from the Egyptians, tried to improve the scenes bearing in mind how these were intended to communicate more incisively, the three-dimensional perspective both in painting and in sculpture. At the beginning of the 15th century a scientific approach to the art world was opened by Filippo Brunelleschi who discovered the geometric rules of perspective representation (**Prager, et al., 1970**). Based on mathematical laws, Brunelleschi's method allowed artists to realize two-dimensional pictures which were suggested as the most faithful imitation possible of nature and of the work accomplished by man. A completely new way to look at nature came into being. Young and Fourier, with their cultural interests and their careful precise analysis of physical phenomena had started to pave the way towards the discovery of holography. Since the Hellenistic age 2500 years passed before finally the most revolutionary method of visual communication was conceived. This was holography able to bring to our eyes 3-D images identical to those we perceive in the world we live in (**Johnston, 2006**). The extraordinary capacity holograms possess to get us to see the third dimension of a scene justifies and substantiates their utility in its most spectacular use, art. It is less known that the motivations which led Dennis Gabor in 1948 to develop the theory of holography have their basis in the deep interest he had for electron microscopy (**Gabor, 1948**). He knew that the fundamental resolution limit of a transmission electron microscope was due to spherical aberration which, since the theoretical work of Scherzer, was unavoidable with electron lenses (**Scherzer, 1936**). Gabor had probably experienced a check-mate situation, as regards the improvement of an electron microscope performance, as perhaps seen by Abbe for the light microscope. In Gabor's own words: "The fundamental development of the subject has now reached a stage beyond which progress is likely to be slow and difficult. At this point, it seems appropriate to look into the future and try to explore in imagination the avenues of further development. As this is a proverbially risky undertaking, the author is quite prepared to join the ranks of other, more illustrious prophets who have failed." (**Mulvey, 1995**). Gabor exploited his "immense cerebral information-gathering and processing ability" (**Mulvey, 1995**) to find a novel way to overcome the practical resolution limit of the electron microscope, which at that time was about 1.2 nm, with the correction of lens aberrations and, in particular, of the spherical one. A success along this line would have led to an improvement of the microscope's performance and the possibility to obtain a resolution down to atomic level. The

interesting story of how Gabor dealt with this problem is described by T. Mulvey who collaborated with Gabor and was the first together with M.E. Haine to record an electron hologram. For this reason we would like to report Mulvey's own words: "For many years Gabor struggled unsuccessfully with this problem, (that of spherical aberration, author's note), but could not get it out of his mind" (Mulvey, 1995). In the Easter holidays of April 1947 Gabor reported to have had, quite unexpectedly, a 'vision' in which "... instantaneously and without effort on my part, the complete solution of the aberration correction problem was presented to me" (Mulvey, 1995). According to Gabor the vision ran as follows: "...Take an electron image that contains the whole information (i.e., amplitude and phase) and then correct it by optical means. To record amplitude and phase, a coherent background must be supplied by the electron source. The result will be an interferogram. Photograph this and then illuminate the interferogram with coherent optical light and record the reconstructed image on a photographic plate." (Mulvey, 1995). This new imaging method was named by Gabor 'holography' from the Greek ολος (olos) meaning 'whole' and γραφειν (grafein) meaning 'to write'. "A hologram (the interferogram) would therefore record, on a single medium such as a photographic plate, the complete electron wave in amplitude and phase. No one had ever even dreamed of this before, and the term became his exclusive trademark" (Mulvey, 1995). At that time the coherence of electron sources was too poor to record reliable holograms so that electron holography entered a stage of hibernation. The invention of the laser contributed to optical reconstruction of electron holograms and mainly determined the wide spreading of optical holography delighting neophytes with three-dimensional visions of reconstructed images. A Fresnel biprism was used to separate the wave which travelled through the object from the one passing outside it (Leith & Upatnieks, 1962). This was called reference wave. Electron holography stood aloof for about 30 years until reliable coherent field emission sources became commercially available. A comprehensive survey of these events which led to the achievement of atomic resolution as envisaged by Gabor is reported in (Lichte, 1991). Here, I recall the basic principle of holography avoiding a mathematical treatment. Optical holography is now well established as a display medium and it is used in medicine, engineering, architecture, retailing, art etc. In particular, a large number of applications has been possible thanks to the development of holographic interferometry that enables the static and dynamic displacements of an optical rough surface to be measured (for a detailed treatment of the principles, techniques and application of optical holography see, (Hariharan, 2002; Jones & Wykes, 1989; Vikram, 1982; Johnston, 2006; Johnston, 2009) and references therein. It is also worth mentioning the interesting results regarding digital in-line holographic light microscopy developed to observe, with wavelength resolution, 3-D representations of

the paths followed by micro objects such as suspensions of microspheres and biological samples (cells, bacteria, etc.) and microchannel flow, motion of bubbles in microfluidic applications (Restrepo & García-Sucerquia, 2012).

In view of the multidisciplinary aspect of this article and by considering the peculiar mysterious wave behaviour of material particles, attention is given to outline the working principle of electron holography. As it is well known, Michel Faraday, in order to convey to the mind a useful pictorial idea of the magnetic flux, had devised the magnetic lines of force. Here, I will report how electron holography allows to display the existence of these lines. A new method is thus available for the investigation of magnetic field configurations in matter. In particular, the observation of the magnetization distribution, in a thin nickel film, as a function of temperature is reported. Impressive images show the decreasing of the spontaneous magnetization when the temperature approaches Curie point (Matteucci, 2006).

Materials and methods

In this chapter, the working principle of light optical holography is schematically recalled (Hariharan, 2002; Johnston, 2006) and then extended to the case of electrons. The transfer of information with the holographic method takes place with a three step process, (i) an interference pattern, named hologram; is recorded on a photographic plate; (ii) the photographic process of the hologram is carried out and finally, (iii) synthesis or descramble of information is performed. Figure 1a shows schematically the well known Young arrangement to produce an interference pattern. S is a coherent source of light, 1 and 2 are two circular apertures on an otherwise absorbing screen. In the plane P interference fringes are obtained whose visibility is related to the coherence of the source. Let us introduce now, along the path of one of the two waves of figure 1a, an object O. The wave scattered from the sample, called object wave, will undergo a phase shift with respect to the wave coming from hole 1. This last wave is named reference wave. The interference patterns recorded with this method are off-axis holograms because the object and the reference wave do not travel along the same direction as originally proposed by Gabor, but are tilted at a slight angle. While in a standard image-recording process (i.e. photography) the phase information is lost, through a 'Young type experiment' both amplitude and phase of the object are 'frozen' in the interference fringes. Synthesis or descramble of information is performed by illuminating the developed plate DP containing the hologram with a reconstruction wave RW having the same inclination as the reference beam during the hologram recording, figure 1b. The intensity distribution of the interference pattern acts as a diffraction grating for the incoming light. Behind the plate the illuminating wave emerges and, as a consequence, also the object wave spreads out of the hologram and is seen by the eye E as a 3-D reconstructed image RI, identical to the 3-D object. A hologram behaves like a window

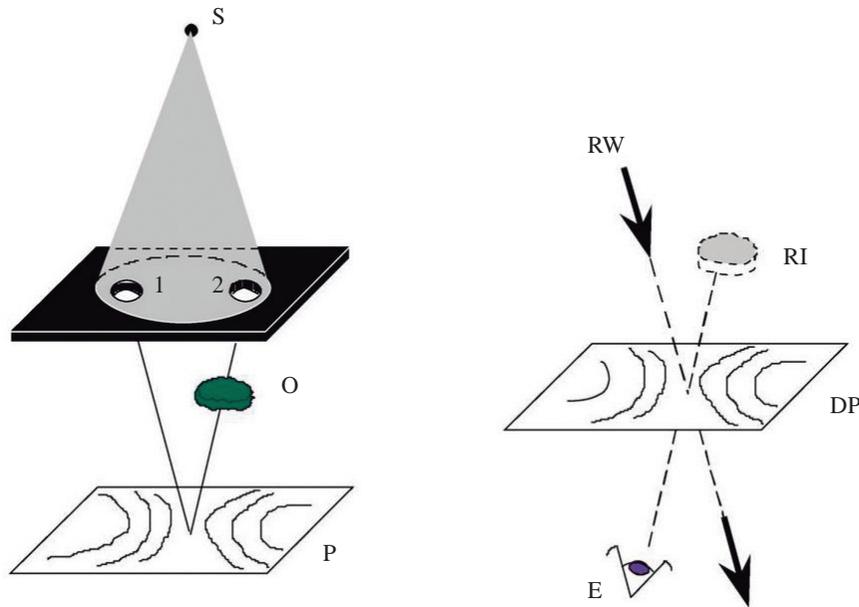


Figure 1. Outlines of the Young interferometer. (a) S, coherent light source; 1 and 2, apertures in a metal screen; O, object; P, observation plane. (b) schematic reconstruction of the object wavefront. RW, reconstruction wave; DP, developed plate; E, observer's eye; RI, reconstructed image of the object of (a).

through which the object can be observed. These general considerations, although very schematic, are still valid for radiations of any wavelength and also most important for matter wave. Moreover, the wavelength of the radiation or of particles used for holographic recording can be many orders of magnitude different from that employed for image reconstruction.

Now the recording and processing of electron holograms are briefly reviewed. These holograms are recorded mainly by means of an electron microscope equipped with an electrostatic biprism (Moellenstedt & Dueker, 1956) The biprism is realized by placing a thin charged wire W between two grounded plates, figure 2, and is located below the back focal plane of the objective lens (not drawn for simplicity). The wire splits the wave-front of the incoming coherent electron beam EB and its electrostatic field produces a deflection and a subsequent overlapping, in the observation plane OP, of that part of the wave which has travelled through the object (object wave Ow) and the other part of the wave which has passed outside the sample (reference wave Rw). Because the width of the overlapping region and the interference fringe spacing can be controlled by varying the charge on the wire, with an external voltage supply, it is possible to observe holograms on OP and to record them on a photographic plate PP or with a CCD camera. If the interference fringes are superimposed on an in-focus image of the specimen, then this interferogram is named off-axis image electron hologram. As shown in figure 2, the standard arrangement uses only one half of the object plane for the specimen S, illuminated by EB, while the reference

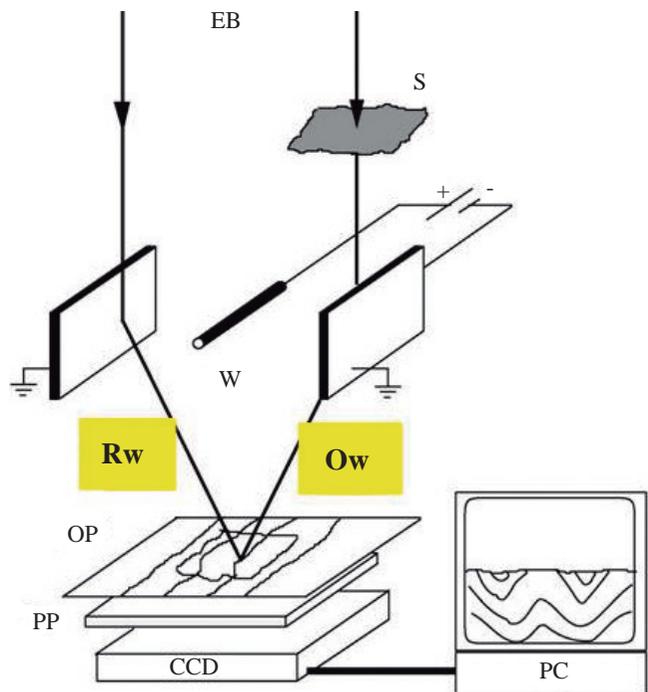


Figure 2. Realization of off-axis electron holography. EB, electron beam; S, specimen; W, biprism central wire; Rw, reference wave; Ow, object wave; OP, observation plane; PP, photographic plate; CCD, CCD camera connected to a computer for hologram processing.

beam goes through the other half plane. The recovering of information contained in the hologram can be realized by optical or digital means. These latter methods are generally

used because of the great advantages they offer with respect to optical techniques (for a detailed description of electron holography and its applications see, **Tonomura, 1999; Tonomura, et al., 1995; Voelkl, et al., 1999; Matteucci, et al., 2002; Lichte & Lehmann, 2008**). However, we will briefly describe the optical method for historical reasons, since it was used in the pioneer work on electron holography, but mainly for the instructional purposes of this article. The plate on which an electron hologram is recorded is first developed and then inserted in an optical bench and illuminated by a coherent laser wave, figure 3. In the hologram H an in-focus image of the object (the image of a frog is used only for pictorial purpose) is superimposed to an interference fringe system. This is basically a co-sinusoidal grating which causes the diffraction of the laser beam LB incident on it. Generally speaking, from the plane of the hologram the wave propagates and at each subsequent point in space it can be determined by means of the Kirchoff integral. The size of the optical system is reduced when a lens L (reconstruction lens) is located behind the hologram H as reported in figure 3. In the back focal plane of L three beams are focused which are the Fourier transform of the intensity distribution of the hologram H. In addition to the straight through beam $\langle 0 \rangle$, two sidebands are displayed which represent the Fourier spectrum of the image wave i.e. $\langle 1 \rangle$ and its conjugate $\langle -1 \rangle$. The hologram fringe spacing must be small enough to obtain the separation of the three beams in the focal plane of L where the $\langle 1 \rangle$ sideband is isolated by means of a spatial filter F. Allowing a free propagation of the wave from the focal plane onwards, the inverse Fourier transform is performed on a viewing screen V where an exact optical replica of the object wave function is obtained which can be subsequently processed by well established optical techniques. This is the ingenuity and originality of Gabor's idea. As suggested by Gabor, for a reconstruction of a high resolution image wave, the compensation of the aberrations could be performed using a suitable phase plate inserted in the back focal plane of L. However, this is a very challenging task because of the inherent difficulty in

preparing a suitable correction plate matching precisely all the parameters related to the wave aberrations (**Tonomura, 1999; Lichte & Lehmann, 2008**). Today, however, image reconstruction by numerical methods presents considerable advantages with respect to the light optical technique and the effects of aberration correction at high resolution has been demonstrated by numerical image processing of digitized holograms (**Lichte & Lehmann, 2008**). In this case the Fourier transform of the hologram is taken and a sideband which corresponds to the object wave is chosen. From this wave function the lens aberration term can be eliminated in principle by multiplication with the inverse of the aberration phase factor. The amplitude and phase of the true object wave can be finally obtained by a subsequent Fourier transform (**Lichte, et al., 2009**). In this way, Gabor's original idea to overcome the resolution limit of an electron microscope has been realized. Using off-axis holography in an aberration-corrected transmission electron microscope a resolution of a few picometers has been demonstrated (**Harada, et al., 2004; Akashi, et al., 2015**). However, for our purposes, only low resolution holograms are used so that the whole processing of holograms is greatly simplified.

To convey a general idea of the potential of electron holography for the investigation of electromagnetic field in matter, the process of image formation in an electron microscope is briefly reviewed together with the method of holographic interferometry (**Hariharan, 2002**) used to extract the information content of the electron wave which has gone through the sample under investigation. For a detailed treatment of the material reviewed in this section see references (**Tonomura, 1999; Tonomura, et al., 1995; Voelkl, et al., 1999; Matteucci, et al., 2002; Lichte & Lehmann, 2008**). The process of image formation in an electron microscope is schematically described by assuming that, (i) electrons propagate as a plane wave from the source to the specimen, (ii) electrons go through the specimen, propagate through the microscope lenses and are detected by a photographic plate or an in-line electronic image read-out device. By considering only

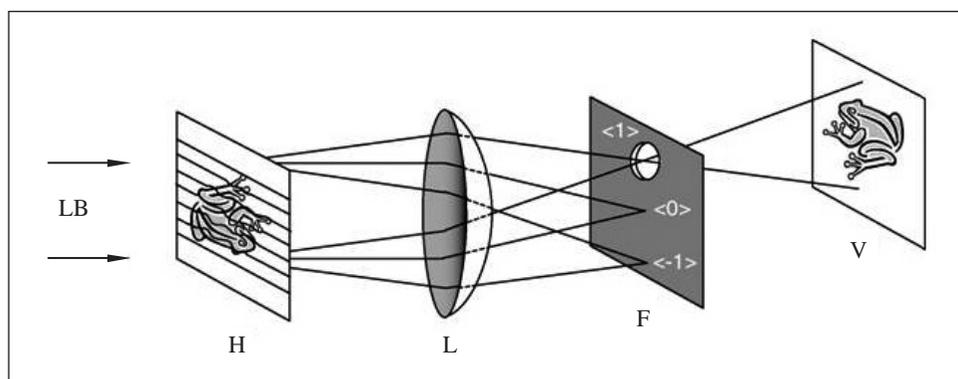


Figure 3. Diagram for hologram reconstruction. H, electron hologram illuminated by a parallel laser beam, LB; L, reconstruction lens; F, filtering aperture; V, viewing screen.

elastic scattering events, the interaction of the electron beam with the specimen can be described through a complex transmission function $O(r)$. In the standard phase object approximation, $O(r)=\exp[i\phi(r)]$, where $r=(x,y)$ is a 2-dimensional vector perpendicular to the optic axis z which is parallel and in the same direction as the electron beam. The phase term $\phi(r) = \pi/\lambda E \int V(r,z)dz - 2\pi e/h[A_z(r,z)] dz$. The integrals are taken along trajectories parallel to the optical axis z inside and outside the specimen to include stray fields. $V(x,y,z)$ and $A_z(x,y,z)$ are, respectively, the electrostatic potential and the z component of the vector potential. λ , h , e and E are, respectively, the electron wavelength, the Planck constant, the absolute value of the electron charge and the accelerating voltage in the non-relativistic approximation. Since the information is mainly encoded in the phase, it is important to recall that, contrary to the optical case where 3-dimensional effects are strikingly impressive, only essential 2-dimensional information is available in transmission electron microscopy. In fact in the electric case, ϕ is proportional to the potential averaged along the electron path whereas, in the magnetic case, the maximum information encoded in the beam corresponds to the magnetic flux enclosed between two electron trajectories. The most widespread use of electron holography is in the study of electric and magnetic fields down to a nanoscale (Tonomura, *et al.*, 1995; Tonomura, 1999; Voelkl, *et al.*, 1999; Matteucci, *et al.*, 2002; Lichte, & Lehmann, 2008; Dunin-Borkowski, *et al.*, 2004; Park, *et al.*, 2014). This possibility was not even envisaged by Gabor. Although the reconstruction of a wave front can be completely achieved by holographic technique the eye or a detector, placed in the plane V of figure 3, records only the intensity of the object wave function while the phase is once again lost. To recover the phase information content, holographic interferometry technique is used. It is based on the interferometric comparison of two or more waves of which, at least one, is holographically reconstructed. As schematically shown in figure 4a the reconstructed object wave front ROW is made to interfere with a plane wave PW while both waves propagate in the same direction. The new interference pattern obtained under this condition is named contour map, figure 4b. Its basic feature is that the contour lines, overlapping to the reconstructed image of the object (not shown), connect points in the sample which have suffered the same phase shift. In optics, the contour lines are representative of the changes of the physical quantities of the object under investigation such as rotation, vibration, temperature and position variations, etc. In electron holography the contour maps are interpreted in terms of electric or magnetic field distributions accordingly to the kind of sample under investigation. For example, when the sample is chemically homogeneous, diamagnetic and of varying thickness, the contour fringes are lines of constant thickness.

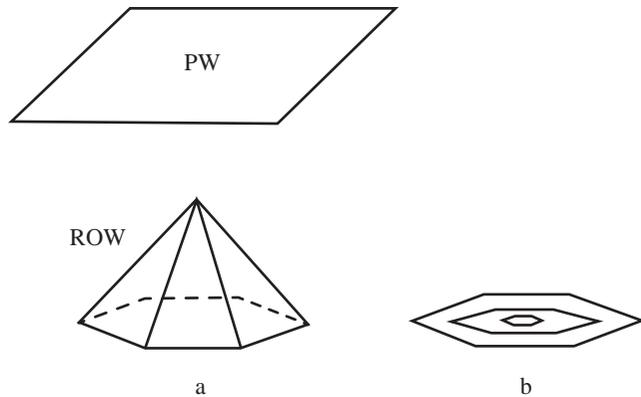


Figure 4. Illustration of the working principle of holographic interferometry. (a) PW, plane wave; ROW, reconstructed object wavefront;. (b) contour map resulting from the interference between ROW and PW.

Results

Although electron holography has been applied to obtain maps of electric and magnetic fields in thin films (Matteucci, *et al.*, 2002; Harada, *et al.*, 2004; Lichte, *et al.*, 2007; Lichte, & Lehmann, 2008; Lichte, *et al.*, 2009; Park, *et al.*, 2014); here we report only an example regarding the study of the change of the magnetization versus temperature in a thin film (Matteucci, 2006). Let us consider a magnetic sample of constant thickness and transparent to electrons. An electron wave which interacts with a this specimen suffers local phase shifts $\phi = 2\pi eF/h$ which depend on the magnetic flux F enclosed between interfering electron trajectories. Those electrons which have crossed the specimen at different points and have suffered the same phase shift with respect to the reference wave embrace a constant magnetic flux. The loci of points which have undergone the same phase shift are displayed as lines in the contour map, as schematically shown in figure 4b. A phase difference $\Delta\phi = 2\pi$ between two adjacent contour lines is produced by an enclosed magnetic flux, $h/e=4.1\times 10^{-15}$ Wb. Therefore, the contour fringes are directly interpreted as magnetic flux lines. A qualitative and quantitative interpretation of the contour maps of magnetic specimens is thus obtained. For a suitable interpretation of the experimental images it is worthwhile recalling that, for a first approximation, the magnetic properties of a sample can be schematically described by assuming the existence of small regions, called domains, each spontaneously magnetized. As shown in figure 5, a sample may consist of domains D , with different magnetization directions indicated by the arrows, separated by narrow regions (thick black lines) named domain walls, DW. Across the walls the magnetization changes its direction. Figure 6 reports the contour images of the same area of a thin nickel film at various temperatures. The rim of the specimen runs almost horizontally and divides the image into two parts. The investigated area of the sample is confined in the half

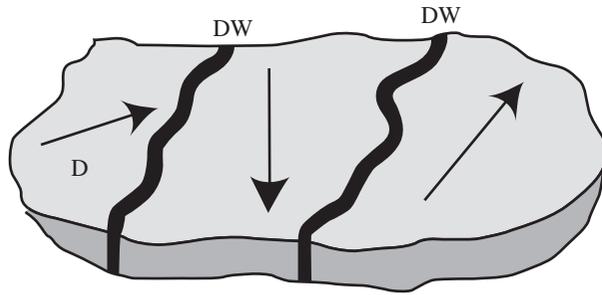


Figure 5. Schematic magnetization arrangement in a thin film. D, magnetic domains; DW, domain walls. The arrows in the domains show the magnetization directions.

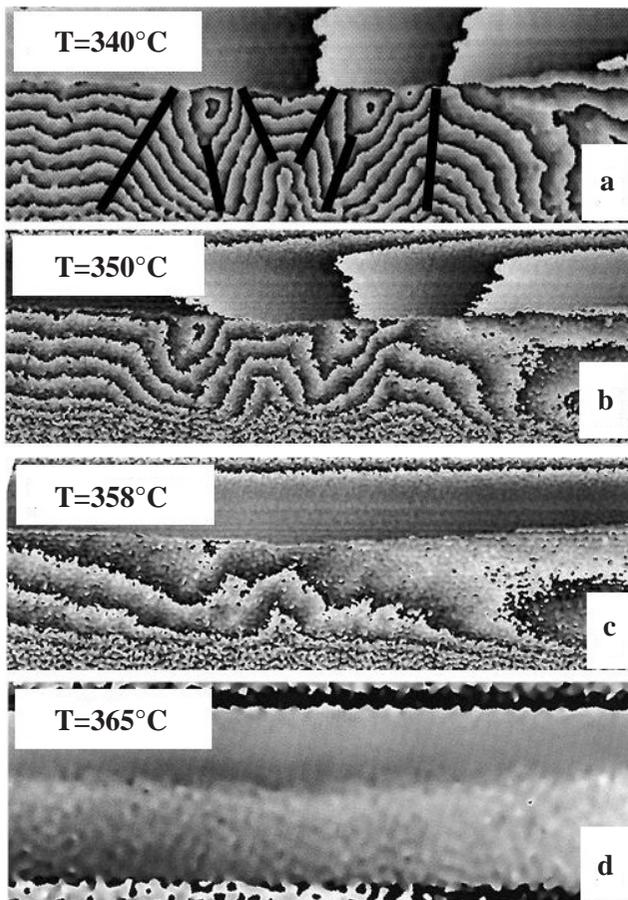


Figure 6. Contour maps of the magnetic flux lines in a thin nickel film at various temperature, (a) 340°C; (b) 350°C; (c) 358 °C; (d) 365°C. All images are shown in the same scale: 7mm=1µm.

lower part where a number of bright and dark bending lines are visible. Six black, thick straight lines have been drawn to indicate the position and trend of six magnetic walls. Above the specimen rim there is a vacuum region, through which the reference wave propagates. The white wavy lines or alternatively the black ones, can be interpreted as magnetic flux lines through the specimen or, instead, as leakage field

lines outside it (only two of them are visible above the rim of the sample). Between two adjacent lines a flux h/e is enclosed. Therefore, by counting the number of lines in a given region of the sample the total magnetic flux through that area can be evaluated. The location and shape of the magnetic domain walls of the sample is revealed where the direction of the magnetization lines changes abruptly. As is well-known, the magnetization of a sample, produced without the action of an external magnetic field, is called spontaneous magnetization. As the temperature increases, the arrangement of the spins is affected by thermal movement which results in a decrease of the spontaneous magnetization in accordance with the Weiss-Curie law. At a certain temperature, named Curie point, the arrangement of the spins becomes completely random and the spontaneous magnetization vanishes. Figure 6a, shows the trend of the magnetization at 340°C, (the precision of the heating stage is 1°C). At this temperature, the magnetic flux through the sample is slightly decreased with respect to that of room temperature. Figure 6b shows that a strong decrease of the magnetization of about 50% (the number of the magnetic flux lines through the same area halves) takes place when the sample temperature reaches 350°C. A further reduction of the magnetization occurs at 358°C, figure 6c, close to the Curie transition temperature (for a bulk sample is about 358°C). At this temperature only a couple of magnetic lines are still visible. Finally, figure 6d shows clearly that no magnetic field line is displayed when the sample temperature is 365°C, i.e. a few degrees above the Curie point. The transition of the sample from the ferromagnetic to the paramagnetic state has taken place. It is worthwhile mentioning that also with standard Lorentz electron microscopy techniques it is possible to observe the washing out of the domain walls. However the advantage of the holographic method allows a direct visualization of the magnetization direction through the domains and a measurement of the remaining flux around the Curie point. As an example, on the left part of figure 6c, three white lines or alternatively three dark ones are revealed. Since between two successive lines a flux h/e is enclosed, the remanent flux through that area of the sample is $F=3h/e$, i.e. about 12×10^{-15} Wb. From the knowledge of the magnetic flux F , the thickness t of the sample (about 50nm), the width w of the sample area (about 2µm), the average value of the magnetic field is estimated, $B=F/wt \approx 0.1T$.

Conclusions

In the celebration of the International Year of Light 2015 an approach to electron holography has been presented keeping an eye open to possible interconnections between two, so it would seem, uncorrelated fields as those of the fine arts and science where the Young and Fourier contributions play important roles. In the same way as painters use appropriate brush strokes to represent the particulars of the scenes they want to record, holography makes use of the ‘Young lines’, that is lines of different intensity

and curvature where the whole information of the wave coming from the object is stored. Fourier mathematical methods are subsequently applied to extract the whole information content of the object wave. An unusually wideranging subject, holography has attracted competing interpretations of intellectual novelty and technological application. A collaborations between artists and scientists has stimulated the use of this technique artistically as witnessed by the museum collections and exhibits from 1964 to the end of the twentieth century (**Johnston**, 2006; **Johnston**, 2009). As a case study, we have presented an application of electron holography not even envisaged by Gabor. It regards the possibility to display magnetic flux lines in materials in analogy with the magnetic lines of force devised by Faraday to convey a full and pictorial idea of the magnetic field to the mind. The study of, (i) the magnetic field around micro tips used in magnetic force microscopy (**Matteucci**, *et al.*, 1994; **Matteucci**, *et al.*, 2004), (ii) the magnetic field in magnetostatic bacteria (**Dunin-Borkowski**, *et al.*, 1998), (iii) two-dimensional arrays of naturally occurring magnetite crystals in minerals etc., (**Dunin-Borkowski**, *et al.*, 2004) are a few further examples showing how electron holography may contribute to study magnetic field configurations down to nanoscale.

Conflict of interests

The author declares no conflicts of interests.

References

- Akashi, T., Takahashi, Y., Tanigaki, T., Shimakura, T., Kawasaki, T., Furutsu, T., Shinada, H., Muller, H., Haider, M., Osakabe, N., and Tonomura, A.** 2015. Aberration corrected 1.2-MV cold field-emission transmission electron microscope with a sub-50-pm resolution. *Appl. Phys. Lett.* **106**: 074101.
- Dunin-Borkowski, R.E., Kasama, T., Wei, A., Tripp, S.L., Hýtch, M.J., Snoeck, E., Harrison, R.J., Putnis, A.** 2004. Off-axis electron holography of magnetic nanowires and chains, rings, and planar arrays of magnetic nanoparticles. *Microscopy research and technique*. Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company. **64**: 390-402.
- Dunin-Borkowski, R.E., McCartney, M.R., Frankel, R.B., Bazylinski, D.A., Posfai, M., Buseck, P.R.** 1998. Magnetic microstructure of magnetotactic bacteria by electron holography. *Science*. **282**: 1868-1870.
- Gabor, D.** 1948. A new microscopic principle. *Nature*. **161**: 181-183.
- Harada, K., Tonomura, A., Matsuda, T., Akashi, T., Togawa, Y.** 2004. High-resolution observation by double biprism holography. *J. Appl. Phys.* **96**: 6097-6102.
- Hariharan, P.** 2002. *Basic of holography*. Cambridge University Press.
- Johnston, S. F.** 2006. *Holographic Visions: A History of New Science*. Oxford University Press.
- Johnston, S. F.** 2009. Representing Holography in Museum Collections. *Illuminating Instruments*. Smithsonian University Press, Washington DC. Ch **6**: 97-116.
- Jones R. & Wykes, C.** 1989. *Holographic and Speckle Interferometry*. Cambridge University Press.
- Leith, E.N. & Upatnieks, Y.** 1962. Reconstructed wavefronts and communication theory. *J. Opt. Soc. Am.* **52**: 1123-1130.
- Lichte, H.** 1991. Image plane off-axis electron holography of atomic structures. *Advances in optical and electron microscopy*. Academic, London. **12**: 25-91.
- Lichte, H., Geiger D., Linck, M.** 2009. Off-axis electron holography in an aberration-corrected transmission electron microscope. *Phil. Trans. R. Soc. A* **367**: 3773-3793.
- Lichte, H., Formanek, P., Lenk, A., Linck, M., Matzeck, C., Lehmann, M., Simon, P.** 2007. Electron Holography: Applications to Materials Questions. *Annu. Rev. Mater. Res.* **37**: 539-588.
- Lichte, H. & Lehmann, M.** 2008. Electron holography—basics and applications. *Reports on Progress in Physics*. **71**: 016102.
- Matteucci, G.** 2006. Direct observation of the spontaneous magnetization near the Curie point of a thin nickel film by electron holography. *Phil. Mag. Lett.* **86**: 81-87.
- Matteucci, G., Frost, B.G., Medina, F.** 2004. Study of the field around magnetic force microscopy probes using electron holography. *Ultramicroscopy*. **99**: 95-102.
- Matteucci, G., Missiroli G.F., Pozzi, G.** 2002. Electron holography of long-range electrostatic fields. *Advances in Imaging and Electron Physics*. Elsevier Science, USA. **122**: 173-249.
- Matteucci, G., Muccini, M., Hartmann, U.** 1994. Flux measurements on ferromagnetic microprobes by electron holography. *Physical Review B*: **50**: 6823-6828.
- Moellensted, G., Dueker, H.** 1956. Beobachtungen und messungen an biprisma-interferenzen mit electronenwellen. *Z. Physik*. **145**: 377-397.
- Mulvey, T.** 1995. Gabor pessimistic 1942 view of electron microscopy and how he stumbled on the Nobel Prize. *Advances in Imaging and Electron Physics* (Academic Press). **91**: 259-283.
- Park, H. S., Yu, X., Aizawa, S., Tanigaki, T., Akashi, T., Takahashi, T., Matsuda, T., Kanazawa, N., Onose, Y., Shindo, D., Tonomura, A., and Tokura, Y.** 2014. Observation of the magnetic flux and three-dimensional structure of skyrmion lattices by electron holography. *Nature Nanotech.* **9**: 337-342.
- Prager, F.D., Scaglia G.** 1970. *Brunelleschi: Studies of His Technology and inventions*. Cambridge, Mass.: M.I.T. Press.
- Restrepo, J.F., García-Sucerquia, J.** 2012. Automatic three-dimensional tracking of particles with high numerical aperture digital lensless holographic microscopy. *Optics Letters*. **37** (4): 752-754.
- Scherzer, O.** 1936. Ueber einige Fehler von Electronenlinsen. *Z. Physik*. **101**: 593-598.

Tonomura, A. 1999. Electron Holography. 2nd Ed. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Tonomura, A., Allard, L.F., Pozzi, G., Joy, D.C., Ono, Y.A. 1995. Electron Holography. Elsevier, Amsterdam. (The authors are editors of this book which collects articles of different authors).

Vikram, C.S. 1982. Particle Field Holography. Cambridge University Press.

Voelkl, E., Allard, L.F., & Joy, D.C. 1999. Introduction to Electron Holography. Kluwer Academic/Plenum Publishers, NY. (The authors are editors of this book which collects articles of different authors).



No hay pura luz
ni sombra en los recuerdos:
éstos se hicieron cárdena ceniza
o pavimento sucio
de calle atravesada por los pies de las gentes
que sin cesar salía y entraba en el mercado

Pablo Neruda (1904 - 1973)

Microscopía holográfica digital sin lentes con resolución micrométrica y fuentes multispectrales

Jorge Garcia-Sucerquia

Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Física, Medellín, Colombia

Resumen

Se presenta en este trabajo la microscopía holográfica digital sin lentes (MHDSL) como una metodología de formación de imágenes con resolución micrométrica sin el uso de lentes y el uso de fuentes multispectrales. Los principios y desarrollos recientes en el dominio de esta metodología de microscopía son expuestos desde la perspectiva de los aportes realizados por nuestro grupo. MHDSL operando a color y con láseres de femto segundos son los avances resaltados en este trabajo. Los efectos de la coherencia espacial y temporal de la fuente de iluminación en el desempeño del MHDSL son analizados por medio de la comparación de las imágenes reconstruidas del microscopio usando un LED o un láser mode-locked Ti:Sa laser de 12 fs. Una sección de la cabeza de una mosca *Drosophila melanogaster* se utiliza como muestra con una compleja estructura interna.

Palabras clave: microscopía holográfica digital sin lentes, láser de femto segundos, *Drosophila melanogaster*, coherencia.

Digital lensless holographic microscopy with micrometric resolution and multispectral sources

Abstract

Digital lensless holographic microscopy (DLHM) as an imaging architecture with micrometer spatial resolution and operating with multispectral sources is shown. The principles and recent advances in the realm of this technology of microscopy are presented from the point of view of the contributions of our group. DLHM operating a full color and with femto-second lasers are the advances highlighted in this work. The effects of the spatial and the temporal coherence of the light source on the performance of the DLHM are analyzed by comparing the reconstructed images of the microscope by using a LED and a 12 fs mode-locked Ti:Sa laser. A section of the head of a *Drosophila melanogaster* fly is utilized as a sample with complex internal structure.

Key words: Digital lensless holographic microscopy, femto second laser, *Drosophila melanogaster*, coherence.

Introducción

La holografía es una técnica de formación de imágenes en dos pasos que permite recuperar la amplitud y la fase del frente de una onda llamada *objeto* (Goodman, 2005). En un primer paso, denominado *registro*, se almacena el patrón de interferencia entre la onda objeto y una onda de *referencia* de la cual se conoce su amplitud y fase. A partir de este registro de intensidad, denominado *holograma*, se puede recuperar la amplitud compleja de la onda objeto en la segunda etapa de la holografía, denominada *reconstrucción*. En su concepción original de configuración en línea (Gabor, 1948; Gabor, 1949; Gabor, 1951), la holografía no fue una técnica con gran acogida debido a las limitaciones que presenta en términos de la superposición de las llamadas *imágenes gemelas* y *orden cero* (Goodman, 2005), lo cual dificultaba la observación de la imagen reconstruida. Se inventó entonces una configuración de holografía fuera de eje que alivió dicha superposición e impulsó el uso de la holografía (Leith and Upatnieks, 1964).

Mientras que el proceso de registro del holograma se puede modelar como una superposición en amplitud de las ondas objeto y referencia, el proceso de reconstrucción se puede entender como la difracción que una onda sufre en el holograma, entendido éste como una red difracción. Este entendimiento unido a la posibilidad de la manipulación digital de la información del holograma registrado (Goodman and Lawrence, 1967), abrió un nuevo espectro de oportunidades para la holografía y marcó la génesis de lo que hoy se conoce como *holografía digital* de la cual se reconoce su consolidación a mediados de los noventas (Schnars, 1994). El mundo digital permitió la visualización y cuantificación de la amplitud y la fase de la onda reconstruida y dotó la holografía de un conjunto nuevo de herramientas lo que significó un conjunto adicional de

Correspondencia:

Jorge Garcia-Sucerquia, jigarcia@unal.edu.co

Recibido: 13 de mayo de 2015

Aceptado: 21 de septiembre de 2015

posibilidades por la versatilidad que brinda el mundo digital. Por ejemplo, fue posible remover las limitaciones que hacían la arquitectura en línea de Gabor una configuración poco atractiva, reviviendo el interés en esta simple, pero robusta arquitectura.

El mundo de la holografía digital eliminó la necesidad del procesado químico de las películas en las que se registraban los patrones de interferencia de los cuales se recuperaba la información del objeto de interés. El precio pagado por esta característica fue una reducida calidad de las imágenes recuperadas, plagadas de ruido de speckle (García-Sucerquia, Ramírez, *et al.*, 2006) y con la necesidad de magnificar los patrones de interferencia para posibilitar el grabado de los patrones de interferencia en los medios de registro digital disponibles en el mercado (Kreis, 2002). Se optó por configuraciones fuera de eje con reducidos ángulos entre las ondas de referencia y objeto (entre cero y tres grados) (Schnars, 1994; Picart and Leval, 2008), el uso de sistemas de magnificación de los patrones de interferencia (Cuche, Bevilacqua, and Depeursinge, 1999), o configuraciones en eje en las cuales la magnificación del patrón de interferencia se logra por la iluminación de la muestra con una onda esférica y la propagación en el espacio libre, tanto para electrones (Barton, 1988; Fink, *et al.*, 1991) como para fotones (Kreuzer, *et al.*, 1995; Jorge García-Sucerquia, Xu, *et al.*, 2006). Esta última opción fue la génesis de una técnica de microscopía sin lentes que inicialmente se conoció con el nombre de microscopía holográfica digital en línea (García-Sucerquia, Xu, *et al.*, 2006) y hoy se conoce como microscopía holográfica digital sin lentes (MHDSL). En este artículo se presentan los principios y algunos desarrollos de la MHDSL operando con múltiples longitudes de onda, desde la perspectiva de los aportes realizados por diversos grupos de trabajo coordinados por el autor del presente manuscrito.

Microscopía Holográfica Digital Sin Lentes (MHDSL)

La MHDSL es una metodología de formación de imágenes en dos etapas: i) el registro y, ii) la reconstrucción (García-Sucerquia, Xu, *et al.*, 2006; Jericho and Kreuzer, 2011). Para el registro la muestra es iluminada con ondas esféricas para garantizar la magnificación del patrón de difracción en el espacio libre y ser posible su registro en una cámara digital comercial. Para generar la onda esférica, una fuente de luz monocromática usualmente un láser de longitud de onda λ , es focalizada sobre un agujero con un diámetro del orden de λ . De esta forma la muestra, ubicada a una distancia z del agujero, es iluminada por ondas esféricas altamente coherentes. La porción de onda débilmente esparcida por la muestra, conocida como onda *objeto*, interfiere sobre la superficie del sensor digital, ya sea una cámara CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) o CCD (charge-coupled device), con la porción de la onda no esparcida, denominada onda de *referencia*. El sensor digital es posicionado de forma tal que su centro se encuentra a una distancia L del agujero. La intensidad registrada por el sensor digital, llamada *holograma en línea*, se transfiere a un PC para su procesamiento. En la Figura 1 se ilustra la etapa de registro de la MHDSL.

El holograma en línea se puede escribir como la superposición en amplitud de la onda objeto $U_{scat}(r)$ y la onda de referencia $U_{ref}(r)$:

$$I(r) = |U_{scat}(r)|^2 + |U_{ref}(r)|^2 + [U_{scat}(r)U_{ref}^*(r) + U_{scat}^*(r)U_{ref}(r)]. \quad (1)$$

De acuerdo a la ecuación (1) la intensidad registrada por la cámara digital incluye los términos del orden cero de difracción $|U_{scat}(r)|^2 + |U_{ref}(r)|^2$ los cuales hicieron impráctico el invento de Gabor (Gabor, 1948). La MHDSL resuelve esta dificultad por medio de la resta punto a punto de la irradiancia de la onda de referencia, correspondiente a la intensidad registrada sin la muestra presente, de la

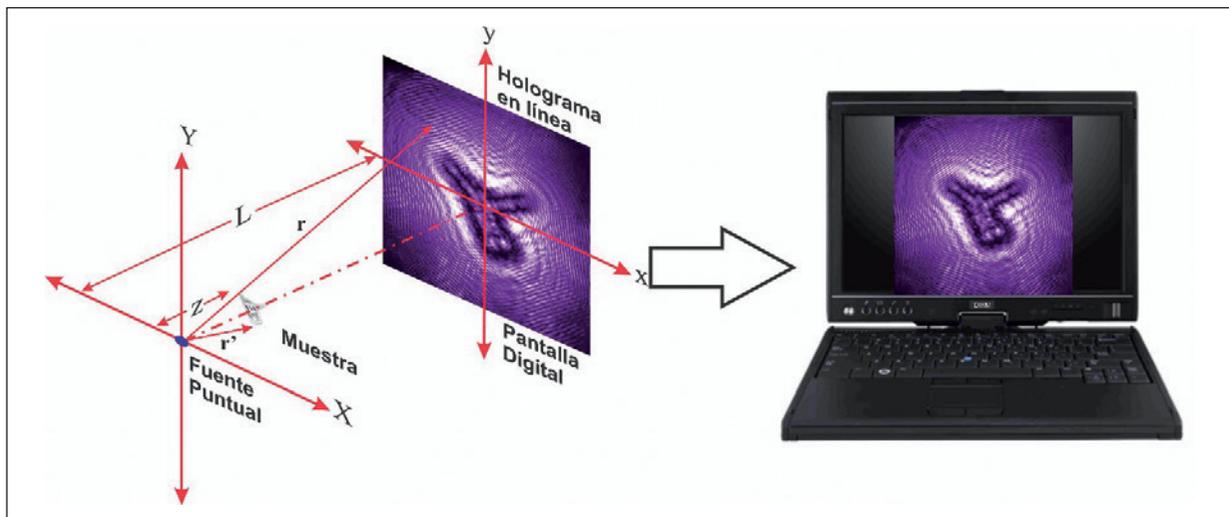


Figura 1. Etapa de registro en la microscopía holográfica digital sin lentes (MHDSL).

intensidad presentada en la ecuación (1). Si adicionalmente se considera que la intensidad de la onda esparcida por el objeto es despreciable, se arriba a un nuevo holograma que denominamos *holograma de contraste* y tiene la forma:

$$\tilde{I}(\mathbf{r}) = [U_{scat}(\mathbf{r}) U_{ref}^*(\mathbf{r}) + U_{scat}^*(\mathbf{r}) U_{ref}(\mathbf{r})]. \quad (2)$$

Esta distribución de intensidad contiene la información de la onda objeto y la onda de referencia en su forma de imágenes gemelas (Goodman, 2005), las cuales no presentan problema alguno en el proceso de reconstrucción de los hologramas de contraste, como se ha demostrado en varias publicaciones (Garcia-Sucerquia, Xu, et al., 2006; Jericho and Kreuzer, 2011; Garcia-Sucerquia, 2013).

En la etapa de reconstrucción, la onda objeto, la cual porta la información de la muestra, es recuperada a partir del cálculo numérico del proceso de difracción que la onda conjugada de referencia sufre cuando ilumina el holograma de contraste. Ya que en MHDSL la onda de referencia es esférica, este proceso se puede describir matemáticamente por medio de la transformada de Kirchoff-Helmholtz (Barton, 1988; Garcia-Sucerquia, Xu, et al., 2006; Jericho and Kreuzer, 2011):

$$U(\mathbf{r}') = \int_{\sigma} \tilde{I}(\mathbf{r}) \exp \left[ik \left(\frac{\mathbf{r}' \cdot \mathbf{r}}{|\mathbf{r}'|} \right) \right] d^2 r. \quad (3)$$

En la ecuación (3) la integración se extiende sobre la superficie de la pantalla σ , cámara CCD o CMOS, con coordenadas $\mathbf{r} = (x, y, L)$, $k = 2\pi/\lambda$ es el número de onda; $\tilde{I}(\mathbf{r})$ es el holograma de contraste; y $\mathbf{r}' = (x', y', z_r)$ son las coordenadas en el plano de reconstrucción. $U(\mathbf{r}')$ es una cantidad compleja que puede ser calculada en varios planos de reconstrucción a diferentes distancias z_r del agujero; esta opción permite recuperar la información tridimensional de la muestra o equivalentemente, la onda esparcida por el espécimen en diferentes planos. Esta operación se hace enteramente de forma numérica a partir de un holograma bidimensional de MHDSL con $M \times N$ pixeles. El holograma de contraste es

interpolado en una malla tipo esférica con pixeles de tamaño $\Delta x''$, $\Delta y''$. Un nuevo holograma modificado $\tilde{I}''(m\Delta x'', n\Delta y'')$, el cual considera la distancia de propagación z_r , se introduce en la versión discreta de la ecuación (3) para producir (Kreuzer, 2002; Garcia-Sucerquia, Trujillo, and Restrepo Agudelo, 2014):

$$\begin{aligned} U(s\Delta x', t\Delta y', z_r) = & \Delta x'' \Delta y'' \exp \left[ik \frac{(s^2 \Delta x'' \Delta x' + t^2 \Delta y'' \Delta y')}{2L} \right] \\ & \sum_{m=-M/2}^{(M/2)-1} \sum_{n=-N/2}^{(N/2)-1} \tilde{I}''(m\Delta x'', n\Delta y'') \\ & \times \exp \left[ik \frac{(m^2 \Delta x'' \Delta x' + n^2 \Delta y'' \Delta y')}{2L} \right] \\ & \times \exp \left[-ik \frac{((s-m)^2 \Delta x'' \Delta x' + (t-n)^2 \Delta y'' \Delta y')}{2L} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

Según la ecuación (4), la amplitud de la onda objeto puede ser calculada como una convolución discreta por medio de tres transformadas rápidas de Fourier. En la ecuación (4) el tamaño de las coordenadas del plano de reconstrucción puede ser escogido independientemente de la distancia de reconstrucción, longitud de onda y tamaño del holograma, condición que es esencial en MHDSL para ajustar los tamaños de registro y reconstrucción. El proceso de reconstrucción aplicado al holograma que se envía al computador en la Figura 1, produce la imagen que se presenta en la Figura 2 (A). El perfil a lo largo de la línea recta sobre la reconstrucción del panel (A) se muestra en el panel (B). A partir de este perfil se puede observar que la técnica de MHDSL puede alcanzar resolución espacial del orden de los micrómetros, sin la necesidad de lentes. La calidad de la imagen reconstruida, permite distinguir claramente el empaquetamiento hexagonal de las esferas de poliestireno de $1.09\mu\text{m}$ de diámetro, que fueron usadas como muestra en este experimento.

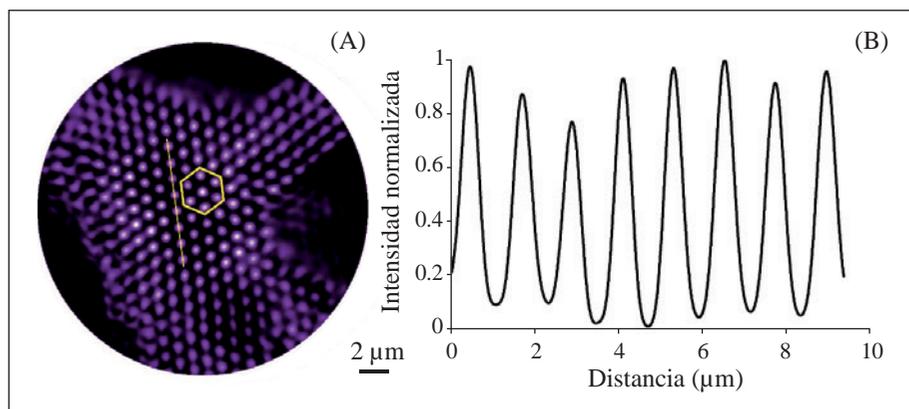


Figura 2. Reconstrucción (A) del holograma de contraste generado a partir del holograma en línea ilustrado en la Fig. 1. Perfil (B) a lo largo de la línea recta en el panel (A).

Debido a su estructura, la ecuación (4) es totalmente paralelizable. Esta característica unida a la posibilidad del uso de unidades de procesamiento gráfico (GPU) para paralelizar cálculos de punto flotante, han permitido el computo de la ecuación (4) en GPUs de manera tal que la reconstrucción de un holograma de 2048x2048 pixeles se puede realizar en un computador portátil equipado con un tarjeta de video NVIDIA® Geforce 9800GT en 100ms (Trujillo and Garcia-Sucerquia, 2013; Garcia-Sucerquia, Trujillo, and Restrepo Agudelo, 2014).

MHDSL con fuentes multiespectrales

La simplicidad, solidez y calidad del desempeño de MHDSL invita al desarrollo de arquitecturas de microscopía sin lentes que utilicen fuentes de iluminación multiespectrales para obtener información a diferentes longitudes de onda del espécimen en estudio. En este contexto, nuestro grupo de investigación ha sido pionero a nivel mundial en el desarrollo de la MHDSL a color (Garcia-Sucerquia, 2012) y su extensión a fuentes más complejas con espectros de emisión de cientos de nanómetros (Mendoza-Yero, Calabuig, et al., 2013; Mendoza-Yero, Tajahuerce, et al., 2013). La primera tecnología se ha denominado MHDSL a color y la segunda se enmarca el uso de láseres con pulsos ultra rápidos en MHDSL.

a. MHDSL a color

Para la generación de imágenes holográficas de especímenes microscópicos a color, en el montaje experimental de MHDSL ilustrado en la Figura 1 se incorporaron tres

láseres con longitudes de onda en el rojo, verde y azul, respectivamente. Según se ilustra en la Figura 3 (A), la muestra se ilumina de forma secuencial por medio de los tres láseres para generar un holograma para cada una de las longitudes utilizadas. Las irradiancias de los láseres se ajustan de manera tal que operando de forma conjunta producen iluminación blanca sobre la muestra. El uso de los obturadores permite registrar de forma individual los hologramas en línea para el canal rojo, verde y azul; los hologramas registrados se ilustran en la Figura 3 (B), (C) y (D). Para el registro de los hologramas se utilizó, un microscopio sin lentes construido con una cámara CMOS monocromática de 1280x1024 pixeles cuadrados cada uno 6.7µm de lado. Se utilizó un microscopio con apertura numérica (NA) (Garcia-Sucerquia, Xu, et al., 2006) de 0.37, es decir, para la cámara utilizada la distancia de la fuente puntal al centro de la misma fue $L = 8.5\text{mm}$. Tres láseres de estado sólido con longitudes de onda de 671nm (rojo), 532 (verde), y 473nm (azul) fueron alineados por medio de los apropiados filtros dicróicos. Los tres haces se enfocaron sobre la superficie de un pinole con diámetro igual a 750nm por medio de un microscopio de objetivo apocromático. El uso de este objetivo, minimiza las variaciones de la cintura de los haces para las diferentes longitudes de onda de forma tal que la muestra es iluminada por un haz blanco para una perfecta iluminación. En este experimento se utilizó como muestra una sección de la cabeza de una mosca *Drosophila melanogaster* o mosca de la fruta. Esta muestra, con dimensiones de 250 µm x 200 µm, posee un estructura interna compuesta por diferentes órganos y con variadas

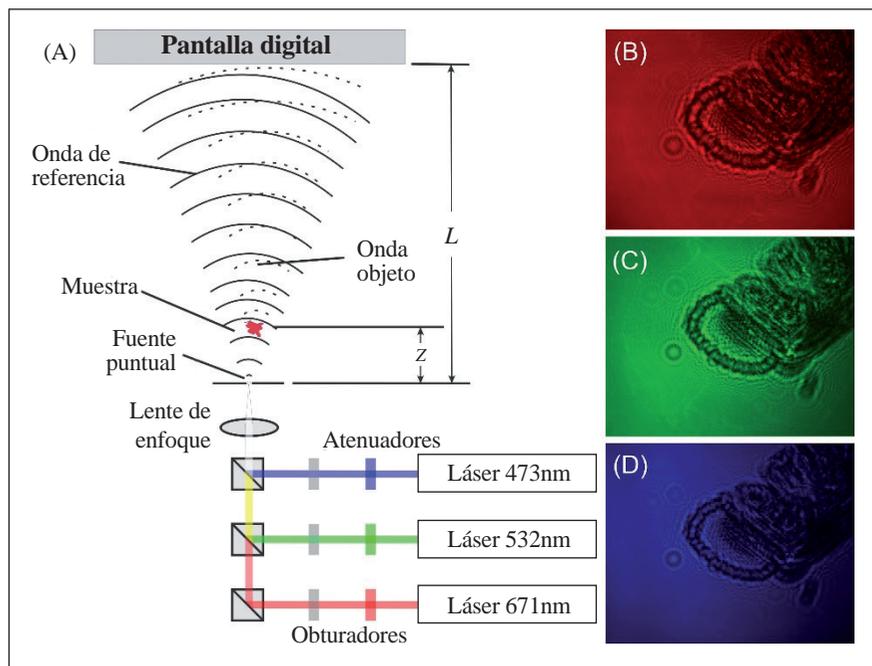


Figura 3. Ilustración de la etapa de registro en MHDSL a color. Panel (A) muestra el montaje experimental utilizado. Paneles (B), (C) y (D) corresponden a los hologramas registrados rojo, verde y azul, en este orden.

respuestas espectrales, lo cual hace la sección de la cabeza de una mosca *Drosophila melanogaster* una muestra ideal para este estudio. La muestra fue preparada por medio de la técnica Bodian para fijar muestras por medio de parafina entre un par de placas de vidrio (Bodian, 1936).

La imagen reconstruida a color es obtenida por medio del procesamiento *a posteriori* de las reconstrucciones holográficas de los hologramas en línea para los canales rojo Figura 3 (B), verde (C) y azul (D). Cada holograma en línea a color es reconstruido con el uso de la apropiada longitud de onda insertada en la ecuación (4), asegurando que los hologramas reconstruidos tiene el mismo tamaño. Esta condición en los tamaños de los hologramas reconstruidos es de obligatorio cumplimiento para garantizar la mejor mezcla posible de las tres reconstrucciones holográficas correspondientes a cada canal de color. En los paneles (A), (B) y (C) de la Figura 4, se muestran las imágenes reconstruidas para los canales rojo, verde y azul, en este orden, obtenidos para una distancia de reconstrucción $z = 0.8$ mm. Debido a las homogeneidades de absorbancia para las tres longitudes de onda utilizadas, cada imagen reconstruida presenta detalles distintivos y/o diferentes niveles de irradiancia para las estructuras que constituyen la imagen de la muestra. En el panel (D) de la Figura 4, se muestra la imagen a color obtenida por medio del proceso de mezclado típico RGB de las imágenes en paneles (A), (B) y (C). La imagen a color exhibe detalles claramente visibles que son difícilmente observables en las imágenes monocromáticas. Esencialmente, el mezclado de la información adquirida con cada una de las longitudes de onda en una sola imagen a color deriva en un desempeño superior del MHDSL en comparación con su operación monocromática (Garcia-Sucerquia, Xu, *et al.*, 2006). Esta mejora en la operación del MHDSL se origina en la recolección en una sola imagen de las diferentes vistas espectrales de la muestra.

Para evaluar la resolución espacial alcanzada por el MHDSL a color se analizó en gran detalle el panel (D) de la Figura 4. Esta figura es representada nuevamente en el panel (A) de la Figura 5, donde se resaltan detalles con tamaños superiores a los 3 micrómetros que son visibles en la imagen reconstruida a color. En esta imagen el conjunto de omatidias, estructura rojiza en el borde del ojo compuesto de la mosca de la fruta, son observables claramente. Para un análisis más cuantitativo, se muestran en el panel (B) por medio de una línea sólida los perfiles transversales de dos antenas situadas entre las omatidias. Dicha línea sólida corresponde al perfil de intensidad a lo largo de la línea blanca trazada al interior del círculo blanco del panel (A). Estas secciones transversales muestran la capacidad de MHDSL a color de formar imágenes incluso de estructuras sub-micrométricas. Otro detalle de interés es resaltado en el área cuadrada del panel (A). En esta área se recogen tres omatidias que son magnificadas en la esquina superior derecha de este panel. La línea punteada en el panel (B)

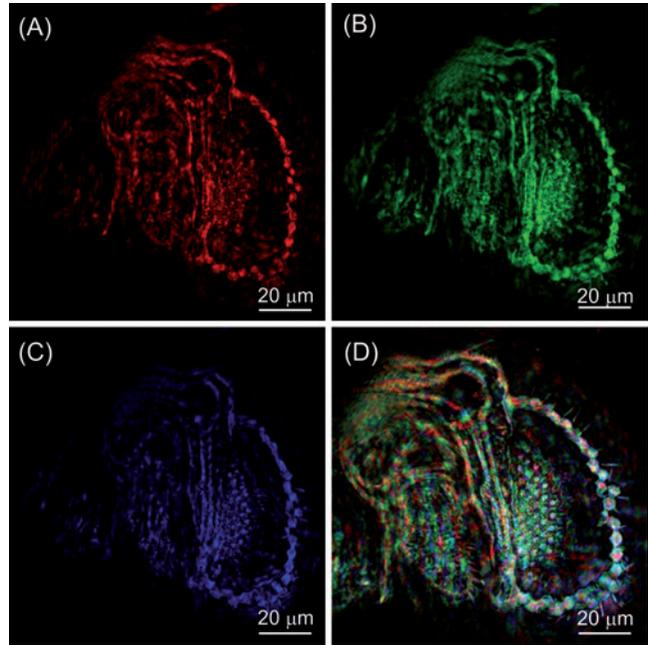


Figura 4. Reconstrucción de imágenes a color en MHDSL. Paneles de (A) hasta (C) son las imágenes reconstruidas para los canales individuales de los colores rojo, verde y azul, en este orden. En el panel (D) se muestra la imagen a color resultado de la composición de las imágenes reconstruidas en los paneles (A), (B) y (C).

representa el perfil a lo largo de la estructura de tres puntos situados entre el omatidias. Esta línea punteada muestra la capacidad de la MHDSL a color de formar imágenes de estructuras a nivel micrométrico a color alcanzando resolución lateral del orden de los 2 μm .

b. FEMTO Laser MHDSL

Los resultados alcanzados con la MHDSL a color invitan a extender el uso de esta tecnología de microscopía con fuentes de iluminación con ancho espectral continuo en el rango de cientos de nanómetros. Fuentes que presentan estas características y son gran interés en la actualidad son los láseres ultra rápidos. Estas fuentes tienen la característica particular de presentar una considerable coherencia espacial pero despreciable coherencia temporal, lo que determina su desempeño en cualquier metodología de formación de imágenes. Debido a esta característica su uso en sistemas de microscopía holográfica digital impone el uso de arreglos de redes de difracción para manipular los frentes de onda y obtener ondas de iluminación con las condiciones de coherencia espacial y temporal que demanda la microscopía holográfica digital (Witte, *et al.*, 2012). Gracias a su arquitectura en eje, la longitud de coherencia temporal de las fuentes requeridas en MHDSL está en el orden de los micrómetros, lo que ha posibilitado el uso sistemas de iluminación tipo LED en esta metodología de microscopía (Repetto, Piano, and Pontiggia, 2004; Garcia-Sucerquia, 2013; Petruck, Riesenber, and

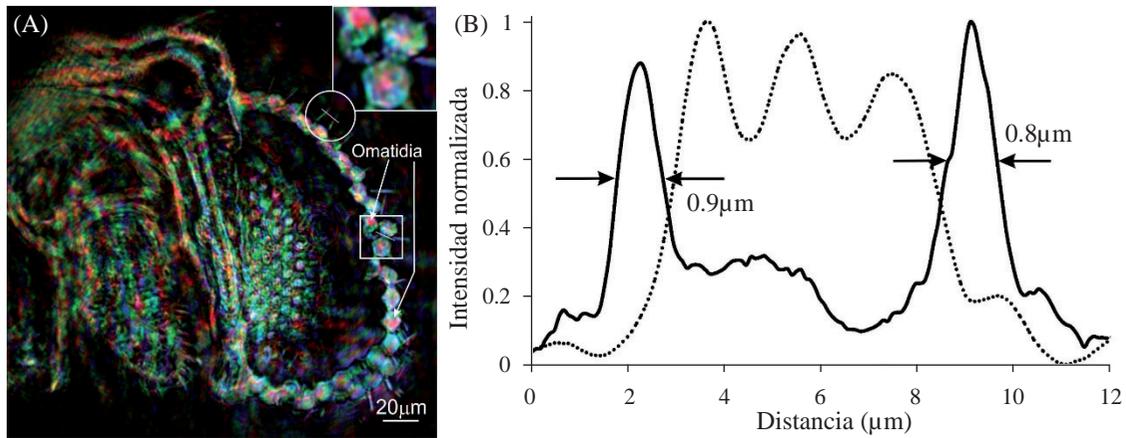


Figura 5. Imagen reconstruida a color con resolución micrométrica. (A) muestra la imagen reconstruida a color de una sección de la cabeza de la mosca de la fruta registrada con $NA= 0.37$ ($L=8.5\text{mm}$). Las omatidias rojizas típicas de la mosca de la fruta salvaje se observan claramente. Las líneas sólidas/punteadas en el panel (B) representan el perfil a lo largo de la línea blanca en el círculo/cuadrado del panel (A). El área cuadrada es magnificada en la esquina del panel (A).

Kowarschik, 2012) y por ende sugiere a la utilización de fuentes más complejas con esta misma característica como los láseres ultra rápidos (Rosenhahn, et al., 2009; Brunel, et al., 2012; Mendoza-Yero, Calabuig, et al., 2013). Nuestro grupo de investigación fue pionero en el mundo en la utilización de láseres de femto segundo en la visualización de muestras biológicas por medio de la MHDSL (Mendoza-Yero, Calabuig, et al., 2013). Para contrastar los resultados obtenidos por esta técnica, se desarrolló un MHDSL operando de forma simultánea con un láser mode-locked Ti:Sa (12 fs @ FWHM, 800 nm longitud de onda media, 4 nJ energía por pulso y 75 MHz tasa de repetición) y una LED con longitud de onda media 655 ± 20 nm; el montaje es ilustrado en la Figura 6.

Como se ha mencionado anteriormente, en MHDSL la fuente de iluminación de la muestra es generada focalizando luz en un pinhole de diámetro del orden de la longitud de onda $d_p \approx \lambda$, es decir, la luz es empaquetada en un área del orden $\pi\lambda^2/4$. Este confinamiento de la radiación electromagnética impone que por ejemplo para un láser típico de He-Ne laser de 10 mW, la potencia por unidad de área sobre la superficie del pinhole es del orden de 0.7 MW/cm^2 . Esta cifra está en el rango de seguridad para no dañar los pinholes comerciales los cuales pueden manipular irradiancias del orden de 70 TW/cm^2 . Sin embargo, en nuestra aplicación con láseres ultra rápidos la potencia pico sobre la superficie del pinhole es del orden de 2.5 TW/cm^2 , lo cual sugiere una reducción de la irradiancia por medio de filtros neutros; en este experimento dicha potencia se redujo a 1.1 TW/cm^2 .

Para ambas fuentes de iluminación se utilizaron pinholes de 5 y $1\mu\text{m}$ de diámetro sobre los cuales se focalizó la luz de la fuente respectiva por medio de un objetivo de microscopio M-40X producido por Newport. Este objetivo tiene una apertura numérica de 0.65, distancia de trabajo de 0.6 mm y

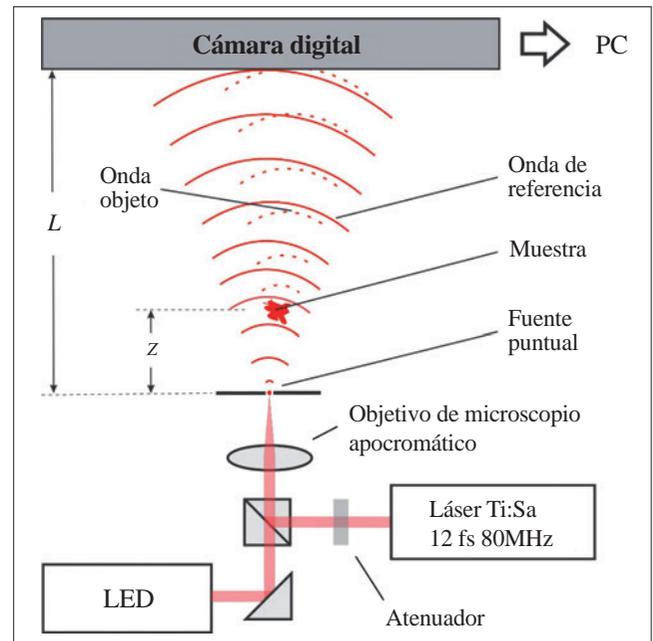


Figura 6. Esquema de un MHDSL usando simultáneamente una láser Ti:Sa y un LED.

distancia focal efectiva $F=4.5$ mm. Con esta configuración el diámetro más pequeño del spot sobre el pinhole fue de $1.2 \mu\text{m}$; el más grande fue $2\mu\text{m}$. Los hologramas en línea se registraron en una cámara CCD Balser® con 1024×1024 pixeles cuadrados de $6\mu\text{m}$ de lado. La cámara se ubicó a una distancia entre 5 y 17 mm desde el pinhole.

Una sección de la cabeza de una mosca *Drosophila melanogaster* se utilizó como muestra para este estudio. Las reconstrucciones de los hologramas para esta muestra biológica de compleja estructura interna, para ambos

fs-MHDSL y LED-MHDSL, se muestran en la Figura 7. Para todos los paneles de la figura no se observa ruido coherente, como se espera de los trabajos previos (Petruck, Riesenber, and Kowarschik, 2012; Garcia-Sucerquia, 2013), debido a la reducida longitud de coherencia del láser de femto segundos. Cuando se comparan los paneles de la fila superior con los de la fila inferior, se puede concluir que la reducción del ruido coherente que se logra con ambas fuentes es comparable. Sin embargo, hay una diferencia importante en la resolución espacial de los hologramas reconstruidos. Se ha reportado que la resolución espacial alcanzable en MHDSL se mejora con la reducción del tamaño del pinhole, esencialmente porque la coherencia espacial de la fuente de iluminación sobre la muestra es incrementada (Garcia-Sucerquia, Xu, *et al.*, 2006). De los paneles (C) y (D) esta premisa se puede validar, pero para los paneles (A) y (B) ésta no es cierta.

Para entender el desempeño de la MHDSL operando con el láser de femto segundos debemos profundizar un poco en la operación del microscopio. La borrosidad que aparece en las imágenes reconstruidas para el fs-MHDSL puede ser atribuida al ancho espectral del láser. En este contexto, el láser de femto segundos se puede entender como una fuente constituida por múltiples subfuentes con diferentes

longitudes de onda y mutuamente incoherentes. De esta forma el holograma en línea estará dado por la superposición incoherente de múltiples hologramas monocromáticos en línea cada uno con la forma:

$$I'(\mathbf{r}, \lambda) = |U_{scat}(\mathbf{r}, \lambda)|^2 + |U_{ref}(\mathbf{r}, \lambda)|^2 + [U_{scat}(\mathbf{r}, \lambda) U_{ref}^*(\mathbf{r}, \lambda) + U_{scat}^*(\mathbf{r}, \lambda) U_{ref}(\mathbf{r}, \lambda)]. \quad (5)$$

De forma similar como se mencionó para la ecuación (1), en la ecuación (5) $|U_{scat}(\mathbf{r}, \lambda)|^2$ es despreciable debido a que las muestras utilizadas en MHDSL esparcen muy débilmente la onda que las ilumina. Los términos entre los corchetes, en la ecuación 5, son las imágenes gemelas, las cuales no perturban la reconstrucción del holograma, como ha sido ampliamente estudiado en otras referencias (Garcia-Sucerquia, Xu, *et al.*, 2006; Garcia-Sucerquia, 2013).

Cada uno de los hologramas en línea estará sopesado por el valor de la potencia espectral $\rho(\lambda)$ de la fuente para cada longitud de onda, de forma tal que el holograma en línea registrado estará dado por:

$$I(\mathbf{r}) = \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} \rho(\lambda) I'(\mathbf{r}, \lambda) d\lambda \quad (6)$$

con λ_0 la longitud de onda promedio y $\Delta\lambda$ el ancho espectral la fuente de iluminación. Debido a que el tiempo de integración de la cámara es mucho más grande que ancho temporal de los pulsos del láser (Gu, 2000), para este experimento en particular el holograma de contraste tendrá la forma:

$$\tilde{I}(\mathbf{r}) = \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} \rho(\lambda) \left[I'(\mathbf{r}, \lambda) - |U_{ref}(\mathbf{r}, \lambda)|^2 \right] d\lambda \quad (7)$$

La amplitud compleja de la onda esparcida por el objeto $U_{scat}(\mathbf{r}, \lambda)$ para cada longitud de onda puede ser computada por medio de la difracción de la onda de referencia $U_{ref}(\mathbf{r}, \lambda)$ cuando ilumina el holograma de contraste siguiendo lo expresado en la ecuación (3).

Cuando el holograma de contraste es representado por la ecuación (7), la información de las longitudes de onda individuales es mezclada, de forma tal que la longitud de onda utilizada en la reconstrucción cambia la escala de la misma. De esta forma la onda objeto recuperada $U_{scat}(\mathbf{r})$ corresponde a la superposición incoherente de múltiples campos difractados del espécimen cada uno con una escala diferente proporcional a λ / λ_0 ; esta superposición es la responsable de las imágenes borrosas que se muestran en la Figura 7 (A) y (B).

La explicación de la invariancia de la resolución espacial del fs-MHDSL con la variación del tamaño de pinhole se puede soportar en el entendimiento del MHDSL como un microscopio interferométrico de división de frente de onda. En este contexto, únicamente la coherencia espacial de la fuente determina el desempeño del microscopio y puesto que el láser de femto segundos es espacialmente completamente coherente, los diferentes pinholes no modifican la coherencia

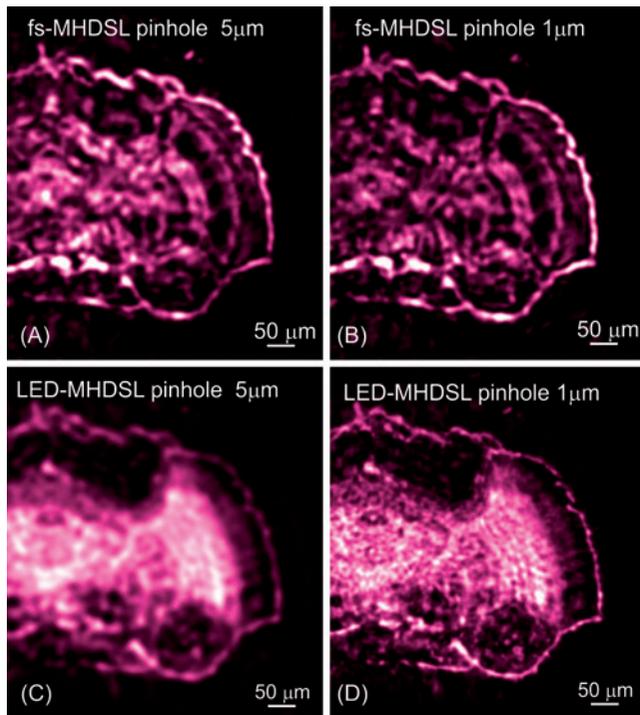


Figura 7. Reconstrucción de los hologramas para fs-MHDSL y LED-MHDSL. Paneles (A) y (B) muestran las reconstrucciones para fs-MHDSL operando con pinholes de 5 y 1 μm de diámetro, respectivamente. Paneles (C) y (D) son las reconstrucciones de los hologramas para LED-MHDSL usando pinholes de diámetro de 5 and 1 μm, en ese orden.

espacial sobre el plano de la muestra y por ende no se puede observar un cambio en el desempeño del microscopio. Para fuentes con coherencia espacial parcial como los LEDs, el diámetro del área que es iluminada coherentemente D_{coh} en un plano localizado a una distancia Z del pinole de diámetro d_p está dada por el teorema de Van Cittert-Zernike theorem, $D_{coh} \approx 0.32\lambda_0 Z/d_p$. Esta expresión indica que a menor diámetro de pinhole mayor área de coherencia y por ende mejor resolución espacial del MHDSL (Petruck, Riesenber, and Kowarschik, 2012; Garcia-Sucerquia, 2013). Esta característica se pudo verificar en la Figura 7 paneles (C) y (D). Debido a que el láser de femto segundos es completamente coherente espacialmente, el desempeño del fs-MHDSL no es modificado por el tamaño del pinhole, como se muestra en la Figura 7 (A) y (B). La borrosidad de las imágenes reconstruidas se debe desde luego a la superposición incoherente de las múltiples imágenes reconstruidas con diferentes escalas, según se mencionó anteriormente.

Conclusiones

Se ha presentado en este trabajo una recopilación de los aportes más destacados realizados por nuestro grupo de investigación en el dominio de la MHDSL operando con fuentes de iluminación de múltiple longitud de onda y alcanzado resolución micrométrica.

Se ilustró como por primera vez se desarrolló una estrategia para observar muestras microscópicas a color y sin el uso de lentes por medio de la MHDSL, donde se logró la visualización de estructuras submicrométricas y resolución espacial en el orden de los 2 micrómetros.

Se reportó el uso de fuentes de iluminación con ancho espectral continuo en el rango de los cientos de nanómetros en la arquitectura MHDSL. Se mostró como su uso para visualizar muestras biológicas con estructura interna, reveló el papel de la coherencia espacial y temporal de la fuente de iluminación en el desempeño del MHDSL. El análisis de la incidencia de la coherencia espacial y temporal en la MHDSL se llevó a cabo por medio de la comparación de los resultados obtenidos usando iluminación tipo LED y láser de femto segundos.

Agradecimientos

El autor agradece el soporte de la Universidad Nacional de Colombia, Proyecto Hermes 19384, el Programa de Internacionalización del Conocimiento y el programa de Jóvenes Investigadores de Colciencias-Universidad Nacional de Colombia código Hermes 28751.

Conflicto de intereses

El autor declara que no tiene conflicto de intereses.

Referencias

Barton, J. J. (1988). Photoelectron Holography. *Physical Review Letters*, **61** (12). American Physical Society, 1356-59.

- Bodian, D. (1936). A New Method for Staining Nerve Fibers and Nerve Endings in Mounted Paraffin Sections. *The Anatomical Record*, **65** (1). Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company, 89-97.
- Brunel, M., Shen, H., Coetmellec, S., Lebrun, D., and Ait Ameer, H. (2012). Femtosecond Digital in-Line Holography with the Fractional Fourier Transform: Application to Phase-Contrast Metrology. *Applied Physics B*, **106** (3). Springer-Verlag, 583-91.
- Cuche, E., Bevilacqua, H., and Depeursinge, C. (1999). Digital Holography for Quantitative Phase-Contrast Imaging. *Opt. Lett.*, **24** (5). OSA, 291-93.
- Fink, H.-W., Schmid, H., Kreuzer, H., and Wierzbicki, A. (1991). Atomic Resolution in Lensless Low-Energy Electron Holography. *Physical Review Letters*, **67** (12): 1543-46.
- Gabor, D. (1948). A New Microscopic Principle. *Nature*, **161**: 777-78.
- Gabor, D. (1949). Microscopy by Reconstructed Wave-Fronts. *Proc. R. Soc. London A*, **197**: 454.
- Gabor, D. (1951). Microscopy by Reconstructed Wave Fronts: II. *Proc. Phys. Soc. London B*, **64**: 449.
- Garcia-Sucerquia, J., Trujillo, C., and Restrepo, J. (2014). Microscopio Holográfico Digital Sin Lentes (MHDSL) y Método Para Visualizar Muestras. Colombia: SIC (Colombia).
- Garcia-Sucerquia, J. (2012). Color Lensless Digital Holographic Microscopy with Micrometer Resolution. *Optics Letters*, **37** (10): 1724-26.
- Garcia-Sucerquia, J. (2013). Noise Reduction in Digital Lensless Holographic Microscopy by Engineering the Light from a Light-Emitting Diode. *Applied Optics*, **52** (1): A232-39.
- Garcia-Sucerquia, J., Herrera-Ramírez, J., Castaneda, R. (2006). Incoherent Recovering of the Spatial Resolution in Digital Holography. *Optics Communications*, **260** (1): 62-67.
- Garcia-Sucerquia, J., Xu, W., Jericho, S., Klages, P., Jericho, M., and Kreuzer, H. (2006). Digital in-Line Holographic Microscopy. *Appl. Opt.*, **45** (5). OSA, 836-50.
- Goodman, J W, and Lawrence, L. (1967). Digital image formation from electronically detected holograms. *Applied Physics Letters*, **11** (3).
- Goodman, J.W. (2005). *Introduction to Fourier Optics*. Greenwood Village: Roberst & Company Publishers.
- Gu, M. (2000). *Advanced Optical Imaging Theory*. Springer Series in Optical Sciences., Vol. 75. Springer.
- Jericho, M H, and Kreuzer, H. (2011). Point Source Digital In-Line Holographic Microscopy. In *Coherent Light Microscopy*, edited by P Ferraro, A Wax, and Z Zalevsky, 3-30. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Kreis, T. (2002). Frequency Analysis of Digital Holography. *Optical Engineering*, **41** (4): 771-78.
- Kreuzer, H. (2002). "Holographic microscope and method of hologram reconstruction," US,6411406.

- Kreuzer, H J, Fink, H., Schmid, H., and Bonev, S.** (1995). Holography of Holes, with Electrons and Photons. *Journal of Microscopy*, **178** (3), 191-97.
- Leith, N., and Upatnieks, J.** (1964). Wavefront Reconstruction with Diffused Illumination and Three-Dimensional Objects. *Journal of the Optical Society of America*, **54** (11). OSA, 1295-1301.
- Mendoza-Yero, O., Calabuig, A., Tajahuerce, E., Lancis, J., Andrés, P., and Garcia-Sucerquia, J.** (2013). Femtosecond Digital Lensless Holographic Microscopy to Image Biological Samples. *Optics Letters*, **38** (17). OSA, 3205-7.
- Mendoza-Yero, O., Tajahuerce, E., Lancis, J., and Garcia-Sucerquia, J.** (2013). Diffractive Digital Lensless Holographic Microscopy with Fine Spectral Tuning. *Optics Letters*, **38** (12): 2107-9.
- Petruck, P, Riesenber, R., and Kowarschik, R.** (2012). Optimized Coherence Parameters for High-Resolution Holographic Microscopy. *Applied Physics B*, **106** (2). Springer-Verlag, 339-48.
- Picart, P., and Leval, J.** (2008). General Theoretical Formulation of Image Formation in Digital Fresnel Holography: Erratum. *J. Opt. Soc. Am. A*, **26** (2). OSA, 244.
- Repetto, L, Piano, E., and Pontiggia, C.** (2004). Lensless Digital Holographic Microscope with Light-Emitting Diode Illumination. *Opt. Lett.*, **29** (10). OSA, 1132-34.
- Rosenhahn, A., Staier, F., Nisius, T., Schäfer, D., Barth, R., Christophis, C., Stadler, M. et al.** (2009). Digital In-Line Holography with Femtosecond VUV Radiation Provided by the Free-Electron Laser FLASH. *Opt. Express*, **17** (10). OSA, 8220-28.
- Schnars, U.** (1994). Direct Phase Determination in Hologram Interferometry with Use of Digitally Recorded Holograms. *J. Opt. Soc. Am. A*, **11** (7). OSA, 2011-15.
- Trujillo, C, and Garcia-Sucerquia, J.** (2013). Accelerated Numerical Processing of Electronically Recorded Holograms With Reduced Speckle Noise. *Image Processing, IEEE Transactions on*, **22** (9): 3528-37.
- Witte, S., Plauska, A., Ridder, M., Berge, Huibert D Mansvelde, H., and Groot, M.** (2012). Short-Coherence off-Axis Holographic Phase Microscopy of Live Cell Dynamics. *Biomed. Opt. Express*, **3** (9). OSA, 2184-89.

Estudio del efecto de la relación de intensidades relativas entre la onda de referencia y la onda objeto en holografía digital

Raúl Castañeda¹, Diego Hincapié^{1,2}, Sebastián Bedoya¹, Jorge Herrera-Ramírez², Jorge García-Sucerquia^{1,*}

¹Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, Escuela de Física, Colombia

²Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), Medellín, Colombia

Resumen

En este trabajo se realizó un estudio para determinar la importancia de la relación relativa de las intensidades de la onda de referencia y la onda objeto en holografía digital en términos del contraste de la imagen holográfica reconstruida. Para ello se llevaron a cabo diferentes registros holográficos variando la relación de intensidades de la onda de referencia respecto a la onda objeto. Además de las reconstrucciones numéricas de estos registros holográficos, se hizo un análisis sobre los perfiles de intensidad de estos hologramas antes y después de realizado el requerido proceso de filtrado espacial. Los resultados obtenidos permiten concluir que contrario al proceso análogo de la holografía óptica tradicional, en holografía digital no es necesario mantener un alto control de las relaciones de intensidad entre la onda de referencia y la onda objeto. En general, se puede afirmar que esta relación de intensidades es de baja influencia para la calidad de la reconstrucción holográfica digital siempre y cuando que en el registro se respeten las adecuadas condiciones de muestreo y no saturación de los píxeles.

Palabras clave: holografía digital, filtrado espacial, procesamiento de imágenes.

Study of the relative ratio of the intensities between the reference and the object waves in digital holography

Abstract

In this paper, we present a study on the effect of the relative ratio of the intensities of the reference and object waves in digital holography with respect to the quality of the numerical reconstructions of the digitally recorded holograms. To perform the study, we have recorded several holograms of the same sample varying the ratio of intensities between the reference and object waves. In addition to the numerical reconstructions of these holograms, we have carried out an analysis of the intensity profiles of the digitally recorded holograms before and after performing the needed process of spatial filtering. The results of the numerical reconstructions and the analysis of the intensity profiles allow us to conclude that on contrary to the analogous process of optical holography, in digital holography is not necessary to keep a high control in the intensity ratio between the reference and object waves. In general, it can be stated that this relation of intensities is of low importance, while it is assured the correct sampling of the hologram and the no saturation of pixels are guaranteed.

Key words: Digital holography, spatial filtering, image processing.

Introducción

A pesar de que el concepto de holografía digital, entendida como la reconstrucción numérica de hologramas digitalmente registrados, nació casi simultáneamente con la holografía óptica (Goodman and Lawrence, 1967; Demetrakopoulos and Mitra, 1974), se puede considerar que no fue sino hasta el trabajo de Schnars y Jüptner de 1994 (Schnars and Jüptner, 1994) cuando se dio inicio al camino de aplicaciones e implementaciones en holografía digital que desde entonces han tenido un crecimiento continuo. Fueron las limitaciones en la resolución de las cámaras digitales (producto espacio-ancho de banda) y en las capacidades de procesamiento de los sistemas de cómputo lo que produjo que inicialmente esta idea estuviera estancada. A partir del

desarrollo en estos prerequisites tecnológicos, la holografía digital ha tomado fuerza y ya se puede considerar como una rama separada dentro de lo que es la moderna óptica digital. Así, la holografía digital ahora tiene influencia en múltiples campos como la microscopía (Jericho S.K., *et al.*, 2006; Herrera-Ramírez, *et al.*, 2007; Colomb, *et al.*, 2010; García-Sucerquia, *et al.*, 2006), la metrología (M. H. Jericho, *et al.*, 2012; Schnars and Jueptner, 2005; Hincapie, Herrera, and García-Sucerquia, 2007, Jericho S.K., *et al.*, 2006), la formación de imágenes 3-D (Frauel

*Correspondencia:

Jorge García-Sucerquia, jgarcia@unal.edu.co

Recibido: 3 de julio de 2015

Aceptado: 23 de septiembre de 2015

et al., 2006; **Javidi, et al.**, 2005), en el procesamiento de información de materiales (**Hasegawa, Hayasaki, and Nishida**, 2006), entre otros (**Restrepo and Garcia-Sucerquia**, 2013; **Teeranutranton and Yoshimori**, 2013).

La holografía digital ha alcanzado su desarrollo actual debido en gran parte a su versatilidad comparativa con respecto a su contraparte óptica. La conjugación de los sistemas digitales tanto en el registro de los hologramas como en la reconstrucción permite la inclusión de procesos que de manera analógica serían de limitada o más difícil aplicabilidad. Un ejemplo claro es la posibilidad de la eliminación de inconvenientes clásicos de la holografía óptica como son la presencia simultánea del orden cero y la imagen gemela en la visualización de la imagen holográfica reconstruida. Los métodos (**Herrera-Ramírez and Garcia-Sucerquia**, 2007; **Takeda, Ina, and Kobayashi**, 1982; **Garcia-Sucerquia, Herrera-Ramírez, and Velásquez-Prieto**, 2004; **Cuche, Marquet, and Depeursinge**, 2000) para la eliminación del orden cero de difracción y la imagen gemela regularmente implementan eficientemente procesos de la óptica analógica aprovechando las ventajas del procesamiento digital de imágenes, con la idea de obtener reconstrucciones finales de mayor calidad.

Se han realizado muchos estudios para mejorar el contraste y la resolución espacial de los hologramas reconstruidos numéricamente (**Garcia-Sucerquia, Herrera-Ramírez, and Velásquez-Prieto**, 2005; **Thurman and Bratcher**, 2015; **Maycock, et al.**, 2007; **Hincapié D.A., et al.**, 2015; **Xue, et al.**, 2014; **Jeong**, 2008). Desde la perspectiva de la holografía convencional, el contraste del holograma reconstruido depende en gran medida de la relación entre las intensidades de los haces de referencia y objeto en el registro de los hologramas. Esta relación de intensidades determina la visibilidad del patrón de interferencia que es el holograma, y esta visibilidad a su vez, controla la eficiencia de difracción del holograma, es decir, el brillo y contraste de la imagen reconstruida (**Hariharan**, 1996). Teóricamente se debe buscar la mayor visibilidad posible del patrón de interferencia y ésta se consigue cuando la relación entre las intensidades referencia a objeto de campos uniformes es de 1:1 (**Hariharan**, 1996). Sin embargo, en la práctica el haz objeto regularmente presenta variaciones espaciales de amplitud altas lo que hace que en el registro del holograma sea necesario trabajar con relaciones mayores que 1:1. Es decir, el haz de referencia, en el que por lo regular se puede asegurar una buena uniformidad, debe tener una intensidad mayor que la luz proveniente de cualquier punto del objeto, para evitar efectos no lineales y disminuir la influencia del ruido de intermodulación (**Hariharan**, 1996; **Jeong**, 2008). Esto implica relaciones referencia a objeto que van entre 2:1 hasta 10:1 dependiendo del tipo de holograma a ser registrado (**Vorobyov**, 2003; **Jeong**, 2008). Así, nuestro interés en este trabajo es analizar la importancia de

la relación de intensidades entre las ondas de referencia y objeto en holografía digital y determinar el papel que juega en la calidad de la imagen reconstruida numéricamente.

Este artículo está organizado como sigue. En la siguiente sección se presenta el marco teórico básico de la holografía digital. En la sección de desarrollo experimental se describe el sistema experimental y los elementos computacionales que se han usado para llevar a cabo nuestro estudio, mostrando esquemáticamente la metodología implementada desde el registro digital de los hologramas, pasando por su procesamiento intermedio, hasta la reconstrucción numérica final. En la sección de resultados y discusión se presentan las reconstrucciones bajo diferentes relaciones de intensidad del haz referencia a haz objeto y el análisis sobre los histogramas de los diferentes hologramas. Adicionalmente, allí mismo se presenta la discusión de estos resultados. Finalmente, se presentan las conclusiones más importantes de este trabajo.

Marco teórico

La holografía digital puede entenderse como un proceso de formación de imágenes en dos pasos. El primero consiste en el registro digital de un patrón de interferencia, generado por la superposición en amplitud de una onda objeto y una onda de referencia mediante el uso de una cámara digital tipo CCD o CMOS (**Schnars and Juptner**, 2002). La cámara digital se encarga de transmitir y almacenar en la memoria de una computadora las intensidades que genera el patrón de interferencia, como un conjunto de datos que pueden ser representados en una imagen digital.

Un holograma digital usualmente se genera mediante una configuración óptica que está conformada por una fuente de luz coherente (láser), elementos ópticos para dirigir los haces de luz y finalmente un dispositivo de registro de luz, cámara CCD o CMOS. El haz de luz coherente proveniente del láser es dividido en dos haces mediante un divisor de haz BS (Beam Splitter). Uno de los haces se encarga de iluminar el objeto que se desea registrar, éste se conoce como haz objeto. La reflexión de este haz sobre la superficie del objeto se dirige al medio de registro. La segunda onda es dirigida directamente hacia el medio de registro y es denominado haz de referencia. Estos dos haces de luz interfieren generando un patrón de interferencia, que es el denominado holograma. La intensidad de este patrón de interferencia u holograma, es lo que registra la cámara digital y está dado por:

$$H(x, y) = |R(x, y) + O(x, y)|^2, \quad (1)$$

donde $R(x, y)$ y $O(x, y)$ hacen referencia a la amplitud compleja de la onda de referencia y la onda objeto, respectivamente. Si se expande esta expresión se obtiene:

$$H(x, y) = OO^* + RR^* + OR^* + RO^*, \quad (2)$$

donde * denota el complejo conjugado. Los dos primeros términos de la ecuación (2) hacen referencia al orden cero

de difracción. El tercer y cuarto término son los denominados órdenes +1 y -1 de difracción, que dan cuenta de la imagen real y la imagen virtual en holografía.

El proceso de reconstrucción numérica de un holograma registrado digitalmente se puede describir como la simulación de la difracción de la onda de referencia a través del holograma registrado. En general, este problema está correctamente descrito por la teoría escalar de difracción de la luz ya sea por las fórmulas de Fresnel-Kirchhoff o Rayleigh-Sommerfeld (Goodman, 2005; Picart, 2015). Aunque estas fórmulas surgen de supuestos diferentes, se puede llegar a una equivalencia entre ellas si se asumen condiciones de iluminación de la abertura, o en este caso del holograma, con una onda plana y de observación en un plano a una gran distancia comparada con el tamaño del holograma. Estas condiciones suelen ser comunes en la práctica en holografía digital de forma tal que la fórmula de difracción se escribe como:

$$\Gamma(\xi, \eta, d) = \frac{i}{\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} H(x, y) R(x, y) \frac{\exp(-ikr)}{r} \cos(\Theta) dx dy \quad (3)$$

donde $\Gamma(\xi, \eta, d)$ representa el campo complejo reconstruido a una distancia perpendicular d del plano del holograma. $r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + d^2}$ es la distancia entre un punto (x, y) en el plano del holograma y un punto (ξ, η) en el plano de reconstrucción. $H(x, y)$ es el holograma registrado que es iluminado con una onda $R(x, y)$ y Θ es el ángulo entre el vector r y la normal al plano del holograma. La figura 1 representa esquemáticamente este proceso de difracción.

En la práctica existen diferentes maneras de implementar numéricamente la ecuación 3 (Schnars, et al., 2015; Picart, 2015). Una de las formas más frecuentes de implementarla es usando la aproximación de Fresnel que permite un fácil computo numérico del campo complejo reconstruido a través de transformadas rápidas de Fourier (Picart, 2015; Schnars, et al., 2015). La ecuación 4 es la versión discreta que implementa esta aproximación en particular (Picart, 2015):

$$\Gamma(d) = \frac{\exp(ikd)}{i\lambda d} \exp\left(\frac{ik}{2d} \Delta\xi^2 p^2\right) \sum_{n=-N/2}^{(N/2)-1} H(n) \exp\left(\frac{ik}{2d} \Delta x^2 n^2\right) \exp\left(-\frac{ik}{d} \Delta x n \Delta \xi p\right) \quad (4)$$

Por simplicidad la ecuación 4 está escrita en una dimensión. $(\Delta x, \Delta \xi)$ son los tamaños del pixel en el plano del sensor de imágenes (plano holograma) y en el plano de reconstrucción (plano imagen), respectivamente. $\Gamma(d)$ representa la amplitud compleja reconstruida en un plano a una distancia d desde el plano del holograma. $k = 2\pi/\lambda$ es el número de onda con longitud de onda de iluminación λ . En el régimen paraxial de propagación, que puede considerarse común en holografía digital, esta aproximación es relativamente precisa.

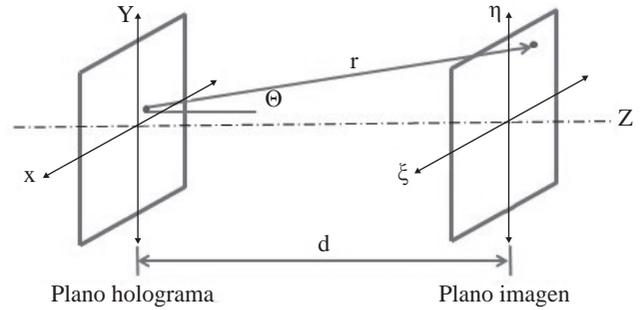


Figura 1. Diagrama de propagación en holografía digital.

Desarrollo experimental

Se llevó a cabo el registro de un conjunto de seis hologramas digitales, donde se cambió la relación de intensidad de la onda de referencia respecto a la intensidad de la onda objeto manteniendo la convención (X:Y) para denotar que mientras que la intensidad de la onda de referencia es X la de la onda objeto es Y. Se registraron hologramas con las relaciones (1:2), (1:1), (2:1), (3:1), (4:1) y (5:1) Se varió dicha relación desde (1:2) hasta (5:1).

Los hologramas registrados fueron realizados utilizando una configuración fuera de eje, mediante un montaje experimental basado en un interferómetro del tipo Mach-Zehnder (Figura 2) usando como fuente de luz coherente un láser de He-Ne con longitud de onda de 632.8 nm y una potencia de 35 mW. Como medio de registro se utilizó una cámara digital CMOS (THORLABS - DCC1545M) de 1280 X 1024 píxeles y tamaño de pixel 5 μm x 5 μm. La distancia de registro, desde el objeto al plano del sensor de la cámara, fue de 0.65 m.

A partir de los hologramas registrados se llevó a cabo su reconstrucción numérica. Este proceso de reconstrucción fue realizado utilizando el plugin *Numerical Propagation* el cual es funcional en el software especializado para analizar y procesar imágenes digitales ImageJ (Piedrahita-Quintero, n.d.). *Numerical propagation* implementa diferentes estrategias numéricas para la realización de la propagación numérica de campos ópticos, entre las que se encuentra la transformada de Fresnel presentada anteriormente en la ecuación 4. Este software requiere como parámetros de reconstrucción las siguientes especificaciones del montaje experimental: Longitud de onda (Wavelength) = 632.8 nm; la distancia de propagación (Distance) = 0.65 m; el ancho del holograma (Input width) = 6.6 mm (1280 x 5 μm) y la altura del holograma (Input Height) 5.4 mm (1024 x 5 μm).

Ya que en el registro de estos hologramas fuera de eje se aseguró que existía una separación espacial adecuada de los diferentes órdenes de difracción, en la etapa de reconstrucción (Picart and Leval, 2008), se pudo llevar a cabo un proceso de filtrado espacial digital. Este filtrado permite eliminar el orden cero y la imagen gemela

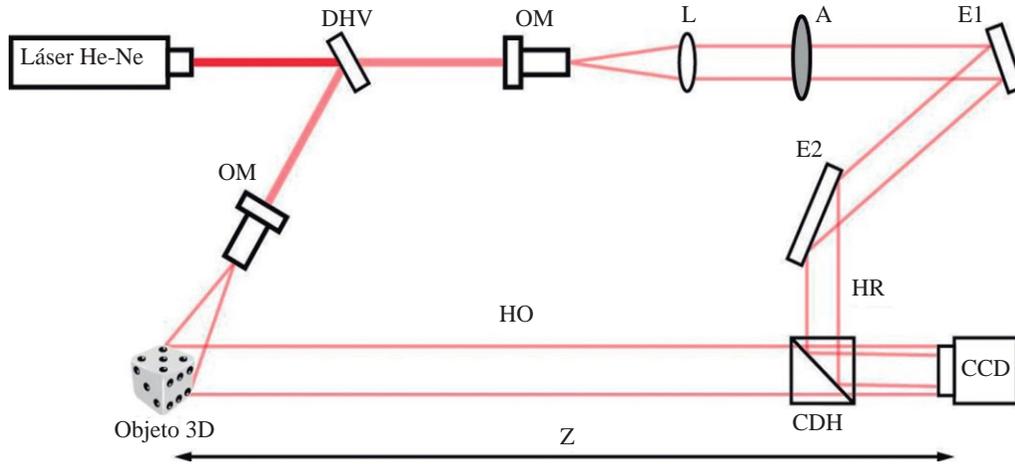


Figura 2. Montaje experimental. DHV: divisor de haz variable, OM: objetivo de microscopio, L: lente, A: atenuador, E1, E2: espejos, HO: haz objeto, HR: haz de referencia, CDH: cubo divisor de haz, CCD: cámara digital.

siguiendo el método propuesto en holografía digital por CuChe *et al.* (CuChe, Marquet, and Depeursinge, 2000) y desarrollado inicialmente por Takeda *et al.* (Takeda, Ina, and Kobayashi, 1982), donde se filtran las frecuencias asociadas al orden cero y la imagen gemela en la transformada de Fourier del holograma. De esta manera se mejora la calidad en la visualización de las imágenes reconstruidas, al realzar el contraste y reducir el ruido agregado por la imagen gemela y el orden cero de difracción. La figura 3 muestra esquemáticamente el resultado del proceso de reconstrucción de los hologramas sin realizar el proceso de filtrado espacial y usando el filtrado espacial.

La figura 4 es un diagrama de bloques de los procedimientos implementados que incluye los procesos de reconstrucción con filtrado y sin filtrado, y la extracción de perfiles de intensidades en los hologramas para su análisis posterior.

Resultados y discusión

La figura 5 muestra los resultados obtenidos en la reconstrucción de hologramas para dos objetos utilizados en este estudio, un dado y un modelo de un caballo. Para la obtención de estos resultados se aplicó el proceso descrito de filtrado espacial del holograma mediante transformada de Fourier para eliminar el orden cero y la imagen gemela.

En la figura 6 se presentan los resultados obtenidos para la reconstrucción de los diferentes hologramas registrados según la relación de intensidad usando como objeto un dado. La primera columna enseña los hologramas registrados, allí se hace evidente el incremento en el valor de la relación de los haces por el brillo perceptible en estas imágenes. La segunda columna contiene sus correspondientes transformadas de Fourier. La tercera columna de la figura 6, que corresponde a los resultados de reconstrucción del holograma sin usar filtrado espacial; se puede asemejar a lo que serían los resultados de

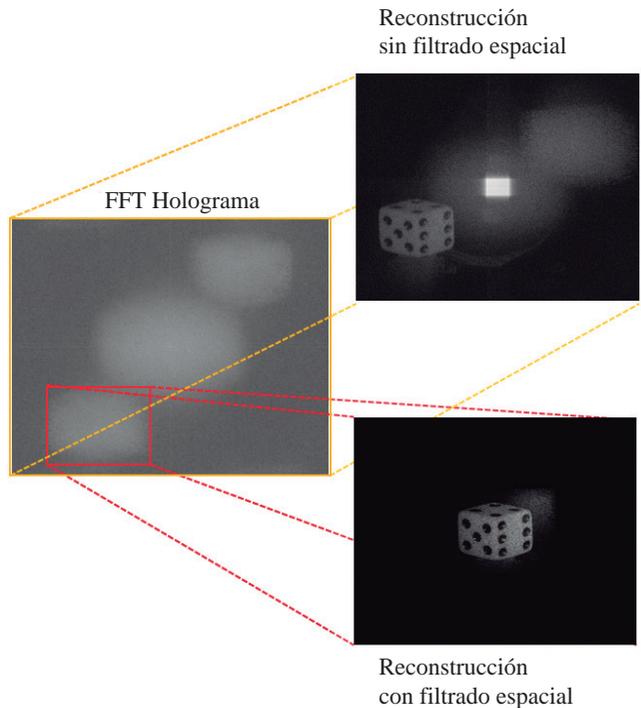


Figura 3. Proceso de reconstrucción del holograma. La línea amarilla indica el resultado de reconstrucción directa sin filtrado espacial. La línea roja indica el resultado de reconstruir el holograma utilizando el filtrado espacial, donde se consideran sólo las frecuencias espaciales de interés, orden +1.

reconstrucción de los hologramas equivalentes obtenidos en holografía analógica. Como se puede observar en esta columna, la calidad de la imagen de interés en cuanto al brillo y contraste se ve afectada por la presencia del orden cero y la imagen gemela, entre otros ruidos de reflejos indeseables. En el caso de la reconstrucción análoga de hologramas, la eficiencia de difracción del holograma está

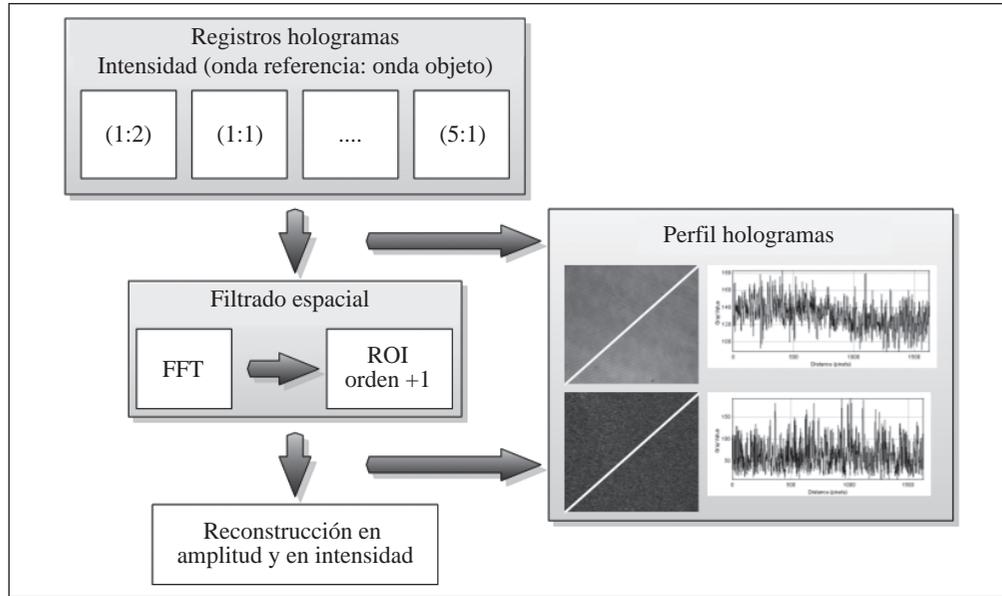


Figura 4. Diagrama de bloques de los procedimientos realizados desde el registro de los hologramas hasta la reconstrucción de estos mismos. Se incluyen también los procesos de filtrado espacial y de análisis comparativo de perfiles de intensidades entre los hologramas originales y los hologramas filtrados espacialmente.

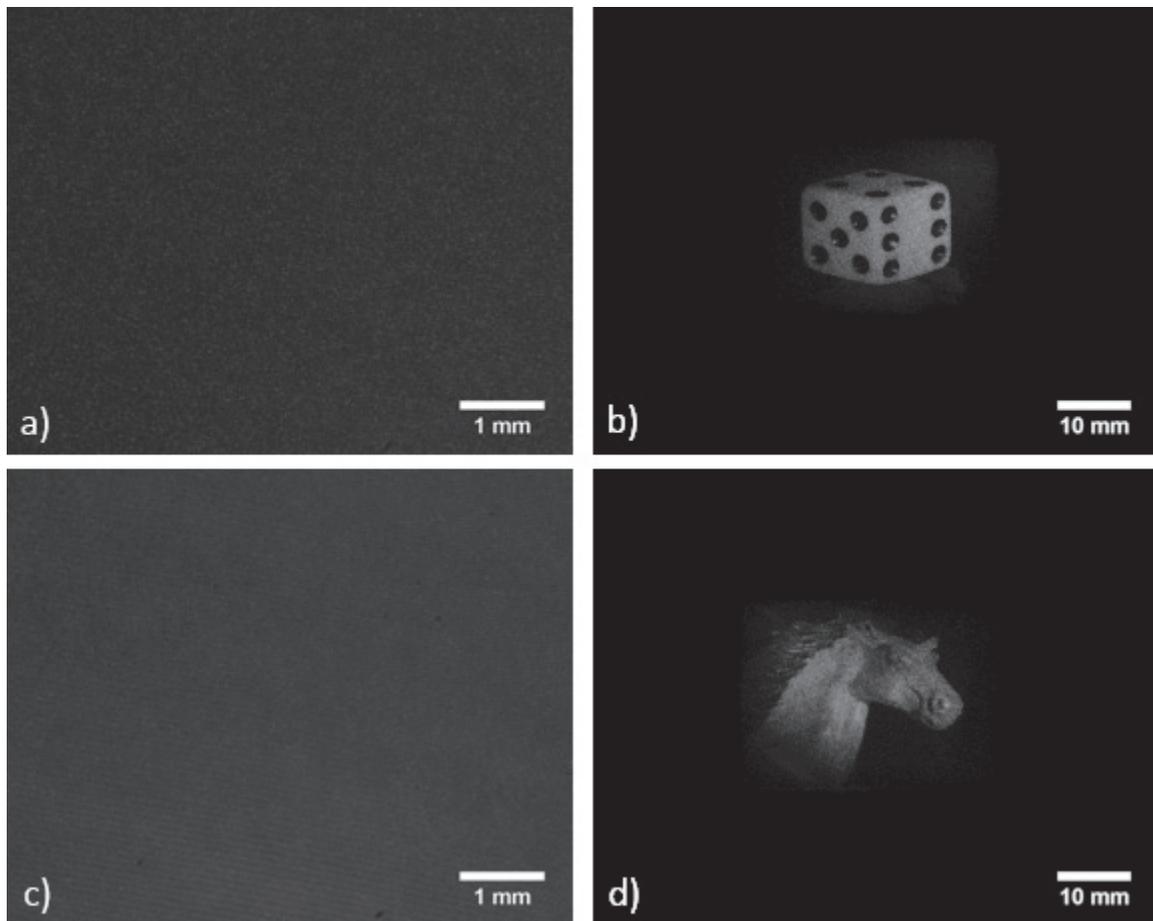


Figura 5. Imágenes de los hologramas registrado y reconstruidos. a) Holograma registrado para el dado, b) resultado de reconstrucción holográfica del dado, c) holograma registrado para el caballo, d) resultado de reconstrucción holográfica del caballo.

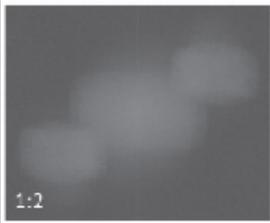
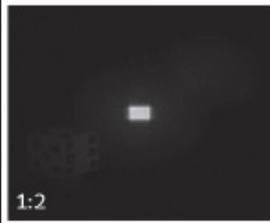
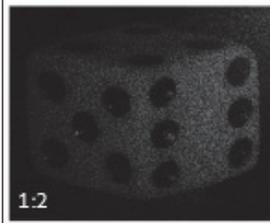
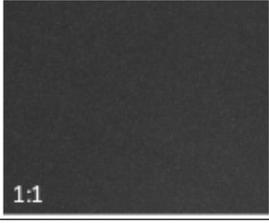
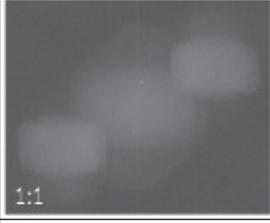
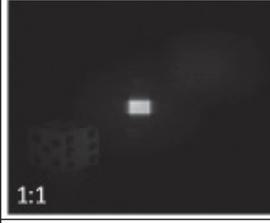
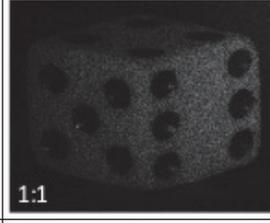
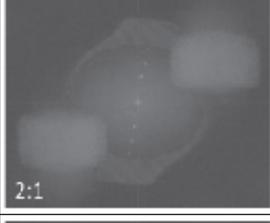
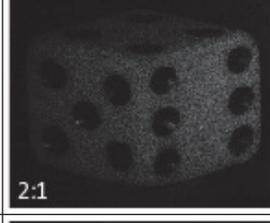
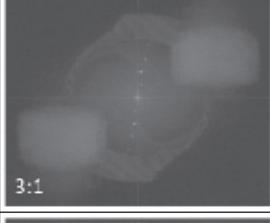
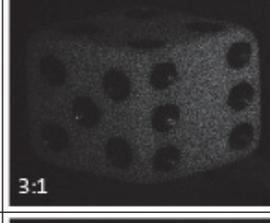
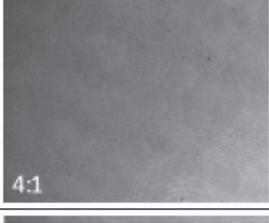
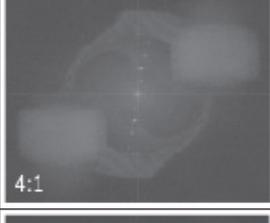
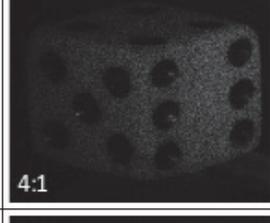
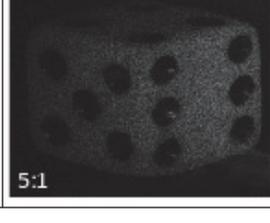
Holograma	Espectro de Fourier	Reconstrucción sin filtro	Reconstrucción orden +1
 1:2	 1:2	 1:2	 1:2
 1:1	 1:1	 1:1	 1:1
 2:1	 2:1	 2:1	 2:1
 3:1	 3:1	 3:1	 3:1
 4:1	 4:1	 4:1	 4:1
 5:1	 5:1	 5:1	 5:1

Figura 6. Resultados experimentales para el holograma de un dado cuando se cambia la relación de intensidades entre los haces de referencia y objeto. Columna 1: hologramas registrados. Columna 2: transformadas de Fourier. Columna 3: resultados de reconstrucción digital sin filtrado espacial. Columna 4: resultados de reconstrucción usando filtrado espacial.

determinada en gran parte por la relación de los haces de referencia y objeto, y por tanto, el cuidado de esta relación a la hora del registro determina la energía contenida en el orden cero y las imágenes gemelas en la reconstrucción. Adicional al requerimiento de buena eficiencia de

difracción, la relación de intensidades también está ligada a la generación del ruido de intermodulación (Hariharan, 1996; Jeong, 2008), por lo que hay un compromiso para la elección de la relación de intensidades entre altas o bajas en el que no sólo se puede atender a la eficiencia

de difracción del holograma como factor para su elección. La cuarta columna de la figura 6 muestra los resultados de reconstrucción de los hologramas al usar filtrado espacial. En estas imágenes no se observan diferencias notables en la calidad. En el caso de la holografía digital, gracias a sus ventajas para la manipulación de la información, el efecto negativo del orden cero, la imagen gemela y otros ruidos generalmente se pueden eliminar en su totalidad. Según esto, la relación de intensidades no es un factor de valor diferencial en la calidad de la imagen final reconstruida.

Con el fin de validar las observaciones anteriores, se hizo una réplica del experimento, utilizando un objeto de características diferentes al dado, un caballo de madera. La figura 7 muestra los resultados de la reconstrucción obtenida luego de realizar el proceso de filtrado espacial. Como se puede apreciar al igual que en el caso del dado, no hay cambios considerables en la calidad de las imágenes reconstruidas que puedan asociarse a la diferencia de intensidades entre los haces en el proceso de registro. Esta observación puede soportarse además con los resultados presentes en la figura 8. En la figura 8a. se muestran los valores promedio de la intensidad de los perfiles extraídos de los hologramas originales y los hologramas filtrados del dado, para las diferentes relaciones de intensidades entre haz de referencia y objeto. De la misma manera lo hace la figura 8b. para el modelo del caballo.

En esta figura 8 se puede observar que los promedios de intensidad en los hologramas filtrados son muy semejantes, indicando que la información del objeto está presente en todos los hologramas y que al usar el filtrado espacial se extrae esta información excluyentemente. Por tanto, la intensidad restante en los hologramas originales es la información que se puede interpretar como el ruido. En el

caso de holografía análoga esta es la parte de la información que implica la redistribución de la energía en los otros órdenes de difracción que no corresponden a la imagen deseada. Es decir, se disminuye la eficiencia de la difracción, como lo ilustra la tercera columna de la figura 6. En el caso de la holografía digital este efecto se puede evitar y es así que la calidad de las reconstrucciones mostradas en la cuarta columna de la figura 6 y en la figura 7, evidenciadas en el brillo promedio y el contraste, son mejores permitiendo observar mejor los detalles y puntos brillantes de los objetos reconstruidos sin una influencia evidente de la relación de intensidades de los haces de referencia y objeto.

Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que la condición de relación de intensidad del haz de referencia y el haz objeto, con la que se debe ser cuidadoso en el registro de holografía análoga, no es una condición necesaria en la holografía digital para obtener un holograma reconstruido numéricamente con buena calidad, siempre y cuando se realice un proceso de filtrado espacial.

El análisis de los perfiles de intensidad de los hologramas registrados muestran que la relación de intensidad entre los haces del registro solo cambian el nivel promedio de dichos perfiles mientras que la información de interés del objeto, extraída mediante el proceso de filtrado espacial, se mantiene similar en todos ellos. Esto implica en cuanto a la información contenida en el holograma, que parte de ésta en el momento de la reconstrucción hace que la energía aportada por la iluminación de reconstrucción se redistribuya de manera ineficiente en los órdenes de difracción no deseados. Este efecto es anulado con el filtrado espacial antes de la reconstrucción.

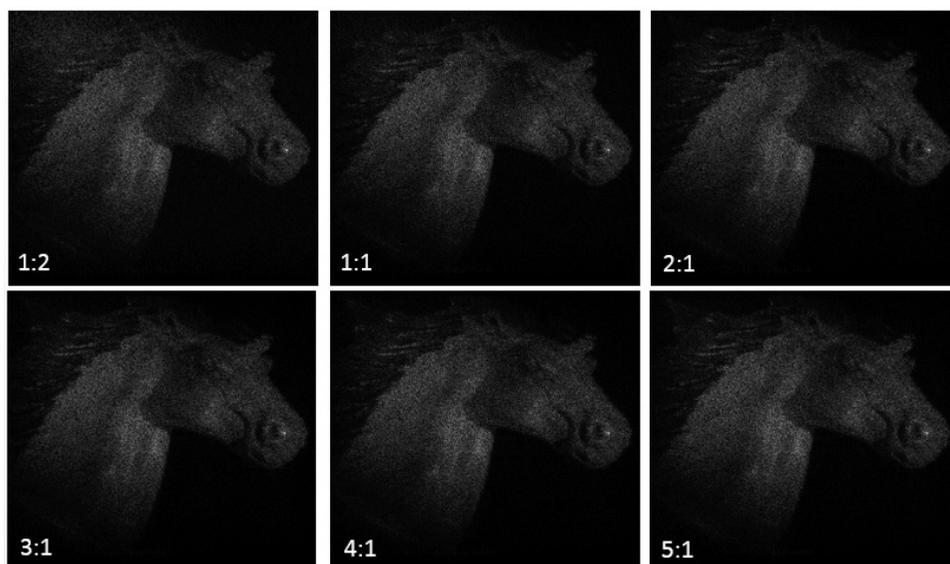


Figura 7. Resultados experimentales de reconstrucción para el holograma de un modelo de un caballo. Los resultados corresponden a las diferentes relaciones de intensidades usadas en este trabajo y usando filtrado espacial sobre los hologramas.

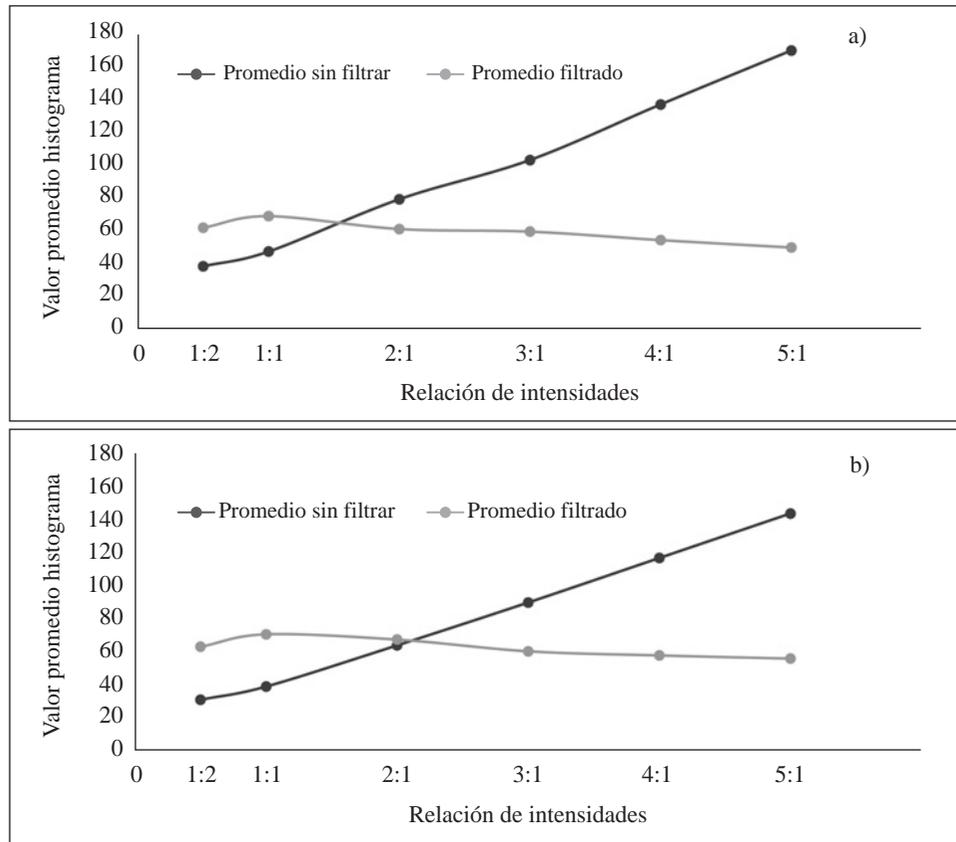


Figura 8. Promedio perfiles de intensidad: a) Valores promedio de las relaciones de intensidades de los hologramas del dado. b) Valores promedio de las relaciones de intensidad de los hologramas del caballo.

Lo anterior pone de manifiesto la ventaja de la holografía digital de poder manipular el holograma para extraer la información deseada, permitiendo que el cuidado estricto de la relación de intensidades de los haces de referencia y objeto durante el registro del holograma no sea un condicionante de alto valor para la calidad de las reconstrucciones holográficas numéricamente realizadas.

Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte de la Universidad Nacional de Colombia, Proyecto Hermes 19384, el Programa de Internacionalización del Conocimiento y el programa de Jóvenes Investigadores de Colciencias-Universidad Nacional de Colombia código Hermes 28751. Adicionalmente este trabajo se realizó con apoyo parcial del proyecto financiado por el Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM P14217.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Referencias

- Colomb, T., Pavillon, N., Kühn, J., Cucho, E., Depoursing, C., and Emery, Y. (2010). Extended Depth-of-Focus by Digital Holographic Microscopy. *Opt. Lett.*, **35** (11). OSA, 1840-42.
- Cucho, E., Marquet, P., and Depoursing, C. (2000). Spatial Filtering for Zero-Order and Twin-Image Elimination in Digital off-Axis Holography. *Applied Optics*, **39** (23): 4070-75.
- Demetrakopoulos, T., and Mittra, R. (1974). Digital and Optical Reconstruction of Images from Suboptical Diffraction Patterns. *Applied Optics*, **13** (3). Optical Society of America, 665-70.
- Frauel, Y., Naughton, T., Matoba, O., Tajahuerce, E., and Javidi, B. (2006). Three-Dimensional Imaging and Processing Using Computational Holographic Imaging. *Proceedings of the IEEE*, **94** (3): 636-53.
- García-Sucerquia, J., Herrera-Ramírez, J., and Velásquez-Prieto, D. (2004). DC Term Filtering Techniques in Digital Holography. Edited by Aristides Marcano O. and Jose Luis Paz. *Proc. SPIE*, **5622** (October): 1353-58.
- García-sucerquia, J., Herrera-Ramírez, J., and Velásquez-Prieto, D. (2005). Improvement of the Signal-to-Noise Ratio in Digital Holography. *Revista Mexicana de Física*, **51** (1): 76-81.
- García-Sucerquia, J., Xu, W., Jericho, S., Klages, P., Jericho, M., and Kreuzer, H. (2006). Digital in-Line Holographic Microscopy. *Appl. Opt.*, **45** (5). OSA, 836-50.
- Goodman, J W, and Lawrence, R. (1967). Digital image formation from electronically detected holograms. *Applied Physics Letters*, **11** (3).

- Goodman, J.** (2005). *Introduction to Fourier Optics*. Greenwood Village: Roberst & Company Publishers.
- Hariharan, P.** (1996). *Optical Holography: Principles, Techniques, and Applications*. 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Hasegawa, S., Hayasaki, Y., and Nishida, N.** (2006). Holographic Femtosecond Laser Processing with Multiplexed Phase Fresnel Lenses. *Optics Letters*, **31** (11). Optical Society of America, 1705.
- Herrera-Ramírez, J., and Garcia-Sucerquia, J.** (September, 2007). Digital off-Axis Holography without Zero-Order Diffraction via Phase Manipulation. *Optics Communications*, **277** (2): 259-63.
- Herrera-Ramírez, J., Mendoza, E., García, C., and Castaneda, R.** (2007). Aplicación de La Microscopía Holográfica Digital En Transmisión Para La Caracterización Del Espesor de Recubrimientos Delgados. *Scientia E Technica*, **4** (36): 467-72.
- Hincapie, D., Herrera, J., and Garcia-Sucerquia, J.** (2007). Filtering of Phase-Difference Images in Digital Holography. *Adaptive Optics: Analysis and Methods/Computational Optical Sensing and Imaging/Information Photonics/Signal Recovery and Synthesis Topical Meetings on CD-ROM*, June. Washington, D.C.: OSA, DTuD7.
- Hincapie, D., Herrera-Ramirez J., and Garcia-Sucerquia, J.** (2015). Single-Shot Speckle Reduction in Numerical Reconstruction of Digitally Recorded Holograms. *Optics Letters*, **40** (8).
- Javidi, B., Ferraro, P., Seung-Hyun., De Nicola, S., Finizio, A., Alfieri, D., and Pierattini, G.** (2005). Three-Dimensional Image Fusion by Use of Multiwavelength Digital Holography. *Optics Letters*, **30** (2). Optical Society of America, 144.
- Jeong, T.** (2008). Basic Principles and Applications of Holography BT - Fundamentals of Photonics. In *Fundamentals of Photonics*, 381-417.
- Jericho, M., Kreuzer, J., Kanka, M., and Riesenberger, R.** (2012). Quantitative Phase and Refractive Index Measurements with Point-Source Digital in-Line Holographic Microscopy. *Appl. Opt.*, **51** (10). OSA, 1503-15.
- Jericho, S., Garcia-Sucerquia, J., Xu, W., Jericho, M., and Kreuzer, J.** (2006). Submersible Digital in-Line Holographic Microscope. *Review of Scientific Instruments*, **77** (4). AIP, 43706-10.
- Maycock, J., Hennelly, B., McDonald, J., Frauel, Y., Castro, A., Javidi, B., and Naughton, T.** (2007). Reduction of Speckle in Digital Holography by Discrete Fourier Filtering. *J. Opt. Soc. Am. A*, **24** (6). OSA, 1617-22.
- Picart, P.** (2015). *New Techniques in Digital Holography*. Edited by Pascal Picart. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc.
- Picart, P., and Leval, J.** (2008). General Theoretical Formulation of Image Formation in Digital Fresnel Holography: Erratum. *J. Opt. Soc. Am. A*, **26** (2). OSA, 244.
- Piedrahita, P., Castañeda, R., and Garcia-Sucerquia, J.** (2015). Numerical wave propagation in ImageJ, *App. Opt* **54** (21): 6410-6415.
- Restrepo, J., and Garcia-Sucerquia, J.** (2013). Numerical Evaluation of the Limit of Concentration of Colloidal Samples for Their Study with Digital Lensless Holographic Microscopy. *Appl. Opt.*, **52** (1). OSA, A310-18.
- Schnars, U., and Jüptner, W.** (1994). Direct Recording of Holograms by a CCD Target and Numerical Reconstruction. *App. Opt.*, **33** (2), 179-81.
- Schnars, U., Falldorf, C., Watson, J., and Jüptner, W.** (2015). *Digital Holography and Wavefront Sensing*. 2nd ed. Springer Berlin Heidelberg.
- Schnars, U., and Jueptner, W.** (2005). *Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques*. *Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques*. Springer Berlin Heidelberg.
- Schnars, U., and Juptner, W.** (2002). Digital Recording and Numerical. *Institute of Physics Publishing*, **13**: 17.
- Takeda, M., Ina, H., and Kobayashi, S.** (1982). Fourier-Transform Method of Fringe-Pattern Analysis for Computer-Based Topography and Interferometry. *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1). OSA, 156-60.
- Teeranutrannon, S., and Yoshimori, K.** (2013). Digital Holographic Three-Dimensional Imaging Spectrometry. *App. Opt.* **52** (1). Optical Society of America, A388-96.
- Thurman, S., and Bratcher, A.** (2015). Multiplexed Synthetic-Aperture Digital Holography. *Applied Optics*, **54** (3). OSA, 559.
- Vorobyov, S.** (2003). 24. Adjustment of Beams Ratio and Determination of Hologram's Exposure Time. 25 *Holography Lessons*.
- Xue, G., Liu, J., Li, X., Jia, J., Zhang, Z., Hu, B., and Wang, Y.** (2014). Multiplexing Encoding Method for Full-Color Dynamic 3D Holographic Display. *Optics Express*, **22** (15). OSA, 18473.

Ojo y visión: un posible origen del entrecruzamiento en el quiasma óptico

Juan Diego Vélez^{1*}, Antonio Vélez²

¹ Escuela de Matemáticas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

² Departamento de Matemáticas, Universidad de Antioquia

Resumen

A partir de una pequeña imagen plana que se proyecta sobre la retina de cada ojo, nuestro cerebro es capaz de reconstruir una realidad en tres dimensiones, una en la que los objetos del mundo físico se perciben en profundidad y cuyas posiciones se juzgan de manera extraordinariamente fiel, en coincidencia casi perfecta con las auténticas coordenadas espaciales. A partir de esos dos recuadros planos nuestro cerebro inventa un mundo visual, rico en detalles, matices y colores. Un proceso en apariencia tan simple requiere, no obstante, la contribución de una constelación de complejas y hasta ahora misteriosas rutinas cognitivas, algoritmos que la naturaleza ha descubierto en el transcurso de millones de años de evolución. En este artículo haremos un rápido y modesto recorrido a través de ese mundo extraordinario que es nuestro sistema visual. También propondremos una posible hipótesis para explicar el curioso y paradójico entrecruzamiento que ocurre en el quiasma óptico entre un hemisferio cerebral y el comando de su correspondiente área motriz contralateral.

Palabras clave: anatomía del ojo, quiasma óptico, evolución del ojo, ilusiones ópticas, Ley de Emmert, pareidolia.

Eye and vision: A possible origin of the crosslinking in the optic chiasm

Abstract

From a small flat image projected on the retina of each eye, our brain is able to reconstruct a three-dimensional reality, one in which the objects of the physical world are perceived in depth, and whose positions are judged faithfully, coinciding almost perfectly with their real space coordinates. From those two flat squared images, our brain invents a rich reality, full of details, colors and hues. A seemingly simple process requires, notwithstanding, the contribution of a constellation of complex, and so far, mysterious, cognitive routines, algorithms that nature has discovered over millions of years of evolution. In this article we will make a fast and modest journey through the extraordinary world of our visual system, and propose a plausible hypothesis that would explain the strange and paradoxical crossing at the midline optic chiasm.

Key words: Anatomy of the eye, optic chiasm, evolution of the eye, optical illusions, Emmert's Law, pareidolia.

Introducción

Dos pequeñas imágenes planas se proyectan sobre la retina de cada ojo. A partir de esos dos recuadros diminutos nuestro cerebro inventa un universo rico en detalles, matices y colores. El mundo del vidente y sus tres dimensiones, ese escenario largo, ancho y profundo en el cual nos movemos, es una de las más extraordinarias invenciones de nuestra mente.

No obstante, el acto de ver, un proceso en apariencia tan simple, requiere la contribución de una constelación de complejas y hasta ahora misteriosas rutinas cognitivas, sofisticados algoritmos que la naturaleza ha descubierto en el transcurso de millones de años de evolución.

En este artículo haremos un modesto y rápido recorrido a través de ese mundo maravilloso que es nuestro sistema visual. Para comenzar, mostraremos algunas de las hipótesis

más aceptadas entre los biólogos para explicar cómo el simple mecanismo darwiniano de selección natural pudo haber “descubierto” las distintas soluciones al problema de la visión que hoy observamos en el mundo animal.

Por otro lado, especularemos acerca del caprichoso diseño del ojo humano, el cual se hace evidente en sus obvios “errores” de construcción, y propondremos una posible hipótesis para explicar el origen del curioso entrecruzamiento nervioso que ocurre en el quiasma óptico. Mostraremos, así mismo, cómo el acto de “ver” no es otra cosa que una compleja elaboración de nuestro aparato cognitivo, una cuya materia prima se limita a la escasa

*Correspondencia:

Juan Diego Vélez, jvvez@unal.edu.co

Recibido: 21 de julio de 2015

Aceptado: 7 de septiembre de 2015

información visual que llega a través de nuestros sentidos. Las complejidades de este mecanismo son manifiestas en las llamadas ilusiones visuales y en algunos fenómenos gestálticos, como en la pareidolia visual y en la llamada ley de Emmert (aquella ilusión en la que el Sol y la Luna parecen tener mayor tamaño cuando se encuentran cerca del horizonte), de la cual intentaremos dar una explicación.

Evolución del ojo

Desde los tiempos de Darwin el ojo ha sido por excelencia el arquetipo del órgano complejo. La pregunta ha intrigado por siempre a los biólogos: ¿cómo una cámara fotográfica en miniatura, dotada de obturador, lente ajustable y un fondo fotosensible (Figura 1) pudo haberse formado en el transcurso de la evolución de la vida en la Tierra? La pregunta mantuvo intrigado a Darwin, hasta el punto de manifestar que estaba dispuesto a abandonar su teoría si alguno de sus contradictores pudiese demostrarle que un órgano tan complejo como el ojo humano jamás podría aparecer mediante una sucesión de cambios graduales y que, por ende, escaparía al mecanismo de selección natural.

Hoy sabemos que la madre naturaleza no solo “descubrió” el ojo de la manera como Darwin había imaginado, sino que lo hizo muchas veces, de forma independiente, inventando multitud de soluciones diferentes. Muchas de las criaturas vivas que hoy conocemos poseen ojos harto similares a aquellos de animales ya extintos presentes en el registro fósil.

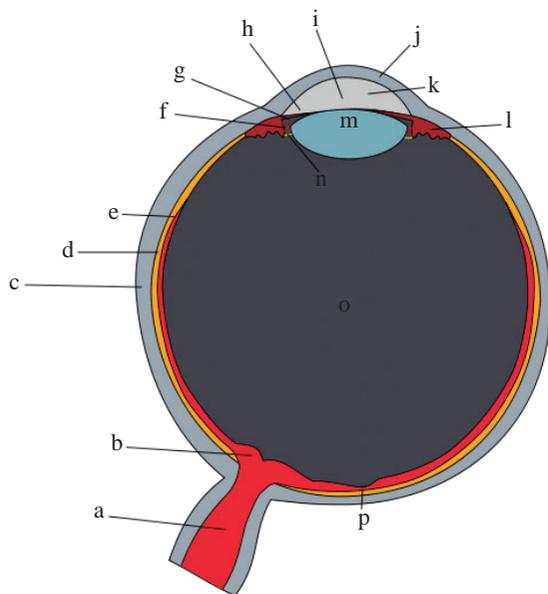


Figura 1. El ojo humano: una cámara fotográfica en miniatura. a: nervio óptico; b: disco óptico; c: esclerótica; d: coroides; e: retina; f: fibras sonulares; g: cámara posterior; h: iris; i: pupila; j: córnea; k: cámara anterior; l: músculo ciliar; m: cristalino; n: ligamento suspensorio; o: humor vítreo; p: fovea.

Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schematic_diagram_of_the_human_eye.svg?uselang=es

Los ojos más simples en el mundo vivo aún se pueden observar en los unicelulares del género *Euglena* (Figura 2). Estos organismos poseen un pequeño punto fotosensible que determina la presencia o ausencia de luz. Y aunque inhabilitado para formar imágenes, el pequeño ojo logra poner en acción un diminuto flagelo, sistema locomotor del protozoo, capaz de dirigir al diminuto euglénido hacia las posibles fuentes de alimento.

En el comienzo el ojo pudo haberse limitado a una diminuta mancha fotosensible, la cual debió crecer pronto hasta alcanzar las dimensiones de un pequeño disco. Con el tiempo, una de las caras de este disco se cubrió de un fino sustrato de pigmento oscuro, lo que le permitió al ojo primigenio discriminar la dirección de la luz incidente, pues solo aquellos rayos que llegaban de manera frontal lograban activar la zona fotosensible. Es razonable conjeturar que los primeros pigmentos utilizados para llevar a cabo la fotosíntesis modificaron sus funciones hasta convertirse en sustancias químicas, como la rodopsina (presente en los bastones del ojo), capaces de reaccionar ante la presencia de luz.

El siguiente paso evolutivo consistió en la creación de una estructura invaginada en forma de copa. De esta manera, distintas partes de la superficie de la copa se iluminarían dependiendo del lugar del cual proviniera la luz, lo cual le dio aún más direccionalidad a esos ojos primitivos. Ojos en “forma de copa” todavía pueden apreciarse en los moluscos gasterópodos, y en algunos gusanos planos, en los que la invaginación representa una ventaja evolutiva, pues le permite al organismo determinar la ubicación de presas o depredadores dependiendo de la fuente de luminosidad y de las proyecciones de las distintas sombras (Figura 3).

Milenios más tarde, la abertura frontal, precursora del iris, debió cerrarse hasta convertir todo el conjunto en una especie de cámara oscura mediante la cual ya era posible distinguir siluetas. La abertura de esta cavidad oscura pudo haberse cubierto de un delgado recubrimiento epidérmico, una membrana transparente con alguna capacidad de refracción,

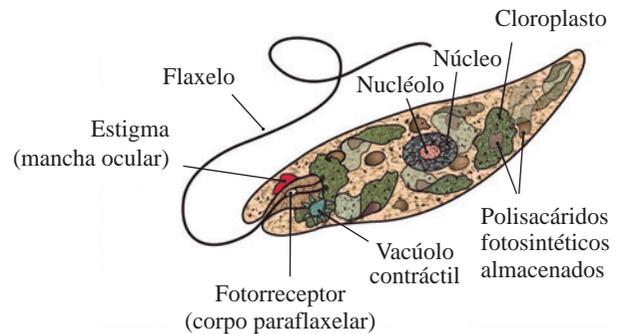


Figura 2. *Euglena*.

Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Euglena#/media/File:Euglena_diagram_gl.jpg



Figura 3. *Patella*, molusco gasterópodo. Fuente: [https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Patella_\(mollusc\)?uselang=es#/media/File:Patella_variabilis_concolor_002.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Patella_(mollusc)?uselang=es#/media/File:Patella_variabilis_concolor_002.jpg)

posible antecesora de la córnea y del cristalino. Existe multitud de criaturas vivientes “congeladas en el tiempo”, las cuales poseen un sistema visual a mitad de camino que sugiere cómo pudo haber sido el desarrollo evolutivo de un órgano tan complejo como el ojo.

El nautilo, por ejemplo, está dotado de dos superficies fotosensibles que conforman una pequeña cámara oscura, sin córnea ni cristalino. En el anfibio y en las estrellas de mar se puede observar un ojo más evolucionado: la misma cámara oscura se encuentra rellena con un material transparente y protegida por un delgado tramo de piel (Figura 4).

En los insectos, la evolución eligió una dirección diferente: en lugar de crear una cámara oscura, los ojos conservaron su tamaño pequeño. Con el tiempo, su forma se hizo alargada, estrecha y profunda. Estos ojos en forma de cuña se multiplicaron en número y se empaquetaron formando esferas. Cada uno de esos ojos diminutos debió permanecer aislado de sus vecinos mediante un pigmento oscuro depositado en las paredes laterales. Fue así, quizá, como aparecieron los extraordinarios ojos compuestos de los insectos (Figuras 5 y 6), otra solución ingeniosa de la madre naturaleza al problema de construir un órgano de la visión.

Existen así mismo en el reino animal soluciones ópticas de “alta tecnología” al problema de recoger luz: en lugar de lentes, la naturaleza descubrió, al igual que los humanos, la forma de utilizar espejos: el ojo del crustáceo ostrácodo *Gigantocypris* no consiste en una lente sino en un espejo parabólico que recibe la luz y la enfoca en una diminuta retina esférica situada en el foco del paraboloide.

Y si de construir fotorreceptores ultrasensibles se trata, algunos animales nocturnos poseen detrás de la retina una capa de células reflectoras, el *tapetum lucidum*, que les permite a los rayos incidentes reflejarse y excitar por

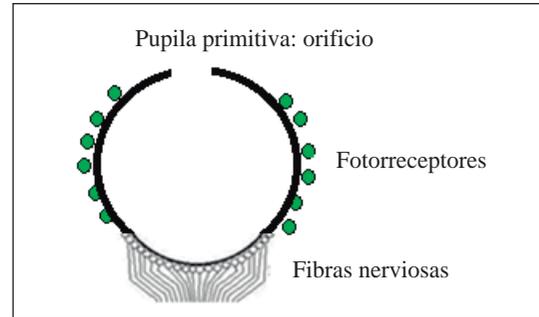


Figura 4. Ojo del nautilo. Ilustración de los autores.

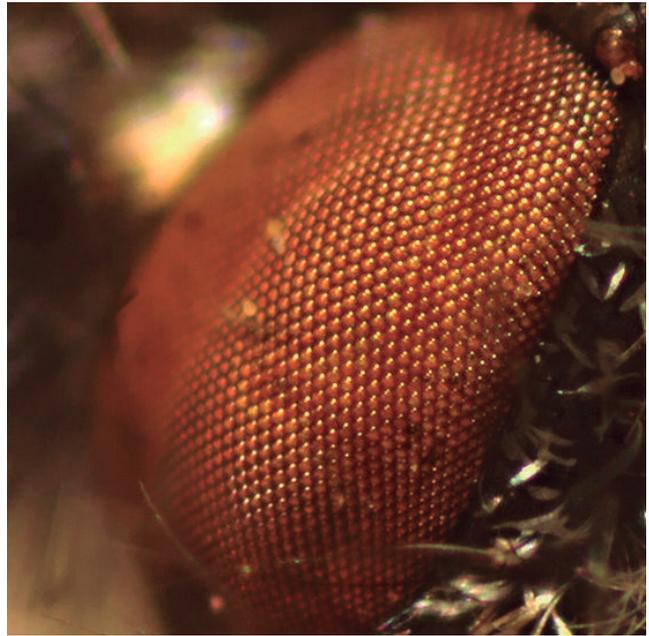


Figura 5. Ojo compuesto. Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bombylidae_ojo_compuesto.jpg?uselang=es



Figura 6. Ojos fósiles de trilobites de hace millones de años. Fuente: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Azurite-216054.jpg?uselang=es>

segunda vez la retina, lo cual duplica su sensibilidad. Esto explica por qué cuando en la noche los faros de un carro iluminan los ojos de los perros y los gatos, y del ganado, estos parecen brillar como dos diabólicos círculos brillantes (Figura 7) (Vélez, 1998).

¿Diseño inteligente?

Si los órganos de nuestros cuerpos hubiesen sido pensados por un diseñador inteligente, nuestros ojos, como los de todos los mamíferos, no poseerían tan obvios errores de construcción. En los cefalópodos, por ejemplo, los vasos sanguíneos de la retina y los ramales nerviosos que de allí se desprenden están dispuestos, como cualquier ingeniero competente lo hubiera hecho, por debajo de ella, de tal forma que no interfieran con la luz incidente. En los mamíferos, por el contrario, los vasos sanguíneos y el nervio óptico se encuentran por encima de la retina, y le roban luz. Hasta 90 % de la luz incidente se pierde al atravesar la córnea, el humor acuoso, el cristalino, el humor vítreo, más todo el entramado nervioso y vascular. Si el ojo no hubiese sido el resultado del ensayo y el error de un «relojero ciego», hoy podríamos leer bajo el claro de luna y caminar sin tropiezos durante la noche (Vélez & Álvarez, 2014).

Existe otro defecto en el diseño del cristalino de los mamíferos, uno que viene a manifestarse en la edad madura: la presbicia. Con el paso de los años, el cristalino se va engrosando a medida que se acumulan capas de tejido nuevo, lo cual disminuye su elasticidad. El resultado de estos cambios es la pérdida de acomodación, un problema que curiosamente no ocurre con los peces ni con los cefalópodos. Tampoco sufren de presbicia ni las aves ni las lagartijas ni las tortugas, como si el Creador se hubiese esmerado en diseñar buenos ojos entre las criaturas “inferiores”, y hubiese sido algo torpe a la hora de perfilar los ojos de su creación suprema.



Figura 7. *Tapetum lucidum*. Fuente: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cat%27s_eyes_glowing_in_the_dark.jpg? uselang=es](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cat%27s_eyes_glowing_in_the_dark.jpg?uselang=es)

Y existen aún más errores de diseño, como la presencia de un punto ciego, un lugar en nuestros ojos carente de receptores lumínicos (Figura 8). Podemos realizar el siguiente experimento para demostrar la existencia de este punto ciego: dibujemos en una hoja de papel una estrella y un pequeño círculo, separados entre sí unos veinte centímetros. Coloquemos ahora la hoja a unos cuarenta centímetros de distancia, y mientras cerramos el ojo derecho, fijamos la mirada con el izquierdo en la pequeña estrella. Luego vamos acercando lentamente el papel: se podrá observar cómo el círculo desaparece, precisamente cuando este entra en el área sin sensibilidad óptica. Al acercar un poco más el papel, el punto vuelve a aparecer (Figura 9).

El cerebro: prolongación del ojo

Algunos biólogos conjeturan que el cerebro bien pudo haber aparecido a manera de extensión o apéndice del ojo. De hecho, nuestras retinas están conformadas por neuronas modificadas. Es factible que en los comienzos de la vida el primer cerebro rudimentario no cumpliera otra función que activar el sistema locomotor, una vez se lograra excitar los órganos fotosensibles. Este primer paso evolutivo se puede considerar como un esbozo inicial de conducta inteligente: buscar el alimento en aquel lugar de donde proviene la luz, es decir, la superficie del océano,



Figura 8. Punto ciego. Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Left_Retina.jpg?uselang=es

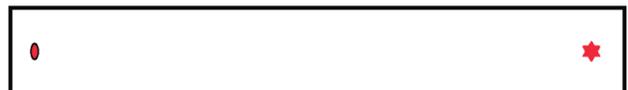


Figura 9. Punto ciego (experimento). Ilustración de los autores.

donde suele ser más abundante. Asimismo, pudo ser la primera manifestación de una “decisión voluntaria” en la historia de la vida.

El caprichoso entrecruzamiento de los nervios ópticos en el quiasma (Figura 10) bien podría tener un origen que revelara la manera cómo el cerebro apareció, justamente para interpretar la información visual. Según una hipótesis conjunta desarrollada por los autores, una posible explicación evolutiva sería la siguiente: si pensamos en un organismo primitivo como una especie de «tríciclo fototáxico» (Figura 11), la fotocelda de la izquierda, más cercana a la fuente lumínica y mejor orientada con respecto a ella, captaría más energía que su compañera y, en consecuencia, enviará una señal más intensa a la aleta del lado opuesto. Esta aumentaría así su velocidad de remo, lo cual haría que el vehículo girara un poco hacia la izquierda. En esta posición el animal estaría preparado para iniciar su rumbo hacia la fuente energética (trayectoria punteada). Otras explicaciones han sido propuestas por diferentes autores (Vulliemoz, *et al.*, 2005).

Vemos con nuestros cerebros

Podemos afirmar, aunque nos parezca poco intuitivo, que no vemos con nuestros ojos sino con nuestro cerebro. Macacos y chimpancés privados de todo estímulo visual durante los primeros meses de vida jamás “aprenden a ver”, y permanecen ciegos de por vida, a pesar de que sus ojos se encuentren sanos y perfectamente desarrollados. Cuando se examina al microscopio la corteza cerebral de los animales privados de todo estímulo visual, se observa una deficiente interconexión sináptica, de donde se infiere que los circuitos visuales encargados de procesar la información proveniente de los ojos se desarrollan tempranamente con la experiencia de “ver”, un evento que debe ocurrir cuando todavía el cerebro se encuentra en formación (Vélez, 2007).

En la literatura médica se relata el triste caso de un hombre que perdió la vista a los diez meses de edad debido a un trauma en la córnea. Sidney Bradford creció ciego y aprendió a vivir su vida como cualquier otra persona con esa discapacidad. Sin embargo, los avances de la medicina, específicamente los trasplantes de córnea, trajeron por fin una luz de esperanza y la promesa de poder recuperar su visión. Pero ello ocurrió cuando Bradford ya contaba con 52 años de edad. La expectativa de la operación dejó al mundo en vilo ¡Cuán maravilloso sería el testimonio de aquel hombre una vez abriera sus ojos y se encontrara con la infinita riqueza del mundo visual!

Pero después de la operación los progresos del señor Bradford fueron desalentadores: jamás pudo cruzar la calle con los ojos abiertos. El mundo era para él un inmenso caleidoscopio ininteligible de colores en movimiento, de siluetas amenazantes que se le venían encima. Los rostros de las personas le resultaban incomprensibles pues carecían

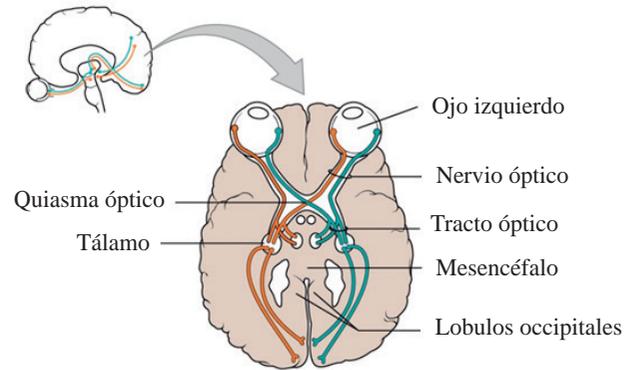


Figura 10. Interconexión invertida en el quiasma óptico

Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1204_Optic_Nerve_vs_Optic_Tract.jpg y https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Optic_chiasm#/media/File:1204_Optic_Nerve_vs_Optic_Tract.jpg

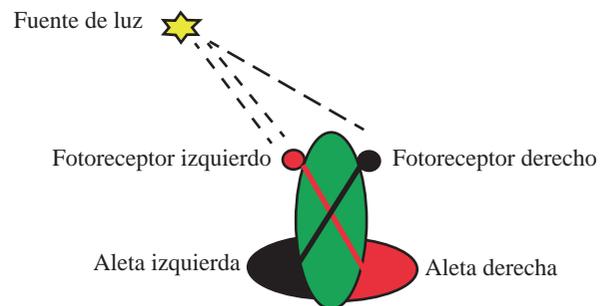


Figura 11. Triciclo fototáxico. Ilustración de los autores.

de detalles y expresión. Las mujeres, antes hermosas --se quejaba el señor Bradford--, ahora le resultaban insoportablemente feas (Ackroyd, *et al.*, 1974).

El hecho cruel es que nunca aprendió a ver. Creía, por ejemplo, que podía salir de su casa, no como siempre lo hizo, por la puerta principal, sino descolgándose hasta la calle por la ventana de su alcoba, ¡situada en un cuarto piso! Para su cerebro, la simple tarea de calcular la profundidad y las distancias del mundo real escapaba a sus capacidades. Desde el balcón de su residencia, la calle parecía estar justo al alcance de sus pies.

El caso de Bradford se ha repetido más de una vez. Algunos bebés nacen con cataratas en ambos ojos, defecto que los convierte en ciegos de nacimiento. Durante mucho tiempo se creyó que no era conveniente operarlos hasta alcanzar los diez años de edad. Hay que recordar, eran épocas en las que la cirugía implicaba riesgos muy altos. Pero muy pronto se dieron cuenta de que los niños operados a tan tardía edad quedaban limitados de por vida, casi ciegos. Nunca fueron capaces de estimar las distancias, ni de reconocer patrones, ni formas. En síntesis, una vez pasado el periodo de plasticidad cerebral, los niños quedaban incapacitados para ver, tarea que a todos nos resulta tan cotidiana, tan normal y tan sencilla como respirar.

Psicología de la percepción visual

Las ilusiones visuales constituyen una prueba indirecta de que no todo lo que vemos está allí, en el mundo físico, pues estas resultan de la interpretación que nuestro cerebro hace de la información que llega a través de nuestros sentidos. Podemos realizar experimentos muy simples que nos permiten llegar a esta conclusión. Por ejemplo, ¿por qué al mover la mirada de un lado a otro el campo visual permanece fijo, no obstante que desde el punto de vista óptico este debería moverse, pues la imagen en cada retina se desplaza en sentido contrario al movimiento de nuestros ojos? Por otro lado, si presionamos levemente con un dedo uno cualquiera de nuestros ojos, observamos que en efecto la imagen sí se mueve, como sería natural conjeturar.

La razón de dicha paradoja estriba en que en el primer caso los movimientos oculares son controlados por los seis pares de músculos encargados de la rotación, la elevación y la depresión de los globos oculares. Cuando ello ocurre, nuestro cerebro «da la orden» de contrarrestar el inevitable desplazamiento aparente del campo visual, lo que no sucede cuando el movimiento del globo ocular se debe a un agente externo, como el dedo, y no está asociado al comando voluntario de «mover la mirada» (Figura 12).

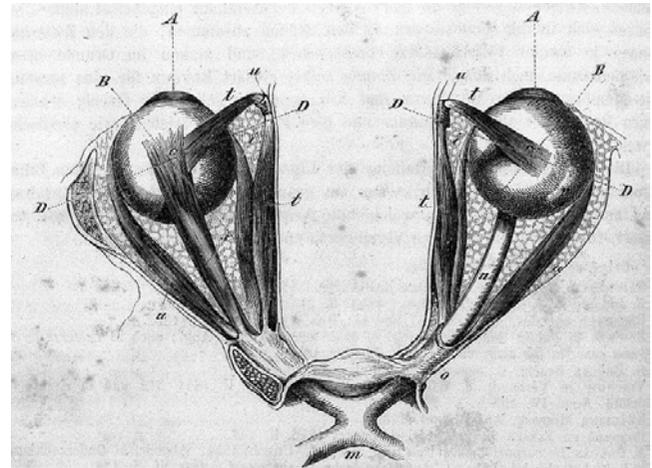


Figura 12. Músculos oculares.
 Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Optic_nerve_and_ocular_muscles._Wellcome_L0009855.jpg?uselang=es

Triángulo de Kanizsa

Una prueba fehaciente de que podemos ver objetos que no se encuentran en el mundo real la proporciona el llamado triángulo de Kanizsa, un contorno subjetivo construido enteramente por nuestro cerebro. En la Figura 13 se puede apreciar un triángulo blanco ilusorio que, de hecho, aparece más brillante que el área circundante, aunque la luz de fondo sea igual.

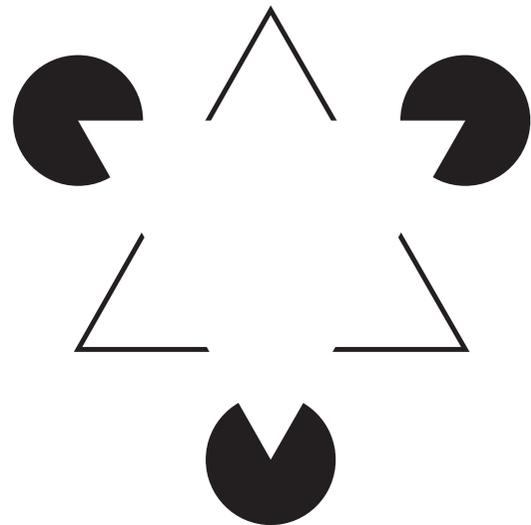


Figura 13. Triángulo de Kanizsa.
 Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kanizsa_triangle.svg

Ley de Emmert

El fenómeno conocido como ley de Emmert es una ilusión visual bien conocida, responsable de que veamos el Sol y la Luna de tamaños mucho más grandes cuando estos astros se encuentran cerca del horizonte. Al contrario, cuando miramos la ciudad a través de la ventanilla de un avión a baja altura tenemos la impresión de estar viendo un mundo de dimensiones minúsculas, uno en el cual las casas y los carros parecen de juguete.

El fenómeno puede explicarse en términos matemáticos de la siguiente manera: el tamaño aparente de un objeto, t , aquel que determina nuestro cerebro, es aproximadamente la distancia aparente, d (resultado de un complejo estimativo que realiza nuestro aparato cognitivo), multiplicada por el ángulo subtendido por dicho objeto (en radianes). Simbólicamente, $t \approx ad$. La ley es una buena aproximación de la ecuación $t = d \tan(a)$, ya que $\tan(a) \approx a$, para valores pequeños del ángulo a (Figura 14).

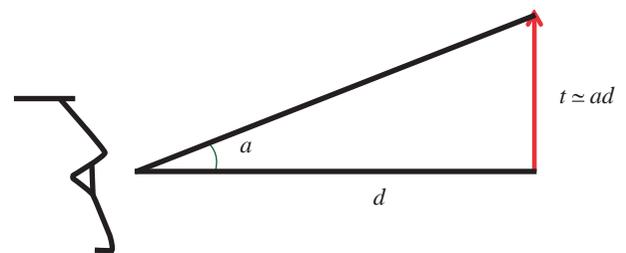


Figura 14. Ley de Emmert. Ilustración de los autores.

La ley de Emmert explicaría la ilusión antes mencionada (Figura 15). Ocurre en ese caso que nuestro cerebro estima de manera diferente la distancia aparente del astro cuando

este se encuentra cerca del horizonte y cuando se halla en el cenit. En el plano del horizonte contamos con multitud de puntos de referencia, mientras que en el cenit todo parece estar situado a igual distancia (por ello la ilusión de que

el cielo es una gran bóveda). De allí que al amanecer o al atardecer el Sol o la Luna parezcan estar mucho más lejos, pues nuestro cerebro nos indica, para dar un ejemplo, que el Sol estaría situado detrás de todos los postes de luz, más allá de las casas que se divisan en la distancia, incluso más lejos que la montaña que se aprecia en el horizonte, e incluso más allá de las nubes. Si llamamos D a la distancia estimada por nuestro cerebro cuando el Sol se ve en el horizonte, y d , a aquella cuando el astro se encuentra en el cenit, lo anterior se puede resumir en la desigualdad $D > d$. De otro lado, el ángulo subtendido por el astro es el mismo en ambos casos, pues dicho ángulo solo depende de su diámetro real y de su distancia verdadera. Así, según la ley de Emmert, los tamaños aparentes serían en cada caso $T = Da$ y $t = da$. Pero $D > d$ implica $T > t$ (Figura 16).

Algunos han argumentado que el mayor tamaño aparente en el horizonte se debe a un efecto de lente de la atmósfera. La teoría puede refutarse sin dificultad: basta tomar una



Figura 15. Ley de Emmert y tamaño aparente del Sol cerca del horizonte. Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/Sun#/media/File:Actual_Sunset.jpg

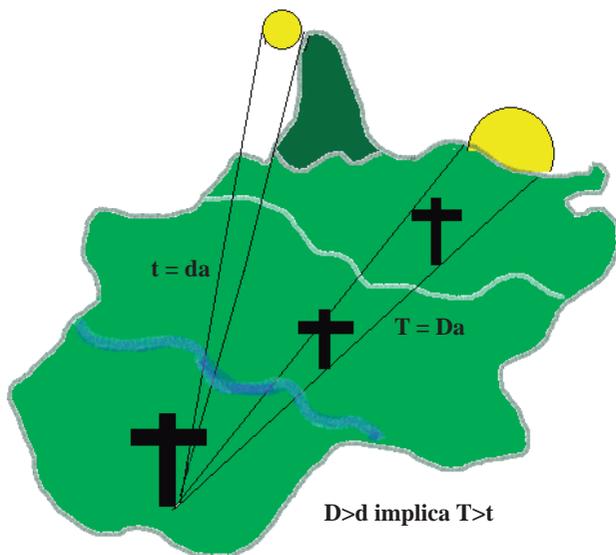


Figura 16. Ley de Emmert (Diagrama). Ilustración de los autores.



Figura 17. El dálmata “escondido”.

Fuente: <https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Gestalt?uselang=es#/media/File:Gestalt5.PNG>

serie de fotografías del Sol o de la Luna en su movimiento por la bóveda celeste para comprobar que los diámetros permanecen constantes a lo largo de todo el recorrido.

Reconocimiento de patrones

Una de las características más extraordinarias de nuestro sistema visual puede ser su capacidad para distinguir y reconocer patrones. Podemos adivinar, por ejemplo, la silueta de un perro dálmata en las manchas caóticas de la siguiente fotografía (Figura 17).

Nuestra capacidad para reconocer patrones depende de rutinas que podríamos denominar gestálticas (reconocimiento por contexto), como puede demostrarse en el hecho de que casi toda persona es capaz de leer sin la menor dificultad el siguiente texto en el que solo es reconocible la estructura global, mientras que la información local es errónea.

C13R70 D14 D3 V3R4N0 3574B4 3N L4PL4Y4
 0853RV4ND0 4 D05 CH1C45 8R1NC4ND0 3N 14 4R3N4.
 357484N 7R484J484ND0 9UCH0 C0N57RUY3ND0 UN
 C4571LL0 D3 4R3N4 C0N 70RR35, P454D1Z05 0CUL705
 Y PU3N735. CU4ND0 357484N 4C484ND0 V1N0 UN4
 0L4 D357RUY3ND0 70D0.

“Cierta día de verano estaba en la playa observando a dos chicas brincando en la arena. Estaban trabajando mucho construyendo un castillo de arena con torres, pasadizos ocultos y puentes. Cuando estaban acabando vino una ola destruyendo todo” (Vélez, *et al.*, 2010).

Y podemos reconocer multitud de “patrones escondidos”, como se ve en las siguientes imágenes (Figuras 18 y 19):

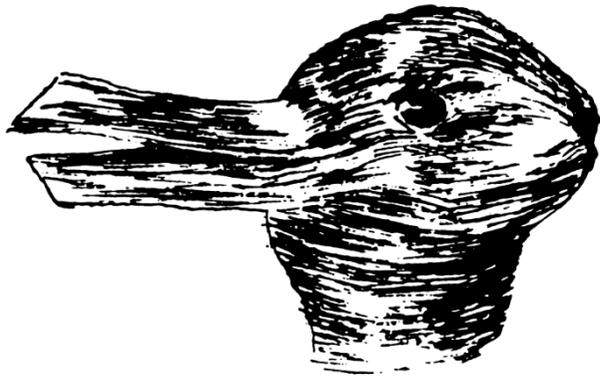


Figura 18. ¿Pato o conejo? Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Pareidolias_in_art#/media/File:Duck-Rabbit.png



Figura 19. ¿Una calavera? Fuente: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Allisvanity.jpg>

Pareidolia

Algunos recordarán las fotografías de Sidonia, esa región de la superficie de Marte donde se encuentra una formación rocosa que recuerda el rostro de un antiguo faraón mirando hacia el cielo. Más de un ufólogo encontró en la cara marciana (Figura 20) la confirmación de que la NASA ocultaba información sobre la existencia de civilizaciones

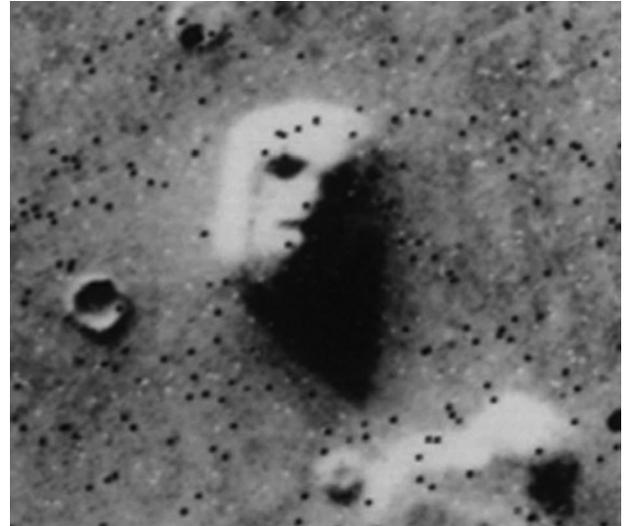


Figura 20. La cara marciana. Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Martian_face_viking_cropped.jpg?uselang=es

extraterrestres. Tras años de discusiones, el alegato ‘conspiranoico’ finalmente se desmoronó: en 2001, la nave Mars Global Surveyor volvió a fotografiar la misma zona, esta vez a una distancia de escasos 400 kilómetros. Visto de cerca, el inconfundible rostro humanoide resultó ser una meseta rocosa salpicada de picos y depresiones, situada en medio del yermo y polvoriento paisaje marciano (Ziegler, 2013).

Pareidolia es un vocablo que se deriva de la palabra griega *eidolon*, que quiere decir figura, y del prefijo *para*, que significa junto. También es el término que utilizan los psicólogos para designar esas ilusiones de la percepción en las que rostros humanos o formas animales parecen dibujarse en las nubes, en los nudos de la madera, en las humedades de un muro o en las salientes y grietas de una roca. El fenómeno aparece como respuesta automática de nuestro aparato cognitivo cuando la información sensorial es ambigua o insuficiente.

Nuestro cerebro, a la caza permanente de relaciones, trata de completar la información ausente asimilándola a patrones familiares. De ahí que los nudos en el tronco de un árbol se transfiguren de súbito en el perfil de un hombre narigudo o en la figura de una bruja, y los faros y la parrilla de un vehículo, en una cara humana. Quizás ello también explique por qué la Santísima Virgen escoge hacer sus apariciones en objetos tan impíos como las humedades de un muro derruido, los chamuscados de una tortilla o la corteza de un buñuelo (Ziegler, 2013).

A continuación se pueden apreciar un par de ejemplos de pareidolia (Figuras 21 y 22).

Estamos especialmente dotados para reconocer una clase de patrón particularmente importante para nuestra supervivencia: el rostro humano. De allí que existan regiones del córtex



Figura 21. Rostros y formas animales en las nubes.

Fuente: <https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Pareidolias#/media/File:SharkOrSubmarine4024617900.jpg>



Figura 22. Ojos y caras donde en realidad no hay ninguna.

Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Pareidolias#/media/File:N%C3%A9cropole_nationale_de_Sigolsheim_2013_51.jpg

visual especializadas exclusivamente en el reconocimiento de caras. Una cara vista en una posición anormal puede tener defectos que pasarían desapercibidos, pero que serían clarísimos si se nos presenta en su posición normal.

Existe, de hecho, una forma específica de agnosia visual (anormalidad para procesar información visual), caracterizada por la incapacidad de reconocer rostros, pues aunque se distinguen cada uno de los rasgos de una cara: boca, nariz, ojos, cejas..., no es posible recordar su ubicación dentro de la cara. Quienes padecen esta enfermedad, llamada prosopagnosia, pueden recordar los rostros de sus amigos y familiares, incluso recuerdan el cabello, los tonos de la piel, todo lo que en general se denomina contexto de la persona. No obstante, no pueden reconocer o comprender el rostro de las personas que ven (Sacks, 1987).

El misterio de las ilusiones ópticas

Aunque la neurología moderna ha comenzado a comprender cómo funciona ese complejo sistema ojo-cerebro, muchas de las ilusiones ópticas más conocidas carecen

aún de una explicación satisfactoria. No obstante, algunas ilusiones visuales han sido bien explicadas, como ocurre con el cubo de Necker (Figura 23), el cual parece cambiar de posición relativa cuando se fija la mirada en él durante algún tiempo.

En este caso, la ilusión se produce por la ambigüedad inherente a la figura, pues sin más ayuda que la información visual disponible, el punto negro podría, por ejemplo, estar situado en la esquina superior derecha de la cara izquierda o bien podría estar en el centro de la cara posterior. Ambas hipótesis son consistentes con la información visual presente, y es por ello que nuestro cerebro propone inicialmente una de las soluciones, y luego, independientemente de nuestra voluntad, descubre otras soluciones posibles, las cuales se manifiestan como cambios súbitos en la posición espacial del cubo.

Pero no todas las ilusiones ópticas han sido bien comprendidas. En la llamada ilusión de Herman, pequeños puntos grises fugaces se ven en las intersecciones de la figura siguiente (Figura 24).

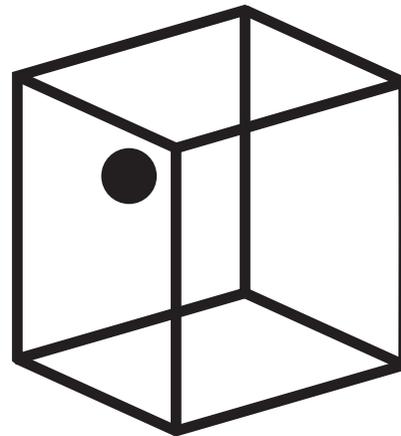


Figura 23. Cubo de Necker. Ilustración de los autores.

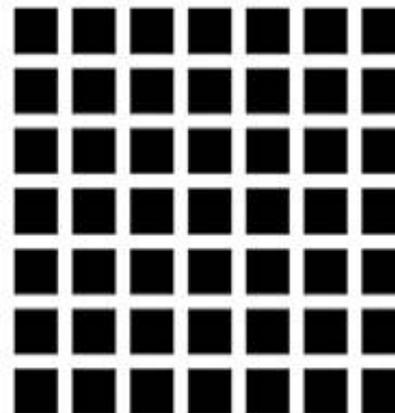


Figura 24. Ilusión de Hermann.

Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Grid_illusion.svg

El fenómeno se ha explicado como el resultado de la competición e inhibición de los distintos receptores que se encuentran en la retina. Existen en la retina dos tipos de fotorreceptores que se activan, unos en la presencia de luz y otros en su ausencia. Estos conjuntos de receptores lumínicos “disparan” conjuntamente a una única célula ganglionar, la cual transmite la información final al nervio óptico. A los campos se les denomina *on center* y *off center*, dependiendo de si el receptor que se encuentra en la región del centro se activa con la presencia de luz.

Cuando la luz es percibida por ambos tipos de centros, estos compiten entre sí. A esta interacción competitiva se la llama inhibición lateral, responsable de la aparición de las pequeñas manchas grises: la ilusión ocurriría cuando algunos de los receptores de oscuridad que se encuentran rodeando el centro se disparan con el impulso lumínico mientras que otros no lo hacen. Esto causaría una reacción inhibitoria, ya que la luz que detecta la porción oscura del campo reduce la actividad receptiva total del campo. Pero como hay más fotorreceptores de oscuridad, estos contrarrestarían las señales de los fotorreceptores de luz, lo cual hace que las áreas de intersección se vean pobladas por puntos grises.

Conclusiones

A medida que avanzan la neurología y las ciencias de la computación aumenta nuestra comprensión sobre la manera en que funciona el complejo sistema ojo-cerebro.

Sin embargo, la más inmediata y natural de las rutinas cognitivas, la visión, todavía permanece, en su mayor parte, en el más absoluto misterio.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Bibliografía

- Ackroyd, C., Humphrey, N. K., Warrington, E. K.** (1974). Lasting effects of early blindness a case study. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **26** (1): 114-124.
- Sacks, O.** (1987). *El hombre que confundió a su mujer con un sombrero*. Barcelona. Muchnik editores. p. 275.
- Vélez, A.** (1998). *Del Big Bang al Homo sapiens*. Medellín. Editorial Universidad de Antioquia. p. 77.
- Vélez A.** (2007). *Homo Sapiens*, Villegas Editores. p. 120.
- Vélez, A., Álvarez W.** (2014). *Imperfecciones corporales: una visión evolutiva*. Medellín. Editorial CES. p. 143.
- Vélez A., Vélez J.D., Vélez A.C.** (2010). *Pensamiento Creativo*. Bogotá. Villegas Editores. p. 398.
- Vulliemoz, S., Raineteau, O., Jabaudon, D.** (2005). Reaching beyond the midline: Why are human brains cross wired? *The Lancet Neurology*. **4** (2): 87-99.
- Ziegler, K.** (2013). Pareidolia lingüística.
- El Espectador:** <http://www.elespectador.com/opinion/pareidolia-lingueistica>

Encriptación óptica de información con recuperación libre de ruido

John Fredy Barrera-Ramírez¹, Roberto Daniel Torroba^{2,*}

¹Grupo de Óptica y Fotónica, Instituto de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

²Centro de Investigaciones Ópticas (CONICET La Plata-CIC) y UID OPTIMO, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina

Resumen

Los sistemas de protección de información basados en procesadores ópticos y que emplean una técnica de codificación de doble máscara aleatoria de fase permiten el manejo seguro de los datos, pero su recuperación no está libre de ruido. Si bien la seguridad del sistema es provista por el procesador óptico que habilita encriptar la información, en este trabajo se demuestra que la recuperación libre de ruido es posible mediante la inclusión de la codificación de respuesta rápida, sin alterar el proceso de protección de datos. La información que se desea proteger es previamente convertida en un código de respuesta rápida o código QR, y posteriormente el código es encriptado ópticamente. El código QR recuperado contendrá el ruido habitual producido por el uso de las máscaras aleatorias de fase y el procesamiento óptico-digital involucrado en el proceso. Finalmente, al escanear el código QR desencriptado se puede recuperar la información original completamente libre de ruido. Se incluye la descripción teórica del procesador óptico y se presentan resultados experimentales que demuestran la validez y aplicabilidad del sistema de protección.

Palabras clave: protección de información, procesadores ópticos, recuperación libre de ruido

Optical encryption with noise-free recovery

Abstract

The information protection systems based on optical processors, employing a double random phase mask encryption technique, allow data securely handling, but the recovery is not noise-free. Although the system security is provided by the optical processor enabling the information encoding, we demonstrate in this contribution that noise-free recovery is indeed possible by including the quick response coding, without altering the data protection process. The information to be protected is first converted into a quick response code or QR code, and then this code is optically encrypted. The decrypted QR code exhibits the usual noise produced by the random phase masks along with the involved opto-digital processing. Finally, when scanning the decrypted QR code we recover the original information without noise. We include the theoretical description of the optical processor, as well as we show experimental results that corroborate the validity and applicability of the security system.

Key words: information protection, optical processors, noise-free recovery.

Introducción

Los sistemas de seguridad tienen como objetivo asegurar la protección de la información (privacidad) y bienes (recursos) de los ciudadanos, instituciones y empresas. Estos sistemas ofrecen alternativas fiables para, por ejemplo, proteger las claves de seguridad que se usan para ingresar a las cuentas de correo electrónico, las cuentas en las redes sociales o para realizar pagos o transacciones electrónicas vía internet. Lo antes mencionado evidencia que la seguridad de la información ha entrado a formar un papel primordial en todos los ámbitos del quehacer diario de nuestra sociedad.

Los sistemas que permiten proteger la información, usualmente llamados “sistemas de encriptación” comercialmente disponibles, son algoritmos digitales. Pero

se ha demostrado a lo largo del tiempo que los sistemas de seguridad digitales que en un momento se pensaron invulnerables, finalmente fueron quebrantados. A medida que los proveedores de seguridad generan nuevos sistemas digitales, en esa misma medida, otras personas trabajan en la búsqueda de una forma de vulnerar esos sistemas. Es por esto, que aunque se busca reforzar los sistemas de encriptación que se comercializan en la actualidad, basados en algoritmos digitales, el área de la seguridad en la información también busca alternativas que permitan aumentar la seguridad en el manejo de la información.

*Correspondencia:

Roberto Daniel Torroba, robertot@ciop.unlp.edu.ar

Recibido: 7 de julio de 2015

Aceptado: 17 de septiembre de 2015

En este contexto, la encriptación óptica aparece como una atractiva y poderosa herramienta para el manejo seguro de la información, debido principalmente a su gran confiabilidad, su gran número de grados de libertad y su inherente capacidad de procesar en paralelo. Para encriptar información ópticamente los datos se introducen, en forma de haces luminosos, a un sistema óptico; el paso de dichos haces a través de uno o varios elementos logran transformarlos en un grado tal que la información obtenida a la salida del sistema no guarda ninguna semejanza con la original. No obstante, la información se encuentra allí codificada y sólo si se conocen todos los pasos del sistema y los elementos introducidos (llave(s) de encriptación y/o parámetro(s)), el proceso se puede revertir y los datos pueden ser recuperados. Los sistemas ópticos más seguros son los que usan llaves de fase aleatorias y físicas para proteger la información, pues hasta el momento han sido inmunes a cualquier tipo de ataque.

En los últimos 10 años se han llevado a cabo múltiples investigaciones que han demostrado que el área de protección de información usando procesadores ópticos tiene una gran potencialidad para aplicaciones prácticas (Graydon, 2013; Treacy, 2013; Barrera, Vélez & Torroba, 2013b; Javidi, 2003; Gluckstad & Riso, 2005; Javidi & Tajahuerce, 2007; Javidi, Esmail & Zhang, 2010). Se han desarrollado sistemas completamente ópticos, sistemas ópticos híbridos donde se utiliza un sistema óptico experimental para la encriptación y un sistema óptico virtual para la recuperación de la información, y sistemas ópticos virtuales para la protección de información (Graydon, 2013; Treacy, 2013; Barrera, *et al.*, 2013b; Javidi, 2003; Gluckstad & Riso, 2005; Javidi & Tajahuerce, 2007; Javidi, *et al.*, 2010; Matoba & Javidi B., 1999; Barrera, Henao, Tebaldi, Torroba & Bolognini, 2006a; Barrera, Henao, Tebaldi, Torroba & Bolognini, 2006b; Javidi, Towghi, Maghzi & Verrall, 2000; Vilardy, Millán & Pérez-Cabre, 2013; Barrera, Mira & Torroba, 2013a; Barrera, Mira & Torroba, 2014a; Barrera, Vélez & Torroba, 2014b; Lin, Shen & Li, 2014; Wang, Zhang, Liu, & Qin, 2014; Fan, *et al.*, 2013; Qin & Gong, 2014; Markman, Javidi & Tehramipour, 2014; Carnicer, Hassanfiroozi, Latorre-Carmona, Huang, & Javidi, 2015).

Los sistemas ópticos de encriptación virtuales, que son simulaciones computacionales de los sistemas experimentales, han demostrado su vulnerabilidad. Dicha vulnerabilidad es debida a que en general estos sistemas no contienen el mismo número de grados de libertad que los sistemas experimentales (polarización, longitud de onda, pupilas, etc) y a que las llaves de seguridad, aunque en algunos casos son aleatorias, por su naturaleza digital son diseñadas en un arreglo regular de píxeles de tamaño definido y donde los píxeles tienen un número limitado de variaciones de fase, características que hacen que los sistemas virtuales sean vulnerables a cierto tipo de ataques (Carnicer, Montes-

Usategui, Arcos & Juvells, 2005; Peng, Zhang, Wei & Yu, 2006; Barrera, Vargas, Tebaldi & Torroba, 2010a; Barrera, Vargas, Tebaldi, Torroba & Bolognini, 2010b; Zhang, Xiao, Wen & Liu, 2013a; Zhang, Liao, He & Peng, 2013b). Asimismo, algunos sistemas experimentales usan llaves aleatorias generadas por medios digitales u óptico-digitales, características que también los hace vulnerables a pesar de contar con los grados de libertad de un procesador experimental.

En contraste con lo anterior, los sistemas ópticos de encriptación experimentales que usan como llave de seguridad un elemento físico y aleatorio presentan un alto grado de seguridad (Graydon, 2013; Treacy, 2013; Barrera, *et al.*, 2013b; Javidi, 2003; Gluckstad & Riso, 2005; Javidi & Tajahuerce, 2007; Javidi, *et al.*, 2010). Su gran confiabilidad se basa principalmente en la utilización de un difusor (vidrio despulido que es un elemento aleatorio y físico), ya que a este tipo de llaves no se le pueden definir parámetros como el tamaño de píxel o el número de píxeles, y no presentan un número definido y limitado de variaciones de fase. Además, los grados de libertad del sistema experimental pueden actuar como llaves de seguridad adicionales; se ha demostrado que longitud de onda (Matoba & Javidi, 1999), la pupila del sistema óptico (Barrera, *et al.*, 2006b) o la polarización (Barrera, *et al.*, 2006a) hacen las veces de llaves complementarias. Por lo tanto, para recuperar la información original un usuario autorizado deberá poseer la información de la llave aleatoria y física, y las llaves de seguridad adicionales, estas últimas permitiendo que la seguridad global del sistema se incremente. Las características de la llave física en conjunto con los grados de libertad de un procesador óptico experimental, han permitido que hasta ahora los sistemas experimentales de encriptación óptica no hayan sido vulnerados.

Con esta motivación, el desarrollo y la optimización de sistemas de protección basados en procesadores ópticos experimentales y que empleen elementos físicos y aleatorios como llaves de seguridad, han concentrado la atención de muchos grupos de investigación alrededor del mundo. Los cientos de artículos científicos publicados hasta el año 2012 en el área de la encriptación óptica evidenciaron una limitación que no permitía vislumbrar una aplicación real y masiva de los sistemas ópticos de encriptación (Barrera, *et al.*, 2013b; Javidi, 2003; Gluckstad & Riso, 2005; Javidi & Tajahuerce, 2007; Javidi, *et al.*, 2010; Matoba & Javidi B., 1999; Barrera, *et al.*, 2006a; Barrera, *et al.*, 2006b; Javidi, *et al.*, 2000; Vilardy, *et al.*, 2013). Dicha limitación era el ruido que afectaba los datos recuperados, y que paradójicamente es debido en su mayoría al elemento que le brinda la mayor parte de la seguridad al sistema, el elemento aleatorio y físico que actúa como llave de seguridad. Este ruido, se debe principalmente al límite de resolución natural de los procesadores ópticos que depende de las dimensiones físicas y las características de los elementos que lo componen.

Además, hay otras causas de ruido como la suciedad (polvo) y las fluctuaciones del índice de refracción a las que está expuesto un procesador óptico experimental, por mencionar dos de ellas.

Ya que los usuarios exigen sistemas de seguridad donde la información recuperada sea fiel a la original, se debía eliminar este ruido para que la encriptación por medio ópticos se pudiera vislumbrar como una alternativa viable. Con esta motivación, se han presenten algunas contribuciones donde se presentan métodos para reducir en cierta medida el ruido generado en los datos descritos, y aunque dichos métodos permiten obtener alguna disminución del ruido, ninguno de ellos permite eliminarlo completamente (**Javidi, et al., 2000; Vilarly, et al., 2013**).

Teniendo como marco de referencia lo antes mencionado, para sobrepasar esa gran limitación se integraron un sistema óptico de encriptación de doble máscara de fase en una arquitectura 4f y la codificación de gráfica, logrando por primera vez recuperar los datos sin ningún tipo de ruido (**Barrera, et al., 2013a**). En esta demostración, la información que se pretende proteger se convierte en un código de respuesta rápida (CRR), conocido ampliamente como código QR (*en inglés quick response code o QR code*). Por lo tanto, en lugar de encriptarse el dato original, se encripta su respectivo código QR. Si un usuario autorizado posee el código encriptado y la(s) llave(s) de seguridad, usando el sistema de descryptación podrá acceder al código descryptado, el cual presentará el ruido convencional. Finalmente, el código QR descryptado es decodificado para recuperar la información original libre de ruido. En este contexto, la codificación y decodificación de respuesta rápida es la principal responsable de la ausencia de ruido, mientras que el procesador óptico es el principal responsable de la seguridad del proceso (**Graydon, 2013; Treacy, 2013; Barrera, et al., 2013a**).

Aunque en esta propuesta los procesos de encriptación y recuperación de la información fueron llevados a cabo por medio de sistemas óptico virtuales (**Barrera, et al., 2013a**); esta contribución despertó el interés de la comunidad internacional especializada gracias a que soluciona un problema fundamental para la adopción práctica de sistemas de protección basados en procesadores ópticos, y a que usa herramientas tecnológicas ampliamente disponibles y con un gran rango de aplicaciones como los códigos QR (**Graydon, 2013; Treacy, 2013; Barrera, et al., 2013b, Barrera, et al., 2013a; ISO, IEC 18004, 2006; Liao & Lee, 2010**). Estos códigos pueden ser escaneados con teléfonos inteligentes o tabletas usando programas gratuitos y ampliamente usados (**Graydon, 2013; Treacy, 2013; ISO, IEC 18004, 2006; Liao & Lee, 2010**).

Teniendo como motivación el impacto de la contribución (**Graydon, 2013; Treacy, 2013; Barrera, et al., 2013a**), se presentó la primera demostración experimental de

un sistema de protección de información que usa un procesador óptico experimental y permite la recuperación libre de ruido (**Barrera, et al., 2014a**). Esta primera implementación mediante un sistema óptico virtual y su posterior demostración experimental, representaron el inicio de una nueva línea de investigación en lo que respecta a la protección de información por medios ópticos y con una recuperación libre de ruido (**Barrera, et al., 2014b; Lin, et al., 2014; Wang, et al., 2014; Fan, et al., 2013; Qin & Gong, 2014**). Además, se ha expandido esta propuesta a procesos de validación por medios ópticos (**Markman, et al., 2014; Carnicer, et al., 2015**).

Lograr una recuperación libre de ruido revitalizó el área de los sistemas ópticos de seguridad, con base en la propuesta original (**Barrera, et al., 2013a**) y su posterior implementación experimental (**Barrera, et al., 2014a**), impulsando un grupo de contribuciones basadas en sistemas virtuales (**Lin, et al., 2014; Wang, et al., 2014; Fan, et al., 2013; Qin & Gong, 2014; Markman, et al., 2014; Carnicer, et al., 2015**). Adicionalmente, se presentaron dos técnicas que permitieron reforzar la encriptación óptica que emplea códigos QR (**Barrera, et al., 2014b**), una de ellas consiste en cambiar de posición de los elementos que componen el código QR aumentando la seguridad del proceso. Además, se implementa una técnica de normalización no lineal que permite reducir el ruido sobre los códigos recuperados e incrementa la seguridad contra ataques (**Vilarly, et al., 2013; Barrera, et al., 2014a**). Otras investigaciones incluyen llaves multidimensionales (**Lin, et al., 2014**), procedimientos de recuperación de fase (**Wang, et al., 2014; Fan, et al., 2013**), superposición incoherente (**Qin & Gong, 2014**), y validación óptica (**Markman, et al., 2014; Carnicer, et al., 2015**).

De acuerdo a todo lo expuesto, es evidente que el estudio, desarrollo y optimización de sistemas ópticos de protección es de gran importancia para la comunidad científica debido a sus grandes implicaciones académicas y tecnológicas (**Graydon, 2013; Treacy, 2013; Barrera, et al., 2013b**). Dichos sistemas deben incluir métodos que permitan la recuperación de la información libre de ruido, un procesador óptico experimental con una llave de seguridad física y aleatoria y un sistema óptico virtual de recuperación; todo lo anterior para garantizar un sistema de protección seguro, práctico y versátil.

En esta contribución se presentará la descripción teórica del sistema de seguridad y su implementación experimental. Se incluirán resultados experimentales que permitirán comparar los datos recuperados con el método convencional y la recuperación libre de ruido al incluir los códigos de respuesta rápida.

Descripción del sistema de seguridad

El primer paso para lograr la encriptación óptica de datos y su recuperación libre de ruido es la conversión de la

información que se pretende proteger en un código QR. Luego, este código es insertado en el plano de entrada del sistema de encriptación y en el plano de salida se produce el código QR encriptado. El proceso de recuperación posee dos etapas, la desencriptación del código QR y su lectura para obtener la información original libre de ruido.

Aunque existen muchas arquitecturas disponibles para implementar el sistema de codificación de doble máscara de fase (Javidi, 2003; Gluckstad & Riso, 2005; Javidi & Tajahuerce, 2007; Barrera, et al., 2013a) se eligió la arquitectura óptica de encriptación JTC (por las siglas en ingles de joint transform correlator) debido a que la encriptación y la recuperación de la información se llevan a cabo utilizando procesadores ópticos compactos (Barrera, Vélez & Torroba, 2013c).

El montaje experimental es un interferómetro Mach-Zehnder que en un brazo contiene el sistema encriptador JTC y en el otro un haz de referencia (Figura 1). Para encriptar el código QR se bloquea el brazo de referencia, de manera que solo se ilumina el procesador JTC. El sistema de encriptación contiene un modulador espacial de luz SLM (por las siglas en inglés de spatial light modulator) donde se proyecta el código correspondiente a la información que se desea proteger y una abertura cuadrada que limitará el tamaño de la llave de seguridad (Figura 1). Al poner en contacto el SLM con un difusor se obtiene la transmitancia del plano de entrada del sistema encriptador. En una de las ventanas del JTC se obtiene el producto $\rho(x, y) = o(x, y) r(x, y)$ entre el código QR y una máscara aleatoria y física $r(x, y)$, está máscara aleatoria corresponde a la porción del difusor que está en contacto con el código. La otra ventana contiene la llave de seguridad $l(x, y)$, que es la porción del difusor limitada por la abertura cuadrada proyectada en el modulador. Cuando el sistema de encriptación se ilumina con una onda plana y monocromática, la lente L genera la transformada de Fourier de la transmitancia del plano de entrada en el plano de la cámara CCD, y en ese plano se registra su JPS (por las siglas en inglés de joint power spectrum), indicado por $J(v, w)$ (Barrera, et al., 2013c),

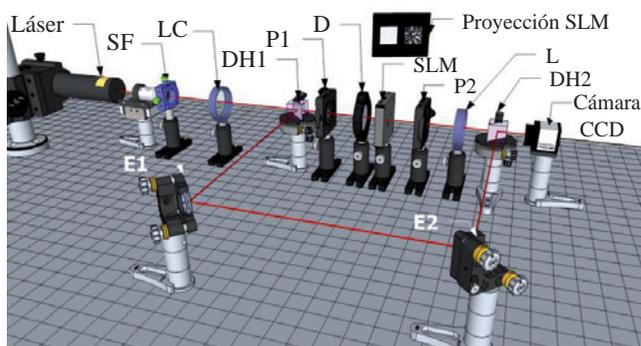


Figura 1. Montaje experimental: SF: Sistema de filtrado; LC: lente colimadora; DH: divisor de haz; P: polarizador; D: Difusor; SLM: modulador espacial de luz; L: lente; E: espejos.

$$J(v, w) = |C(v, w)|^2 + |L(v, w)|^2 + C(v, w) L^*(v, w) e^{-4\pi i b v} + C^*(v, w) L(v, w) e^{4\pi i b v} \quad (1)$$

donde $C(v, w)$ and $L(v, w)$ son las transformadas de Fourier de $\rho(x, y)$ y $l(x, y)$ respectivamente, $2b$ es la separación entre la ventana que contiene el código QR y la ventana de la llave y $*$ representa la operación complejo conjugado. El tercer y el cuarto término del JPS contienen la información del código encriptado y su complejo conjugado. Por lo tanto al filtrar el primer, segundo y cuarto término del JPS, y al reposicionar el tercer término se obtiene el código encriptado $E(v, w)$ centrado en las coordenadas $(0, 0)$ (Barrera, et al., 2013c),

$$E(v, w) = C(v, w) L^*(v, w) \quad (2)$$

El paso siguiente es registrar la información de la llave de seguridad desbloqueando el brazo de referencia y bloqueando el objeto. De esta forma se almacena el interferograma de la transformada de Fourier de la llave de seguridad por medio de la cámara CCD (Figura 1). Aplicando un procedimiento similar al utilizado para obtener el código encriptado y centrado por medio del JPS, luego de procesar el interferograma se llega a la transformada de Fourier de la llave de seguridad $L(v, w)$.

El proceso de recuperación consta de dos etapas, en la primera el código QR encriptado y la información de la transformada de Fourier de la llave de seguridad se insertan en el plano de entrada de un procesador óptico $2f$ (Figura 2). Cuando el procesador óptico es iluminado con una onda plana y monocromática, realiza la operación transformada de Fourier sobre la transmitancia del plano de entrada, de esta manera en el plano de salida del sistema se obtiene,

$$d(x, y) = o(x, y) r(x, y) \quad (3)$$

Esta ecuación representa el producto entre el código QR $o(x, y)$ y la máscara $r(x, y)$. Por lo tanto, la intensidad del campo óptico a la salida del procesador $2f$ brinda la información del código QR, el cual presenta el ruido típico generado por los procesos de encriptación y desencriptación. Se debe tener en cuenta que para recuperar el código QR es absolutamente necesario poseer su par encriptado y la información de seguridad; si un usuario no autorizado intercepta el código encriptado, pero no puede acceder a la llave de seguridad, dicho usuario no podrá acceder a la información de dicho código.

En la etapa final del proceso de recuperación, al escanear el código QR desencriptado se accede a la información original totalmente libre de ruido. Lo anterior es posible debido a la tolerancia al ruido característica del proceso de lectura de los códigos de respuesta rápida (ISO, IEC 18004, 2006; Liao & Lee, 2010). De acuerdo a lo anterior, la seguridad del sistema y la recuperación libre de ruido se debe a la acción combinada del sistema óptico de seguridad y de los códigos gráficos. Un atractivo adicional de este

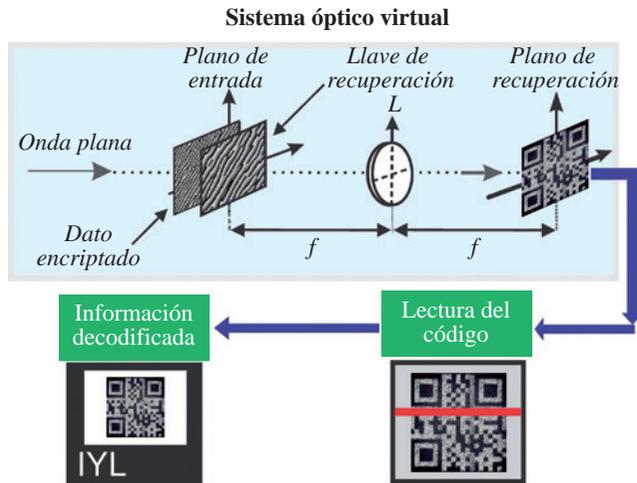


Figura 2. Sistema óptico virtual de recuperación.

procedimiento, es que los códigos QR pueden ser leídos por dispositivos que actualmente son de uso masivo y están ampliamente disponibles, como los smartphones o las tablets (Graydon, 2013).

Como se ha explicado ampliamente, la seguridad del sistema de protección de datos se basa principalmente en la utilización de un procesador óptico experimental para la encriptación de la información. Por lo tanto, existen dos opciones para el desarrollo del sistema de recuperación; la primera opción es contar con un sistema óptico experimental de recuperación, mientras que la segunda es la puesta a punto de un sistema óptico virtual. En esta contribución se elige la segunda opción pues es la más desarrollada, aceptada e investigada ya que es práctica y versátil, donde los usuarios del sistema no requieren de un montaje óptico experimental para recobrar la información.

Resultados experimentales

En el montaje experimental se emplea como fuente de iluminación un láser de Helio Neón ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) y como medio de registro una cámara CCD PULNIX TM6703 de 640×480 píxeles de área $9\mu\text{m} \times 9\mu\text{m}$ (Figura 1). El objeto y la ventana de la llave son proyectadas en un SLM Holoeye LC2002, el tamaño del objeto y la llave es $1.92 \text{ mm} \times 1.92 \text{ mm}$, y la distancia entre el objeto y la llave es 3.84 mm . Las máscaras aleatorias de seguridad son generadas por medio de un difusor y la lente empleada para generar el JPS tiene una longitud focal de 200 mm .

En la figura 3 se pueden observar los resultados experimentales obtenidos con el sistema óptico-virtual descrito en la sección 2, pero usando el método convencional de encriptación, es decir, sin incluir la códigos QR. En este caso la información que se desea proteger corresponde al texto *IYL*, que son las iniciales del año internacional de la luz (por las siglas en inglés de *International Year of Light*) (Figura 3(a)). La Figura 3(b) es el resultado experimental

del proceso de encriptación, como se puede apreciar es un patrón aleatorio ya que se está empleando una técnica de codificación de doble máscara de fase. En el proceso de recuperación, el código encriptado y la llave de seguridad se ubican en el plano de entrada del procesador $2f$ (Figura 2), de manera que en el plano de salida aparece el código descriptado (Figura 3(c)). Como era de esperarse, si en la recuperación se utiliza una llave diferente a la asociada al proceso de encriptación, el dato descriptado es un patrón aleatorio, es decir que el código no se puede recuperar (Figura 3(d)). Evidentemente, la información recuperada con el método convencional contiene el ruido habitual de los sistemas óptico-digitales que usan máscaras aleatorias de fase (Figura 3(c)).

En esta propuesta, para eliminar el ruido presente en los datos recuperados se combinará el procedimiento convencional con la codificación de respuesta rápida. En lugar de proyectar el texto que se desea proteger en el sistema de encriptación, se proyecta su correspondiente código QR (Figuras 1 y 4(a)) y se obtiene el correspondiente código encriptado (Ecuación (2)-Figura 4(b)). Como es de esperarse, tanto en el sistema convencional (Figuras 3(b) y 3(d)) como en la propuesta actual (Figuras 4(b) y 4(c)), los datos encriptados y los recuperados con una llave incorrecta son patrones aleatorios, hecho en el cual se basa la seguridad del método. La figura 4(d) muestra el código recuperado apropiadamente, en el cual puede reconocerse el código QR a pesar del ruido. Finalmente, al escanear el código descriptado con un teléfono inteligente se puede acceder al texto original sin ningún tipo de ruido o distorsión (Figura 4(e)).

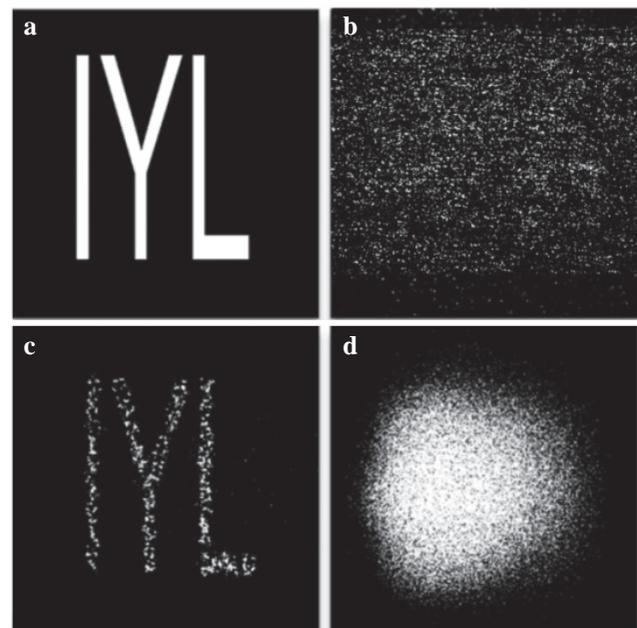


Figura 3. (a) Objeto original, (b) objeto encriptado, descriptación con: (c) la llave de seguridad correcta y (d) otra llave.

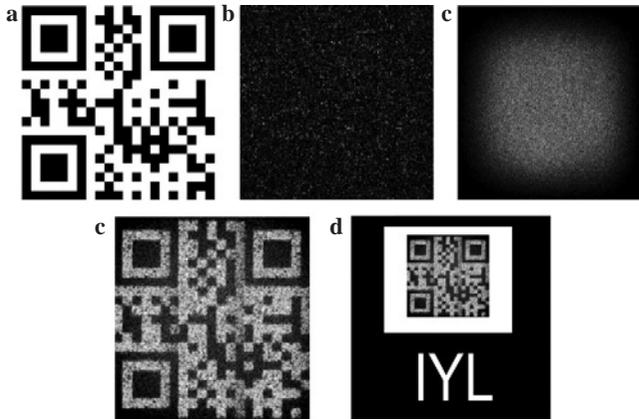


Figura 4. (a) Código QR del texto “IYL”, (b) código QR encriptado, (c) recuperación usando una llave diferente a la original, (d) descryptación con la llave de seguridad, y (e) lectura del código QR recuperado usando un teléfono inteligente.

Conclusiones

La descripción teórica y los resultados experimentales demuestran que es posible manipular información de manera segura empleando un procesador óptico y una técnica experimental de codificación de doble máscara de fase. Además, la combinación entre los sistemas ópticos de encriptación convencionales y la codificación de respuesta rápida permite la protección de información y a su vez una recuperación completamente libre de cualquier tipo de ruido o deterioro. Este avance permite revitalizar las investigaciones en el área de los sistemas de seguridad basados en procesadores ópticos, es evidente que esta área está más vigente que nunca y que se han abierto nuevos interrogantes que conducirán a futuras aplicaciones.

Agradecimientos

Esta investigación fue llevada a cabo con el apoyo del Comité para el Desarrollo de la Investigación -CODI- (Universidad de Antioquia-Colombia), COLCIENCIAS (Colombia), Estrategia de Sostenibilidad 2014-2015, MINCyT-COLCIENCIAS CO/13/05, CONICET Nos. 0863/09 y 0549/12 (Argentina), y la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata No. 11/I168 (Argentina). John Fredy Barrera Ramírez agradece el apoyo del Centro Internacional de Física Teórica (The International Centre for Theoretical Physics - ICTP) y la Academia Mundial de las Ciencias (The World Academy of Sciences - TWAS). Los autores agradecen la colaboración de Alexis Jaramillo (Instituto de Física, Universidad de Antioquia) por su apoyo en la realización de las experiencias que permitieron obtener los resultados experimentales presentados en este artículo.

Conflicto de intereses

Los autores del artículo declaramos que no existe conflicto de intereses con relación a la publicación de este artículo.

Referencias

- Barrera, J.F., Henao, R., Tebaldi, M., Torroba, R., Bolognini, N.** 2006a. Multiplexing encrypted data by using polarized light. *Opt. Commun.* **260**: 109-112.
- Barrera, J.F., Henao, R., Tebaldi, M., Torroba, R., Bolognini, N.** 2006b. Multiple image encryption using an aperture-modulated optical system. *Opt. Commun.* **261**: 29-33.
- Barrera, J. F., Vargas, C., Tebaldi, M., Torroba, R.** 2010a. Chosen-plaintext attack on a joint transform correlator encrypting system. *Opt. Commun.* **283**: 3917-3921.
- Barrera, J., Vargas, C., Tebaldi, M., Torroba, R., Bolognini, N.** 2010b. Known plaintext attack on a joint transform correlator encrypting system. *Opt. Lett.* **35**: 3553-3555.
- Barrera, J.F., Mira, A., Torroba, R.** 2013a. Optical encryption and QR codes: Secure and noise-free information retrieval. *Opt. Express* **21**: 5373-5378.
- Barrera, J.F., Vélez, A., Torroba, R.** (Agosto, 2013)b. Information security through light: Protecting information with optical processors. Sección Labtalk, *J. Opt.* Recuperado de <http://iopscience.iop.org/2040-8986/labtalk-article/54457>.
- Barrera, J.F., Vélez, A., Torroba, R.** 2013c. Experimental multiplexing protocol to encrypt messages of any length. *Journal of Optics* **15**: 055404.
- Barrera, J.F., Mira, A., Torroba, R.** 2014a. Experimental QR code optical encryption: noise-free data recovering. *Opt. Lett.* **39**: 3074-3077.
- Barrera, J.F., Vélez, A., Torroba, R.** 2014b. Experimental scrambling and noise reduction applied to the optical encryption of QR codes. *Opt. Express.* **22**: 20268-20277.
- Carnicer, A., Montes-Usategui, M., Arcos, S., Juvells I.** 2005. Vulnerability to chosen cyphertext attacks of optical encryption scheme based on double random phase mask. *Opt. Lett.* **30**: 1644-1646.
- Carnicer, A., Hassanfiroozi, A., Latorre-Carmona, P. Huang, Y. P., Javidi B.** 2015. Security authentication using phase-encoded nanoparticle structures and polarized light. *Opt. Lett.* **40**: 135-138.
- Fan, D., Meng, X., Wang, Y., Yang, X., Peng, X., He, W., Dong, G., Chen, H.** 2013. Optical identity authentication scheme based on elliptic curve digital signature algorithm and phase retrieval algorithm. *Appl. Opt.* **52**: 5645-5652.
- Gluckstad, G., Riso F.** (Junio 14, 2005). Optical encryption and decryption method and system. U.S. patent 6907124.
- Graydon, O.** 2013. Cryptography: Quick response codes. *Nature Photonics*, **7**: 343.
- ISO, IEC 18004.** 2006. Information technology - Automatic identification and data capture techniques - QR Code 2005 bar code symbology specification. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Javidi, B., Towghi, N., Maghzi, N., Verrall S. C.** 2000. Error-reduction techniques and error analysis for fully phase- and amplitude-based encryption. *Appl. Opt.* **39**: 4117-4130.

- Javidi, B.** (Febrero, 2003). Method and Apparatus for Encryption Using Partial Information. U.S. Patent Number 6519340 B1.
- Javidi, B., Tajahuerce, E.** (Mayo 22, 2007). Information security using digital holography. U.S. patent 7221760 B2.
- Javidi, B., Esmail, A., Zhang, G.** (Marzo 23, 2010). Optical Security system using Fourier plane encoding. U.S. patent 7684098.
- Liao, K. C., Lee, W. H.** 2010. A novel user authentication scheme based on QR-Code. *J. Netw.* **5**: 937-941.
- Lin, C., Shen, X., Li, B.** 2014. Four-dimensional key design in amplitude, phase, polarization and distance for optical encryption based on polarization digital holography and QR code. *Opt. Express* **22**: 20727-20739.
- Markman, A., Javidi, B., Tehramipour, M.** 2014. Photon-counting security tagging and verification using optically encoded QR codes. *IEEE Photonics Journal* **6**: 6800609.
- Matoba, O., Javidi, B.** 1999. Encrypted optical storage with wavelength-key and random phase codes. *Appl. Opt* **38**: 6785-6790.
- Peng, X., Zhang, P., Wei, H., Yu B.** 2006. Known-plaintext attack on optical encryption based on double random phase keys. *Opt. Lett.* **31**: 1044-1046.
- Qin, Y., Gong, Q.** 2014. Optical information encryption based on incoherent superposition with the help of the QR code. *Opt. Commun.* **310**: 69-74.
- Treacy, S.** (agosto de 2013). The creative power of Colaboration. The world Academy of Sciences TWAS. Recuperado de <http://twas-old.ictp.it/news-in-home-page/news/the-creative-power-of-collaboration>.
- Vilardy, J. M., Millán, M. S., Pérez-Cabre, E.** 2013. Improved decryption quality and security of a joint transform correlator-based encryption system. *J. Opt.* **15**: 025401.
- Wang, Z., Zhang, S., Liu, H., Qin, Y.** 2014. Single-intensity-recording optical encryption technique based on phase retrieval algorithm and QR code. *Opt. Commun.* **332**: 36-41.
- Zhang, Y., Xiao, D., Wen, W., Liu, H.** 2013a. Vulnerability to chosen-plaintext attack of a general optical encryption model with the architecture of scrambling-then-double random phase encoding. *Opt. Lett.* **38**: 4506-4508.
- Zhang, C., Liao, M., He, W., Peng, X.** 2013b. Ciphertext-only attack on a joint transform correlator encryption system. *Opt. Express* **21**: 28523-28530.

Protección de datos usando un sistema experimental de encriptación de correlador de transformada conjunta

Roberto Torroba¹, John Fredy Barrera-Ramírez^{2,*}

¹Centro de Investigaciones Ópticas (CONICET La Plata-CIC) and UID OPTIMO,
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina

²Grupo de Óptica y Fotónica, Instituto de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia

Resumen

En esta contribución se presenta la implementación experimental un sistema de protección de información basado en el procesamiento óptico y se analiza la fidelidad de la información recuperada cuando hay pérdida de datos durante la transmisión. La información es encriptada empleando una arquitectura óptica de correlador de transformada conjunta y una técnica de codificación de doble máscara de fase. Un usuario autorizado puede recuperar la información original cuando tiene acceso a la información del dato encriptado y de la llave de seguridad; si un intruso puede interceptar la imagen encriptada, pero no accede la información de la llave de seguridad, no podrá acceder a la información contenida en el dato encriptado. La descripción teórica y los resultados experimentales demuestran la habilidad que tiene el sistema de seguridad para proteger y recuperar información por medio de procesadores ópticos, y su tolerancia a la pérdida de información durante la transmisión.

Palabras clave: procesamiento óptico de información, protección de datos, seguridad óptica, correlador de transformada conjunta, encriptación, desencriptación.

Data protection using a joint transform correlator experimental system

Abstract

In this contribution the implementation of an experimental data protection system based on optical processing is presented, and the reliability of the recovered information when there is data loss during transmission is analyzed. The information is encrypted using an optical joint transform correlation architecture together with a double phase mask encoding technique. An authorized user recovers the original information when accessing the encoded data and the security key; if an intruder intersects the encoded image but does not possess the security key there is no possibility to access to the information contained in the encrypted image. The theoretical description and the experimental results show the ability the security systems exhibits to protect and recover the information by optical means, including the tolerance to data loss during transmission.

Key words: Optical information processing, data protection, optical security, joint transform correlator, encryption, decryption.

Introducción

Día a día aumenta en forma significativa la cantidad de información pública y privada disponible en el mundo, y en esa misma medida se incrementa el número de personas que intercambian datos (caracteres, archivos binarios, imágenes, videos, etc). Esto implica que se tiene un gran número de personas enviando y recibiendo información que en muchos casos es secreta o sensible. Por lo tanto, hoy en día para muchas personas alrededor del mundo es cotidiano el uso de protocolos y sistemas que garantizan que los datos privados sean accesibles sólo para los usuarios autorizados.

Las empresas invierten miles de millones de dólares alrededor del mundo sólo para evitar el fraude en la información. Además, las comunicaciones electrónicas y el

almacenamiento de datos en computadores están bajo riesgo dado que las comunicaciones en línea y a través de redes inalámbricas pueden ser interceptadas o intervenidas. Riesgo que se incrementa con la alta capacidad de procesamiento de los computadores, capaces de reducir el tiempo requerido para codificar y decodificar mensajes, incluso las más sofisticadas técnicas de codificación digital pueden llegar a ser vulnerables.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado y considerando que muchos sistemas de seguridad que en un momento se

*Correspondencia:

John Fredy Barrera-Ramírez, john.barrera@udea.edu.co

Recibido: 16 de julio de 2015

Aceptado: 23 de octubre de 2015

consideraron seguros finalmente fueron vulnerados (**Bellare, Desai, Pointcheval & Rogaway, 1998; Camp-Winget, Housley, Wagner & Walker, 2003; Shannon, 1949**), todas las áreas relacionadas con la seguridad en la información han presentado un gran desarrollo. Este desarrollo incluye la consolidación y surgimiento de nuevas alternativas para el manejo seguro de datos. En particular, la encriptación óptica ha demostrado ser una importante alternativa a los sistemas actualmente disponibles (**Graydon, 2013; Pile, 2010**).

A los diferentes procedimientos ópticos usados para cifrar u ocultar información se les conocen en la literatura como métodos de encriptación, y a los usados para recuperar o acceder a la información oculta por parte de personas autorizadas se les conoce como métodos de desencriptación. Los códigos o valores de los parámetros con los cuales se oculta la información se conocen como llave(s) de seguridad, lo que implica que la información solo puede ser recuperada si el usuario autorizado posee la(s) llave(s) de seguridad correcta(s).

Los sistemas ópticos de encriptación más usados son los que emplean dos máscaras aleatorias de fase, los cuales son llamados usualmente sistemas de encriptación de doble máscara de fase. Como la seguridad del sistema es proporcionada por una máscara aleatoria, la posibilidad de construir una máscara para tratar de violar el sistema de encriptación sería un trabajo infructuoso, pues existen millones de combinaciones que se deben probar.

La propuesta e implementación del primer sistema óptico de encriptación de doble máscara de fase fue respaldada en primera instancia por simulaciones computacionales (**Refregier & Javidi, 1995**) usando una arquitectura óptica 4f. Posteriormente, se llevó a cabo su demostración experimental (**Javidi, Zhang & Li, 1996**) registrando la imagen encriptada en una película holográfica. Luego, para recuperar la información, tanto el complejo conjugado de la llave de seguridad como el holograma de la información encriptada debían ser insertados en un montaje holográfico que servía de estación desencriptadora. Más tarde, se publicó una contribución donde se usaba un cristal fotorrefractivo para registrar la imagen encriptada (**Unnikrishnan, Joseph & Singh, 1998**). En este caso la encriptación y la desencriptación se efectúan en tiempo real, sin necesidad de emplear el complejo conjugado de la llave de seguridad y sin el requerimiento de posicionar elementos durante la desencriptación.

Motivado por el gran número de grados de libertad que posee el procesamiento óptico de información, varios investigadores alrededor del mundo llevaron a cabo investigaciones que condujeron a la implementación de diferentes esquemas de encriptación de doble máscara de fase. Por un lado se desarrollaron sistemas de encriptación en el dominio fraccional de Fourier (**Unnikrishnan, Joseph & Singh, 2000**) y en el dominio de Fresnel (**Situ & Zhang,**

2004), además se publicó un artículo donde se combina un sistema óptico 4f y la propagación en espacio libre para la protección de múltiples datos (**Barrera & Torroba, 2010**), y se mostró que la posición axial de la llave encriptadora representa una llave extra de seguridad (**Matoba & Javidi, 1999**). Asimismo, se llevaron a cabo investigaciones que permitieron concluir que la longitud de onda (**Situ & Zhang, 2005**), el desplazamiento lateral de la llave de seguridad (**Barrera, Henao, Tebaldi, Torroba & Bolognini, 2006a**), la polarización de la luz (**Barrera, Henao, Tebaldi, Torroba & Bolognini, 2006b**), la pupila del sistema (**Barrera, Henao, Tebaldi, Torroba & Bolognini, 2006c**) y el uso de llaves complejas (**Barrera, Tebaldi, Torroba & Bolognini, 2009**) permiten encriptar múltiples datos y aumentar la seguridad global del proceso.

Dada la gran potencialidad de los procesos ópticos de seguridad basados en la codificación de doble máscara de fase, estos se han puesto a prueba usando los protocolos establecidos. Se ha mostrado que al igual que los sistemas digitales, los sistemas ópticos virtuales, que son simulaciones computacionales de los sistemas ópticos experimentales, pueden llegar a ser vulnerables bajo ciertas condiciones (**Barrera, Vargas, Tebaldi, Torroba & Bolognini, 2010; Carnicer, Montes-Usategui, Arcos & Juvells, 2005; Wang & Zhao, 2012**). Estas vulnerabilidades han conducido, al igual que en el resto de sistemas de seguridad, a la generación de protocolos que permiten eliminar las fallas de seguridad (**Carnicer, et al., 2005; Wang & Zhao, 2012**).

Hasta el momento no se ha reportado ninguna vulnerabilidad de los sistemas de seguridad experimentales que emplean como llaves de seguridad un elemento físico y aleatorio. Por lo tanto, aunque todos los sistemas de encriptación comerciales que se usan en la actualidad son digitales, la encriptación óptica representa una atractiva y potencialmente poderosa herramienta para el manejo seguro de la información debido a su alto grado de seguridad, robustez, aplicabilidad y flexibilidad (**Alfalou & Brosseau, 2009; Javidi, Esmail & Zhang, 2012; Nomura, Pérez-Cabré, Millán & Javidi, 2009**).

A pesar de que existen muchas arquitecturas para el procesamiento seguro de datos bajo la codificación de doble máscara de fase; la disminución de los requerimientos de alineación con respecto a otras arquitecturas para obtener la imagen encriptada, el no requerir del conjugado de la llave de seguridad o de la imagen encriptada, y lo compacto de la arquitectura de correlador de transformada conjunta o arquitectura JTC (por las siglas en inglés de joint transform correlator), la convierten en una gran alternativa para el manejo seguro de datos. Si a lo anterior se suma la posibilidad de incluir en el proceso una técnica de holografía digital que permita almacenar digitalmente la información procesada ópticamente, se podrá contar con un sistema seguro y práctico donde la información se puede transmitir por los canales actuales de comunicación.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto, en esta contribución se presenta la descripción teórica y la implementación experimental de un sistema óptico de encriptación de doble máscara de fase bajo una arquitectura de correlador de transformada conjunta, donde la componente experimental incluye una técnica de holografía digital. Adicionalmente, se presenta un análisis del comportamiento de la información recuperada a medida que la información de la imagen encriptada y la llave de recuperación se van deteriorando en la transmisión.

Descripción teórica e implementación experimental del sistema de seguridad

El sistema de encriptación de correlador de transformada conjunta o JTC utiliza dos máscaras aleatorias de fase para proteger información (Nomura & Javidi, 2000). En este sistema el plano de entrada está compuesto por el dato a encriptar $f(x_0, y_0)$ en contacto con una máscara aleatoria de fase $m(x_0, y_0)$, y otra máscara aleatoria de fase que representa la llave de seguridad $k(x_0, y_0)$ del sistema (Figura 1).

Por lo tanto, si el objeto de entrada y la llave de seguridad están separados por una distancia $2a$, la entrada del sistema encriptador será de la forma (Figura 1):

$$u_0(x_0, y_0) = [f(x_0, y_0)m(x_0, y_0)] \otimes \delta(x_0 - (-a), y_0) + k(x_0, y_0) \otimes \delta(x_0 - a, y_0) \quad (1)$$

donde \otimes representa la operación convolución y $\delta(\)$ es la función delta de Dirac. Durante el proceso de encriptación, la entrada del sistema es iluminada con una onda plana monocromática. Luego, en el plano de salida se registra la intensidad de la transformada de Fourier del plano de entrada, patrón de intensidad conocido como espectro conjunto de potencias o JPS (por las siglas en inglés de joint power spectrum),

$$JPS(u, v) = |F(u, v)|^2 + |K(u, v)|^2 + F(u, v)K^*(u, v)\exp(4\pi iau) + F^*(u, v)K(u, v)\exp(-4\pi iau) \quad (2)$$

donde $*$ es el complejo conjugado, $F(u, v)$ y $K(u, v)$ son las transformadas de Fourier de $f(x_0, y_0)$, $m(x_0, y_0)$ y $k(x_0, y_0)$, respectivamente. El JPS contiene cuatro términos, los primeros dos corresponden a la intensidad de $F(u, v)$ y

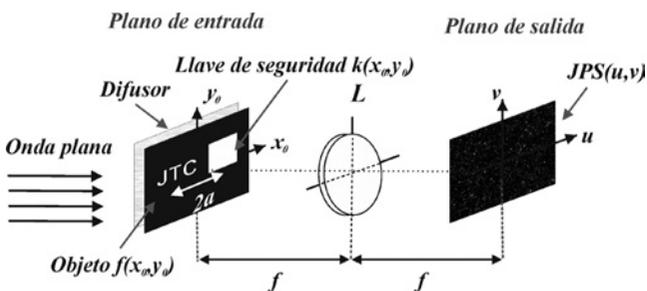


Figura 1. Sistema de encriptación JTC.

$K(u, v)$, respectivamente; el tercer y cuarto término son la imagen encriptada y su complejo conjugado. Para extraer la información encriptada del JPS, primero se bloquea la llave de seguridad y se registrar en el plano de salida $|F(u, v)|^2$; asimismo al bloquear el objeto se obtiene $|K(u, v)|^2$. Restando estos dos términos del JPS se obtiene,

$$JPS^s(u, v) = F(u, v) K^*(u, v) \exp(4\pi iau) + F^*(u, v) K(u, v) \exp(-4\pi iau) \quad (3)$$

Finalmente, la información encriptada se obtiene filtrando el segundo término y reposicionando el primero (Barrera, Rueda, Ríos, Tebaldi, Bolognini & Torroba, 2011),

$$E(u, v) = F(u, v) K^*(u, v) \quad (4)$$

Para acceder a la información original a partir del dato encriptado se debe poseer la información de la llave de seguridad. Para la obtención experimental de la información encriptada y de la llave de seguridad se utilizó un interferómetro que posee en un brazo el sistema de encriptación JTC y en el otro una onda plana de referencia (Figura 2). En el proceso de encriptación, el JPS se generó experimentalmente usando solo el brazo que contiene el sistema encriptador, es decir, se bloqueó la onda de referencia, y se registró en JPS (ecuación (2)) usando una cámara CCD. El objeto de entrada $f(x_0, y_0)$ y la abertura cuadrada que define el área de la llave de seguridad se proyectaron en un modulador espacial de luz SLM (por las siglas en inglés de Spatial Light Modulator), donde las máscaras aleatorias de fase $m(x_0, y_0)$ y $k(x_0, y_0)$ se generan al poner en contacto el SLM con un difusor (vidrio despolido que es un elemento aleatorio y físico). De esta forma se obtiene la información del plano de entrada (ecuación (1)) del sistema de encriptación JTC.

Una vez se tiene la imagen encriptada (ecuación (4)), se procede con el registro de holográfico de la información de la llave de seguridad. Al bloquear la información del objeto, es decir proyectando en el modulador solo la abertura cuadrada que define el área de la llave de seguridad, y usando la onda de referencia, en la cámara CCD se puede almacenar el holograma de la transformada de Fourier de la llave de seguridad (Figura 2), que en esta arquitectura actúa como llave de recuperación (Barrera, Rueda, Ríos, Tebaldi, Bolognini & Torroba, 2011),

$$HK(u, v) = |K(u, v)|^2 + |P(u, v)|^2 + P(u, v) K^*(u, v) \exp(2\pi iau) + P^*(u, v) K(u, v) \exp(-2\pi iau) \quad (5)$$

donde $P(u, v)$ representa la onda plana de referencia. Al filtrar los primeros tres términos y reposicionar el último término de la ecuación (5), se obtiene la llave de recuperación $K(u, v)$.

En el proceso de recuperación se emplea un sistema óptico virtual de desencriptación (Figura 3), donde en el plano de entrada se ubican la imagen encriptada $E(u, v)$ (ecuación (4)) y la llave desencriptadora $K(u, v)$,

$$S(u, v) = F(u, v) K^*(u, v) K(u, v) \quad (6)$$

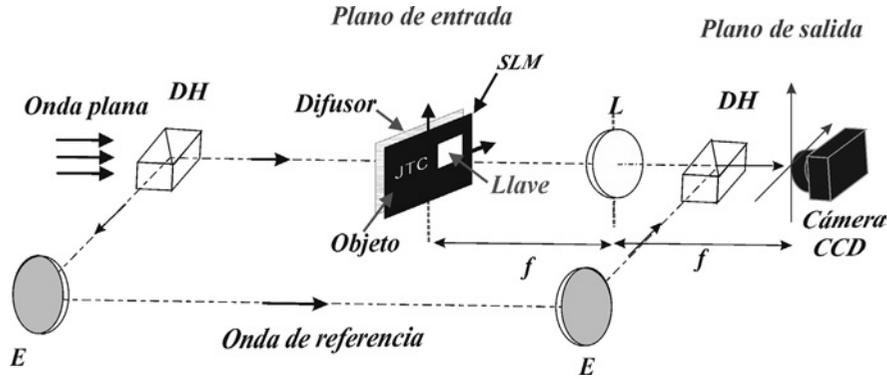


Figura 2. Montaje experimental (DH: divisor de haz; E: espejo; L: lente; SLM: modulador espacial de luz).

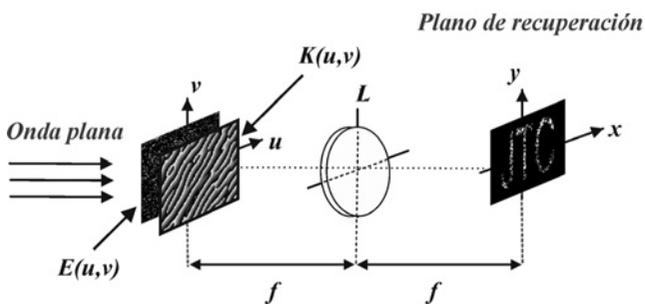


Figura 3. Sistema de recuperación.

Finalmente al realizar la transformada de Fourier sobre el plano de entrada del sistema descryptador, en el plano de salida se obtiene un campo óptico de la forma:

$$d(x, y) = f(x, y) m(x, y) \otimes [k^* (-x, -y) \otimes k(x, y)] \quad (7)$$

La expresión se puede simplificar bajo la aproximación $k^* (-x, -y) \otimes k(x, y) \approx \delta(x, y)$ (Unnikrishnan, et al., 1998), y por lo tanto la imagen descryptada se puede expresar como

$$r(x, y) = f(x, y) m(x, y) \quad (8)$$

Como $m(x, y)$ es una máscara aleatoria de fase, la información del objeto de entrada se recupera al calcular la intensidad de la imagen descryptada.

Se debe resaltar que a diferencia de otros sistemas de encriptación (Javidi, et al., 1996; Unnikrishnan, et al., 1998), cuando se usa un correlador de transformada conjunta no se requiere generar el complejo conjugado de la llave de seguridad, lo que representa una ventaja adicional de este sistema. Además, los sistemas ópticos de encriptación y descryptación son compactos.

Resultados experimentales

En el montaje experimental se utiliza un modulador espacial de transmisión SLM Holoeye LC2002 con 800x600 pixeles de 32 μm para proyectar el objeto y la abertura cuadrada que limita el área de la llave de seguridad, un láser de Helio Neón (λ = 632.8 nm) como fuente de iluminación y una cámara

CCD PULNIX TM6703 de 640x480 pixeles de área 9 μm x 9 μm (Figura 2) para almacenar la información procesada ópticamente. El tamaño del objeto y la llave es 1.92 mm x 1.92 mm, y la distancia entre el objeto y la llave es 2.6 mm. La lente empleada para generar el JPS tiene una longitud focal de 200 mm y las máscaras aleatorias de fase son generadas por medio de un difusor.

La Figura 4 presenta los resultados experimentales de los procesos de encriptación y descryptación. Como objeto se eligió las letras JTC (Figura 4(a)), en la Figura 4(b) se presenta el dato encriptado (ecuación (4)), como era de esperarse la información encriptada es un patrón aleatorio debido al uso de las máscaras aleatorias de fase. Para recuperar la información original, el usuario autorizado ingresa el dato encriptado y la llave de recuperación al sistema descryptador. La intensidad del campo óptico

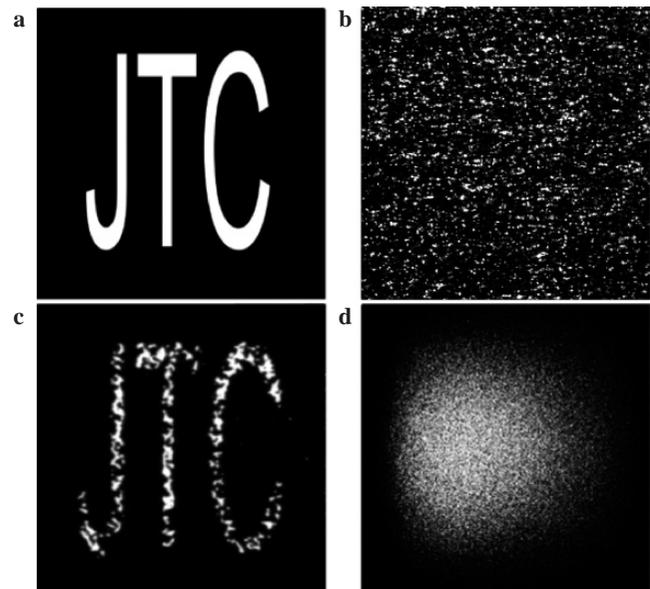


Figura 4. (a) Información original, (b) dato encriptado, (c) dato recuperado con la llave de seguridad correcta, y (d) dato descryptado con una llave diferente a la empleada durante la encriptación.

a la salida del sistema permite recuperar la información original (Figura 4(c)). Por otro lado, si la información encriptada es interceptada por un intruso, no podrá acceder a la información del objeto si usa una llave diferente a la original (Figura 4(d)). Aunque la seguridad del proceso recae principalmente en la llave original, se debe tener en cuenta que los parámetros y grados de libertad del sistema óptico pueden verse como llaves extras de seguridad, por lo tanto para recuperar la información original un usuario también debe conocer la información de dichas llaves.

Como la imagen encriptada y la llave de recuperación son digitalizadas y posteriormente transmitidas, pueden estar sometidas a factores que alteran la información que contienen. Para simular la pérdida de información durante la transmisión, se hacen algunos píxeles, de la imagen encriptada y la llave de recuperación, simultánea y aleatoriamente iguales a cero en un porcentaje creciente, y se procede a evaluar la fidelidad de los datos recuperados. A cada una de las imágenes descifradas se le calcula el error cuadrático medio normalizado NMSE (siglas en inglés de normalized mean square error) definido como

$$NMSE = \frac{\sum_{i,j=1}^{N,M} |I'_{ij} - I_{ij}|^2}{\sum_{i,j=1}^{N,M} |I^w_{ij} - I_{ij}|^2} \quad (9)$$

donde $N \times M$ es el número total de píxeles de las imágenes, I'_{ij} representa la intensidad del píxel ij de cada imagen descifrada cuando se pierde información, I^w_{ij} representa la imagen con la máxima pérdida y I_{ij} representa la imagen recuperada sin ninguna pérdida.

En la Figura 5 se presenta la gráfica del NMSE en función de la pérdida de información de la imagen encriptada y la llave de recuperación. En este caso, el porcentaje de pérdida es el mismo tanto para la llave como para el objeto encriptado, ya que se supone que la información es enviada por el mismo canal y por ello el ruido afecta los datos en igual porcentaje. Se puede notar que la correlación entre la imagen recuperada cuando no hay pérdida de información y las imágenes descifradas con pérdida, decrece a medida que la porcentaje de píxeles iguales a cero se incrementan sobre la imagen encriptada y la llave de descifrado. Lo anterior implica que a medida que aumenta la pérdida, la calidad de la imagen descifrada se reduce, lo cual se evidencia en la pérdida gradual sobre el dato recuperado y en un incremento del ruido que lo afecta. Cuando la pérdida de información es igual o superior al 50%, la imagen recuperada muestra una muy pobre correlación con la imagen original. Por lo tanto, a pesar de la degradación que presenta la imagen recuperada debido a la pérdida de información de la llave de seguridad y la imagen encriptada, se puede afirmar que el sistema de encriptación de doble máscara de fase basado en

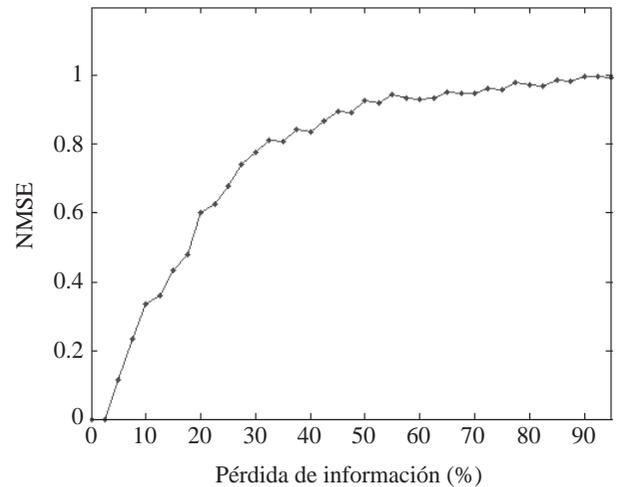


Figura 5. Curva que muestra la influencia de la pérdida de información en la llave de seguridad y el objeto encriptado sobre la imagen recuperada.

una arquitectura JTC es bastante tolerante a las pérdidas en la transmisión de información.

Conclusiones

En esta contribución se presenta la descripción teórica y la implementación experimental de un sistema de encriptación de doble máscara de fase en una arquitectura de transformada conjunta. El sistema de protección emplea una llave física, lo que garantiza un alto grado de seguridad. El análisis teórico y los resultados experimentales muestran que la información es recuperada satisfactoriamente cuando un usuario autorizado posee el dato encriptado y la llave de recuperación, de manera que el objeto no puede obtenerse bajo la interceptación del dato encriptado. Además, se muestra que el proceso de recuperación es tolerante a las pérdidas de la información transmitida en el proceso. Como comentario adicional debe mencionarse que hoy en día los computadores son básicamente sistemas electrónicos. Puede vislumbrarse en el futuro el desarrollo de computadoras ópticas (almacenamiento holográfico, interconectores ópticos no lineales, compuertas lógicas ópticas, etc.) y por ende la necesidad de proveer seguridad en el manejo de la información. En este contexto será de vital importancia profundizar las investigaciones en encriptación óptica de información.

Agradecimientos

Esta investigación fue llevada a cabo con el apoyo del Comité para el Desarrollo de la Investigación -CODI- (Universidad de Antioquia-Colombia), COLCIENCIAS (Colombia), Estrategia de Sostenibilidad 2014-2015 (Universidad de Antioquia-Colombia), MINCyT-COLCIENCIAS CO/13/05, CONICET Nos. 0863/09 y 0549/12 (Argentina), y la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata No. 11/I168 (Argentina). John Fredy Barrera Ramírez agradece el apoyo

del Centro Internacional de Física Teórica (The International Centre for Theoretical Physics - ICTP) y la Academia Mundial de las Ciencias (The World Academy of Sciences - TWAS). Los autores agradecen la colaboración de Alexis Jaramillo (Instituto de Física, Universidad de Antioquia) por su ayuda en la realización de las experiencias que permitieron obtener los resultados presentados en este artículo.

Conflicto de intereses

Los autores del artículo declaramos que no existe conflicto de intereses con relación a la publicación de este artículo.

Referencias

- Alfalou, A., Brosseau, C.** 2009. Optical image compression and encryption methods. *Adv. Opt. Photon* **1**: 589-636.
- Barrera, J.F., Henao, R., Tebaldi, M., Torroba, R., Bolognini, N.** 2006a. Multiplexing encryption-decryption via lateral shifting of a random phase mask. *Opt. Commun.* **259**: 532-536.
- Barrera, J.F., Henao, R., Tebaldi, M., Torroba, R., Bolognini, N.** 2006b. Multiplexing encrypted data by using polarized light. *Opt. Commun.* **260**: 109-112.
- Barrera, J.F., Henao, R., Tebaldi, M., Torroba, R., Bolognini, N.** 2006c. Multiple image encryption using an aperture-modulated optical system. *Opt. Commun.* **261**: 29-33.
- Barrera, J.F., Tebaldi, M., Torroba, R., Bolognini, N.** 2009. Multiplexing encryption technique by combining random amplitude and phase masks. *Optik* **120**: 351-355.
- Barrera, J.F., Rueda, E., Ríos, C., Tebaldi, M., Bolognini, N., Torroba, R.** 2011. Experimental opto-digital synthesis of encrypted sub-samples of an image to improve its decoded quality. *Opt. Commun.* **284**: 4350-4355.
- Barrera, J.F., Torroba, R.** 2010. One step multiplexing optical encryption. *Opt. Commun.* **283**: 1268-1272.
- Barrera, J.F., Vargas, C., Tebaldi, M., Torroba, R., Bolognini, N.** 2010. Known-plaintext attack on a joint transform correlator encrypting system. *Opt. Lett.* **35**: 3553-3555.
- Bellare, M., Desai, A., Pointcheval, D., Rogaway, P.** 1998. Relations Among Notions Security for Public-Key Encryption Schemes. *Lecture Notes in Computer* **1492**: 26-46.
- Carnicer, A., Montes-Usategui, M., Arcos, S., Juvells, I.** 2005. Vulnerability to chosen-cyphertext attacks of optical encryption schemes based on double random phase keys. *Opt. Lett.* **30**: 1644-1646.
- Camp-Winget, N., Housley, R., Wagner, D., Walker, J.** 2003. Security flaws data links protocols. *Communications of the ACM* **46**: 35-39.
- Graydon, O.** 2013. Cryptography: Quick response codes, *Nature Photonics* **7**: 343.
- Javidi, B., Zhang, G., Li, J.** 1996. Experimental demonstration of the random phase encoding technique for image encryption and security verification. *Opt. Eng.* **35**: 2506-2512.
- Javidi, B., Esmail, A., Zhang, G.** (Abril 3, 2012). Optical security system using Fourier plane encoding. U.S. patent 8,150,033 B2.
- Matoba, O., Javidi, B.** 1999. Encrypted optical memory system using three-dimensional keys in the Fresnel domain. *Opt. Lett.* **24**: 762-764.
- Nomura, T., Javidi, B.** 2000. Optical encryption using a joint transform correlator architecture. *Opt. Eng.* **39**: 2031-2035.
- Nomura, T., Pérez-Cabré, E., Millán, M.S., Javidi, B.** 2009. Optical Techniques for Information Security. *Proc. IEEE* **97**: 1128-1148.
- Pile, D.** 2010. Optical encryption: The ghost holds a secret. *Nature Photonics* **4**: 587.
- Refregier, P., Javidi, B.** 1995. Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding. *Opt. Lett.* **20**: 767-769.
- Shannon, C.** 1949. Communication Theory of Secrecy Systems. *Bell Systems Technical Journal* **28**: 656-715.
- Situ, G., Zhang, J.** 2004. Double random-phase encoding in the Fresnel domain. *Opt. Lett.* **29**: 1584-1586.
- Situ, G., Zhang, J.** 2005. Multiple-image encryption by wavelength multiplexing. *Opt. Lett.* **30**: 1306-1308.
- Unnikrishnan, G., Joseph, J., Singh, K.** 1998. Optical encryption system that uses phase conjugation in a photorefractive crystal. *Appl. Opt.* **31**: 8181-8186.
- Unnikrishnan, G., Joseph, J., Singh, K.** 2000. Optical encryption by double-random phase encoding in the fractional Fourier domain. *Opt. Lett.* **25**: 887-889.
- Wang, X., Zhao, D.** 2012. Double images encryption method with resistance against the specific attack based on an asymmetric algorithm. *Opt. Express* **20**: 11994-12003.

The spatial coherence wavelets and second-order correlation

Juan Manuel González-Toro

Departamento de Ciencias Naturales y Exactas, Fundación Universidad Autónoma de Colombia, Bogotá, Colombia

Abstract

A description of the second-order spatial coherence based on the theory of spatial coherence wavelets is presented. Such description is performed in the classical context of optical fields and chaotic sources. The concepts of radiant and virtual point sources are introduced. This theory suggests that the second-order spatial coherence state of light can be described in terms of three layers of point sources; a strategy that can increase the performance of numerical algorithms. The obtained modulation in coherence is similar to that measured in Hanbury-Brown and Twiss effect for binary stars.

Key words: Second-order spatial coherence, Hanbury-Brown and Twiss effect, Binary stars.

Onditas de coherencia espacial y correlación de segundo orden

Resumen

Se presenta una descripción de la coherencia espacial de segundo orden, basada en la teoría de onditas de coherencia espacial. Tal descripción es realizada en el contexto de campos ópticos y fuentes caóticas. Se introducen los conceptos de fuentes puntuales radiantes y virtuales. Esta teoría sugiere que el estado de coherencia espacial de segundo orden puede ser descrito en términos de tres capas de fuentes puntuales; una estrategia que puede mejorar el rendimiento de los algoritmos numéricos. La modulación obtenida en la coherencia es similar a la medida en el efecto Hanbury-Brown y Twiss para estrellas binarias.

Palabras clave: coherencia espacial de segundo orden, Efecto Hanbury-Brown y Twiss, estrellas binarias.

Introduction

The theory of spatial coherence wavelets provides a phase-space representation for classical optical phenomena within the scope of the first-order coherence (Castañeda, 2010a). In this theory, an optical field in any state of spatial coherence can be described by the emission of two types of point sources distributed in two different layers of space (Castañeda, 2010b).

The first type is called radiant point sources and they are located at first layer. These are responsible for the propagation of the radiant energy of the field, a positive definite quantity independent from the spatial coherence state and recordable by the squared-modulus detectors. The second type of sources is named virtual point sources and they are placed at the second layer. Their energies can take positive and negative values and they are not directly recordable by detectors, but they are crucial to describe diffraction and interference because they modulate the radiant energy by increasing and decreasing the local values without altering the value of the total energy of the field. Such energies depend on the spatial coherence state. A virtual point source is turned on at the midpoint of any pair of radiant point sources, not necessarily consecutive, within the structured spatial coherence support centered at that position

(Castañeda, 2010b), which implies that the set of radiant sources must be discrete. These virtual sources are called first-order virtual point sources. This model can completely describe the first-order spatial coherence properties of scalar wave fields.

Now, Young-like experiments with first-order virtual point sources are analyzed. The interference between contributions from these sources is a result of the second-order state of spatial coherence of the field. It leads to correlation between the spatial coherence wavelets, which also involves the correlation of the cross-spectral densities. This development is performed in the classical context of optical fields and chaotic sources, which is appropriate for describing stars. The result is compared with that obtained in the Hanbury-Brown and Twiss effect to measure the angular separation of binary stars systems.

The study of this effect in the spatial domain is valuable, for instance, to construct modern intensity interferometers with Cherenkov telescopes (Le Bohec and Holder, 2006).

Corresponding author:

Juan Manuel González-Toro, jgonzalez.toro@fuac.edu.co

Recibido: 18 de Julio de 2015

Aceptado: 23 de septiembre de 2015

Spatial coherence wavelet

Spatial coherence wavelet is defined as the basic vehicle for simultaneous transport of information about the energy (power spectrum) and the state of the first-order spatial coherence of optical field (correlation between the complex amplitudes of the field at two different points of the space) from the aperture plane (*AP*) to the observation plane (*OP*) (Castañeda, 2010a). The planes are separated by a distance z . Center-difference coordinates in the *AP* (ξ_A, ξ_D) and the *OP* (r_A, r_D) are used in order to denote pairs of points at the positions $(\xi_A + \xi_D/2, \xi_A - \xi_D/2)$ and $(r_A + r_D/2, r_A - r_D/2)$, as illustrated in Figure 1. These points are simplified as $(\xi_A \pm \xi_D/2)$ and $(r_A \pm r_D/2)$, respectively.

The radiant and virtual point sources are located at the *AP*, each of these in the corresponding layer. ξ_D is the separation vector between radiant point sources. The wavelet is denoted as:

$$\mathbf{W}\left(\mathbf{r}_A \pm \frac{\mathbf{r}_D}{2}; \xi_A\right) = \mathbf{S}\left(\xi_A, \mathbf{r}_A\right) \exp\left[-i \frac{k}{z} (\xi_A \cdot \mathbf{r}_D)\right], \quad (1)$$

with wave-number $k = 2\pi/\lambda$, wavelength λ and $\mathbf{S}(\xi_A, \mathbf{r}_A)$ the marginal power spectrum. It is a Wigner distribution function with energy units, defined as (Castañeda, 2010a):

$$\mathbf{S}(\xi_A, \mathbf{r}_A) = \int_{AP} \mathbf{W}\left(\xi_A \pm \frac{\xi_D}{2}\right) \exp\left(i \frac{k}{z} \xi_A \cdot \xi_D\right) \exp\left(-i \frac{k}{z} \xi_D \cdot \mathbf{r}_A\right) d^2 \xi, \quad (2)$$

where $W(\xi_A \pm \xi_D/2)$ is the cross-spectral density of the field at the *AP*, referred to the structured spatial coherence support centered at ξ_A that encloses the pairs of radiant point sources with separation vectors ξ_D . The cross-spectral density W provides a measure of statistical similarity between light fluctuations at two points of space-time, which is a measure of the correlation between the complex

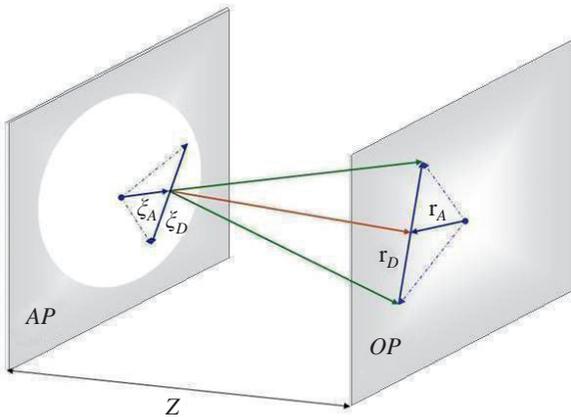


Figure 1. Illustration of the center-difference coordinates (ξ_A, ξ_D) and (r_A, r_D) at the aperture plane (*AP*) and the observation plane (*OP*), respectively.

amplitudes on the component frequency spectrum ω of light vibrations at these points (Mandel and Wolf, 1995). These amplitudes are described by stationary random processes. Such processes have the characteristic that their statistical moments are independent of time, although their values are random variables that fluctuate over time (Goodman, 2000). Since the correlation between the amplitudes is an ensemble average, then its value does not depend on time but on the points in space where the correlation is evaluated, i.e. the correlation is a pure spatial descriptor.

The superposition of spatial coherence wavelets produces the cross-spectral density of the field at the *OP*:

$$W\left(\mathbf{r}_A \pm \frac{\mathbf{r}_D}{2}\right) = \left(\frac{1}{\lambda z}\right)^2 \exp\left[i \frac{k}{z} \mathbf{r}_A \cdot \mathbf{r}_D\right] \int_{AP} \mathbf{W}\left(\mathbf{r}_A \pm \frac{\mathbf{r}_D}{2}; \xi_A\right) d^2 \xi_A, \quad (3)$$

where $W(\mathbf{r}_A \pm \mathbf{r}_D/2) = \mu(\mathbf{r}_A \pm \mathbf{r}_D/2) \sqrt{S(\mathbf{r}_A + \mathbf{r}_D/2)} \sqrt{S(\mathbf{r}_A - \mathbf{r}_D/2)}$, with $\mu(\mathbf{r}_A \pm \mathbf{r}_D/2)$ the complex degree of spatial coherence at the *OP*, $S(\mathbf{r}_A \pm \mathbf{r}_D/2)$ the power spectrum recorded by the detectors (Mandel and Wolf, 1995). Interference terms between wavelets are not included in equation (3). It generates a moiré, which is called spatial coherence moiré (Castañeda, 2010a).

Correlation between spatial coherence wavelets

The following equation determines the correlation between the cross-spectral densities of the field at the *OP* referred to the structured spatial coherence supports centered in the points r_A and r'_A , respectively:

$$G\left(\mathbf{r}_A \pm \frac{\mathbf{r}_D}{2}, \mathbf{r}'_A \pm \frac{\mathbf{r}'_D}{2}\right) = \left\langle W\left(\mathbf{r}_A \pm \frac{\mathbf{r}_D}{2}\right) W^*\left(\mathbf{r}'_A \pm \frac{\mathbf{r}'_D}{2}\right) \right\rangle, \quad (4)$$

with $\langle \rangle$ denoting ensemble average. Thus, equations (3) and (4) lead to the correlation between spatial coherence wavelets:

$$G\left(\mathbf{r}_A \pm \frac{\mathbf{r}_D}{2}, \mathbf{r}'_A \pm \frac{\mathbf{r}'_D}{2}\right) = \left(\frac{1}{\lambda z}\right)^4 \exp\left(i \frac{k}{z} (\mathbf{r}_A \cdot \mathbf{r}_D - \mathbf{r}'_A \cdot \mathbf{r}'_D)\right) \times \iint_{APAP} \left\langle \mathbf{W}\left(\mathbf{r}_A \pm \frac{\mathbf{r}_D}{2}, \xi_A\right) \mathbf{W}^*\left(\mathbf{r}'_A \pm \frac{\mathbf{r}'_D}{2}, \xi'_A\right) \right\rangle d^2 \xi_A d^2 \xi'_A. \quad (5)$$

Thereby equations (1), (2) and (5) point out that the second-order spatial coherence state of the field at the *OP*, represented by $\langle W(\mathbf{r}_A \pm \mathbf{r}_D/2) W^*(\mathbf{r}'_A \pm \mathbf{r}'_D/2) \rangle$, results from contributions of the second-order spatial coherence state of the field at the *AP*, given by $\langle W(\xi_A \pm \xi_D/2) W^*(\xi'_A \pm \xi'_D/2) \rangle$, which are propagated by:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}(\xi_A, \xi'_A, \mathbf{r}_A, \mathbf{r}'_A) &= \langle \mathbf{S}(\xi_A, \mathbf{r}_A) \mathbf{S}(\xi'_A, \mathbf{r}'_A) \rangle \\ &= \int_{AP} \int_{AP} \left\langle \mathbf{W}\left(\xi_A \pm \frac{\xi_D}{2}\right) \mathbf{W}^*\left(\xi'_A \pm \frac{\xi'_D}{2}\right) \right\rangle \\ &\quad \times \exp\left[i \frac{k}{z} (\xi_A \cdot \xi_D - \xi'_A \cdot \xi'_D)\right] \\ &\quad \times \exp\left[-i \frac{k}{z} (\xi_D \cdot \mathbf{r}_A - \xi'_D \cdot \mathbf{r}'_A)\right] d^2 \xi_D d^2 \xi'_D, \end{aligned} \quad (6)$$

such propagation is depicted in Figure 2. Using equation (6), the new second-order spatial coherence wavelets that propagate the second-order spatial coherence state of the field can be expressed as:

$$\mathbf{G}\left(\mathbf{r}_A \pm \frac{\mathbf{r}_D}{2}, \mathbf{r}'_A \pm \frac{\mathbf{r}'_D}{2}; \xi_A, \xi'_A\right) = \left\langle \mathbf{W}\left(\mathbf{r}_A \pm \frac{\mathbf{r}_D}{2}, \xi_A\right) \mathbf{W}^*\left(\mathbf{r}'_A \pm \frac{\mathbf{r}'_D}{2}, \xi'_A\right) \right\rangle = \mathbf{K}(\xi_A, \xi'_A, \mathbf{r}_A, \mathbf{r}'_A) \exp\left[-i \frac{k}{z} (\xi_A \cdot \mathbf{r}_D - \xi'_A \cdot \mathbf{r}'_D)\right]. \quad (7)$$

With equation (7) in (5), the next expression is obtained:

$$G\left(\mathbf{r}_A \pm \frac{\mathbf{r}_D}{2}, \mathbf{r}'_A \pm \frac{\mathbf{r}'_D}{2}\right) = \left(\frac{1}{\lambda z}\right)^4 \exp\left[i \frac{k}{z} (\mathbf{r}_A \cdot \mathbf{r}_D - \mathbf{r}'_A \cdot \mathbf{r}'_D)\right] \times \int_{AP} \int_{AP} \mathbf{K}(\xi_A, \xi'_A, \mathbf{r}_A, \mathbf{r}'_A) \exp\left[-i \frac{k}{z} (\xi_A \cdot \mathbf{r}_D - \xi'_A \cdot \mathbf{r}'_D)\right] d^2 \xi_A d^2 \xi'_A. \quad (8)$$

The measurement of second-order correlation involves the combination of power spectrum values in a correlator. The power spectrum values are simultaneously recorded by two squared-modulus detectors, placed at two different points on the OP . The correlator is an electronic device that receives the signals from both detectors and multiplies them (**Hanbury-Brown and Twiss R, 1956**). A requirement of such measuring strategy is to arrange the detectors in the same structured support, i.e., $r_A = r'_A$ and $r_D = r'_D$, so that equation (8) becomes:

$$G^{(2)}\left(\mathbf{r}_A \pm \frac{\mathbf{r}_D}{2}\right) = \left\langle \left| W\left(\mathbf{r}_A \pm \frac{\mathbf{r}_D}{2}\right) \right|^2 \right\rangle = \left(\frac{1}{\lambda z}\right)^4 \times \int_{AP} \int_{AP} \mathbf{K}(\xi_A, \xi'_A, \mathbf{r}_A) \exp\left[-i \frac{k}{z} (\xi_A - \xi'_A) \cdot \mathbf{r}_D\right] d^2 \xi_A d^2 \xi'_A. \quad (9)$$

Second-order young's experiment

The simplest configuration for analyzing second-order correlation of the field involves a pair of first-order virtual point sources at the second layer, each one turned on by a specific correlated pair of radiant point sources on the first layer. This configuration contains four co-linear radiant point sources on one-dimensional mask. Such situation is illustrated in Figure 3.

The four radiant point sources can emit different powers. The first and second source, and the third and fourth source have the same separation a , the second and third source have separation b . Therefore, the separation between the two first-order virtual point sources is $a + b$. These sources of the second layer turn on a second-order virtual point source at the third layer. It is assumed propagation in Fraunhofer domain and real-valued degree of first-order spatial coherence $\mu(\xi_A \pm \xi_D/2)$.

The correlated pairs of radiant point sources are constituted by the first and the second source, and the third and fourth

source, respectively. The coordinate origin of AP is at the first source. Two squared-modulus detectors are placed at different positions on the OP , with separation $r_D = x_D$ and coordinate origin $r_A = 0$.

The first and second layers of AP are involved with radiant energy and modulated energy, respectively. The third layer is associated with modulated coherence. The fourth layer represented in Figure 3 is the unified structure; this one contains the three types of point sources. The black bars denote the opaque segments of the mask and allow determining the relative positions of the different point sources. Note that the radiant point sources are always placed in the mask openings while the virtual point sources are at the midpoints of the opaque segments.

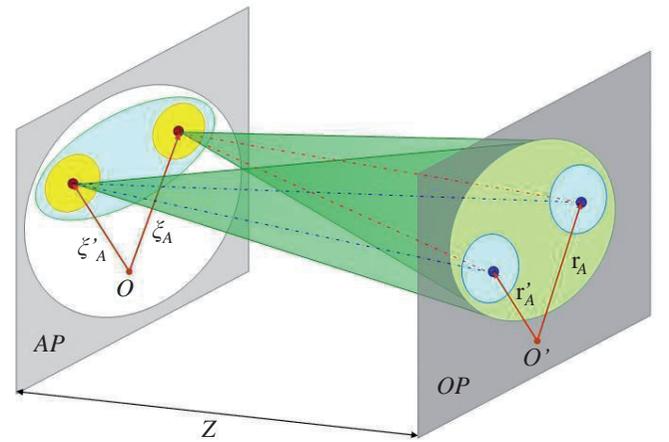


Figure 2. The cones represent the propagation of $\mathbf{G}(\mathbf{r}_A \pm \mathbf{r}_D/2, \mathbf{r}'_A \pm \mathbf{r}'_D/2; \xi_A, \xi'_A)$ from AP to OP .

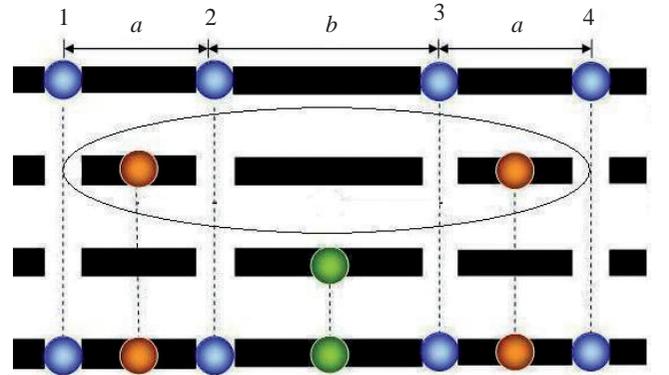


Figure 3. Diagram of layers at AP for second-order Young's experiment. The black bars denote the opaque segments of the mask and the circles denote the point sources. There are four radiant point sources on first layer on top, placed at the mask openings, two first-order virtual point sources on second layer from top and a second-order virtual point source on third layer from top. The virtual point sources are at the midpoints of the opaque segments of the mask. The bottom layer is the unified structure.

Results

The dimensionless functions $1 \equiv C\delta(\xi_D) + [1 - C\delta(\xi_D)]$ and $1 \equiv C'\delta(\xi'_D) + [1 - C'\delta(\xi'_D)]$ are introduced in order to separate the contributions of radiant and virtual point sources in the equation (9). It can be expressed like the sum of the terms:

$$G_{rad}^2 = \left(\frac{1}{\lambda z}\right)^4 [\langle S^2(0) \rangle + \langle S^2(a) \rangle + \langle S^2(a+b) \rangle + \langle S^2(2a+b) \rangle], \quad (10)$$

and

$$G_{vir}^2(x_D) = \left(\frac{1}{\lambda z}\right)^4 [\langle S(a) S(0) \rangle \langle \mu^2(a, 0) \rangle + \langle S(b+2a) S(b+a) \rangle \langle \mu^2(b+2a, b+a) \rangle + \left(\frac{1}{\lambda z}\right)^4 2 \langle \sqrt{S(a)} \sqrt{S(0)} \sqrt{S(b+2a)} \sqrt{S(b+a)} \rangle \langle \mu(a, 0) \mu(b+2a, b+a) \rangle \cos \left[\frac{k}{z} (a+b) x_D \right]. \quad (11)$$

G_{rad}^2 is the square of the power spectrum values recorded individually by the detectors; it is the contribution by the radiant point sources which does not depend on the OP coordinates. The two first terms of G_{vir}^2 are the contributions due to the first-order virtual point sources while the last term is the contribution due to the second-order virtual source. This term results from the correlation between power spectrum values, so that the cosine modulation factor depends on the separations of both the second-order virtual point sources $a+b$ on AP , and the detectors x_D on OP .

In order to relate these results with chaotic sources, for instance a binary star system, each correlated pair of radiant point sources can be associated to the ends of a star. Such analogy is often used in astronomy (Foellmi, 2009). Equation (11) depends on the separation a of each pair of radiant point sources (angular separation a/z of each star), the separation $a+b$ between pairs of radiant point sources (angular separation $(a+b)/z$ between a pair of stars) and separation x_D of the detectors (telescopes).

The first two terms of equation (10) characterize the contribution of the two radiant point sources on the left in Figure 3 and the first term in equation (11) characterizes the virtual point source activated by them. These amounts represent the star on the left of the binary system. Similarly, the last two terms of equation (10) characterize the two radiant point sources on the right in Figure 3 and the second term of equation (11) their virtual point source. All these represent the star to the right of the binary system.

The virtual source of the third layer provides the cosine modulation on the measuring. This depends on the correlation between the two virtual sources of the second layer (correlation between stars). It is determined by the amount $\langle \mu(a, 0) + \mu(b+2a, b+a) \rangle$. Then the above amount is zero in equation (11) for uncorrelated virtual point sources (i.e. uncorrelated system of independent stars).

Figure 4 shows the profiles of normalized G_{vir}^2 by integrating equation (11) over all possible pairs of radiant point sources on the disk of each star (Hanbury-Brown, 1974), when the binary stars are: a) uncorrelated systems, b) correlated systems of identical elements (stars with same size and bright) and c) correlated systems with one element (star) three times brighter than the other. For the first instance, G_{vir}^2 is less than 1 in $x_D = 0$, because the last term disappears in equation (11).

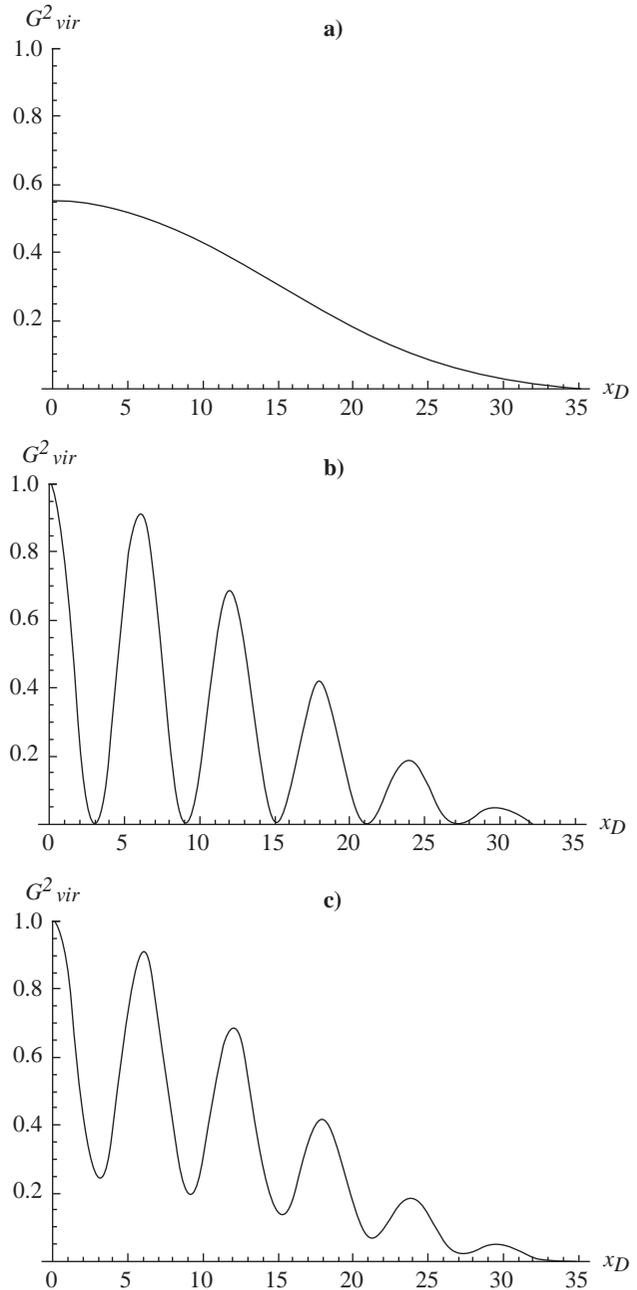


Figure 4. Schematics G_{vir}^2 vs. x_D obtained for second-order Young's experiments when the binary stars are: a) uncorrelated systems, b) correlated systems with identical elements and c) correlated systems with one element three times brighter than the other.

Hanbury-Brown and Twiss Effect

The first measurement of the degree of second-order spatial coherence was performed by Hanbury-Brown and Twiss (*HB&T*) with the intensity interferometer. This type of interferometer measured the correlation of fluctuations of the intensities recorded at two points (telescopes) at the same time. They wanted to measure the angular separation of binary stars systems which could not be solved by other methods. *HB&T* reported the following expression (**Hanbury-Brown, et al., 1967**):

$$\Gamma^2(d) = \frac{1}{(I_1 + I_2)^2} \left[I_1^2 \Gamma_1^2 + I_2^2 \Gamma_2^2 + 2I_1 I_2 |\Gamma_1| |\Gamma_2| \cos \left\{ \frac{2\pi \theta d}{\lambda} \cos \psi \right\} \right], \quad (12)$$

with Γ^2 as normalized degree of second-order spatial coherence, where d is the distance between the telescopes (called baseline), I_1 and I_2 are intensities of the two stars,

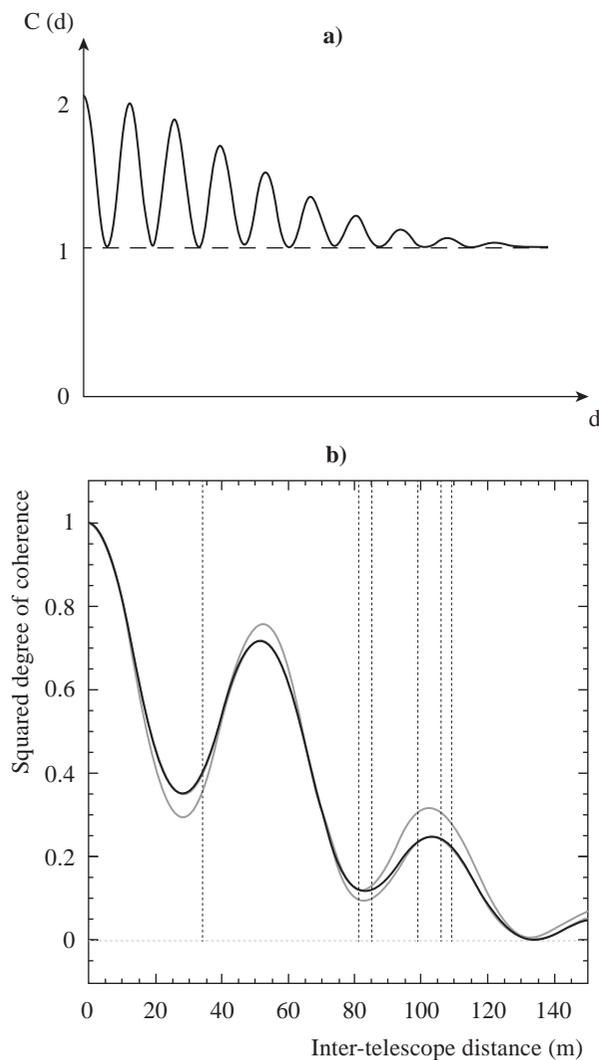


Figure 5. Modeled measures for degree of second-order spatial coherence in: a) binary system with identical stars, where $C(d) = \Gamma^2(d) + 1$ (**Baym, 1998**) and b) binary stars *Spica* type when one star is brighter than the other (**Le Bohec and Holder, 2006**).

Γ_1 and Γ_2 are the degrees of first-order spatial coherence for each star, θ is the angular separation of the binary system, λ is the chosen component of the light emitted by the stars and ψ is the angle between the line joining of stars and the baseline. In this paper, ψ is zero because of *AP* and *OP* are parallel. The equation (11) resembles the mathematical form of equation (12). The argument of the modulation is the same in both equations. The patterns given by equation (12) are plotted in Figure 5 when the binary stars are: a) correlated system of identical stars (**Baym, 1998**) and b) correlated system with one star brighter than the other (**Le Bohec and Holder, 2006**). The corresponding theoretical profiles in Figure 4 are in good (qualitative) agreement with the reported experimental curves in Figure 5. A quantitative fit of the theoretical profiles and the experimental curves has been not possible because the experimental data are reserved.

Conclusion

The second-order spatial coherence state of wave-fields can be analyzed and described in the framework of the classical wave picture and chaotic sources, through the second-order spatial coherence wavelets. This description leads to the correlation of power spectra in the observation plane, which is product of Young-like experiments with first-order virtual sources at the second layer. A second-order virtual point source at a third layer is turned on because of the correlation between pairs of the first-order virtual point sources. Such source is responsible of modulation on the coherence.

It suggests that the second-order spatial coherence state of light can be described in terms of three layers of point sources; a strategy that can increase the performance of numerical algorithms. Such modeling leads to a degree of second-order spatial coherence which is closely related to the result obtained by Hanbury-Brown and Twiss for binary stars.

Acknowledgements

I thank professor Román Castañeda (Universidad Nacional, Sede Medellín) for suggesting this interesting subject of work. I am grateful to Dr. Herbert Vinck Posada (Universidad Nacional, Sede Bogotá) for advices and suggestions. I wish to thank Dr. Gladys Villamarín (Universidad Autónoma, Bogotá) for economic supporting of activities of the international year of light.

Conflict of interests

The author has declared that no competing interests exist.

References

- Baym, G.** (1998). The physics of Hanbury Brown-Twiss intensity interferometry: from stars to nuclear collisions. *Acta Physica Polonica B*: 1839- 1884.
- Castañeda, R.** (2010). *The Optics of the Spatial Coherence Wavelets*. In Peter W. Hawkes, editor: *Advances in Imaging and Electron Physics*, **164**: 29-255.

Castañeda, R., et al. (2010). Radiant, virtual and dual sources of optical fields in any state of spatial coherence. *J. Opt. Soc. Am. A*, **27**: 1322-1330.

Foellmi, C. (2009). Intensity interferometry and the second-order correlation function in astrophysics. *Astronomy & Astrophysics*, 11739-09.

Goodman, J. (2000). *Statistical Optics*. New York. Wiley Classics Library.

Hanbury-Brown, R. (1974). *The intensity interferometer*. New York, Halsted Press.

Hanbury-Brown R. and Twiss R. (1956). A test of a new type of stellar interferometer on Sirius. *Nature*, **178**: 1046-1048

Hanbury-Brown R., Davis F., Allen L.R. and Rome F.M. (1967). The Stellar Interferometer at Narrabri Observatory-II. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, **137**: 393-417

Le Bohec, S. and Holder, J. (2006). Optical Intensity Interferometry with Atmospheric Cerenkov Telescope Arrays. *The Astrophysical Journal*, **649**: 399-405

Mandel L. and Wolf E. (1995). *Optical Coherence and Quantum Optics*. Cambridge, Cambridge University Press.



¿Es un imperio
esa luz que se apaga
o una luciérnaga?

Jorge Luis Borges (1899 - 1986)

Propiedades ópticas de impurezas donadoras en anillos cuánticos sometidos a los efectos combinados de campo eléctrico y radiación láser intensa no resonante

Carlos Alberto Duque^{1,*}, Álvaro Morales¹, Miguel Mora-Ramos²

¹Grupo de Materia Condensada-UdeA, Instituto de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia UdeA, Medellín, Colombia

²Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos, México

Resumen

Este trabajo corresponde a un estudio teórico de las propiedades ópticas y de impurezas para un electrón confinado en un anillo cuántico de GaAs-(Ga,Al)As sometido a los efectos combinados de campo eléctrico estacionario y radiación láser de alta intensidad no resonante. Los cálculos se hacen en la aproximación de masa efectiva con un proceso de diagonalización para resolver la ecuación de autovalores del Hamiltoniano. Se estudian la absorción óptica y los cambios en el índice de refracción. Los resultados obtenidos sugieren un corrimiento al rojo de las propiedades ópticas en función del campo eléctrico mientras que en el láser no resonante puede inducir efectos combinados de corrimientos al rojo y al azul. El trabajo es útil para entender las propiedades de impurezas en anillos cuánticos sometidos a perturbaciones que rompen la simetría azimutal del sistema tales como campos eléctricos estacionarios y radiación láser no resonante de alta intensidad.

Palabras clave: anillos cuánticos, impureza donadora, propiedades ópticas, campo eléctrico.

Optical properties of donor impurities in quantum rings under the combined effects of electric field and nonresonant intense laser radiation

Abstract

This work corresponds to a theoretical study of the optical properties of impurities for an electron confined in a GaAs-(Ga, Al) As quantum ring under the combined effects of stationary electric field and high intensity non-resonant laser radiation. Calculations are made on the effective mass approximation with a diagonalization process to solve the eigenvalues equation of the Hamiltonian. The optical absorption and the changes in refractive index are studied. The results suggest a redshift of the optical properties as a function of the electric field while the non-resonant laser can induce combined effects of redshifts and blueshifts. The work is useful for understanding the properties of impurities in quantum rings subjected to perturbations which break the azimuthal symmetry of the system such as non-stationary resonant electric fields and high-intensity laser radiation.

Key words: Quantum rings, donor impurity, optical properties, electric field.

Introducción

El reciente progreso en la tecnología de nanofabricación ha hecho posible el diseño y la producción de nuevas estructuras y nuevos dispositivos sobre la base de materiales semiconductores y dieléctricos, en los cuales es posible observar una importante variedad de fenómenos físicos novedosos. Entre ellos se pueden mencionar, la observación de estados moleculares en puntos cuánticos espacialmente acoplados (Bayear, *et al.*, 2001) y la formación de anillos cuánticos de tamaño nanométrico (García, *et al.*, 1997), que son análogos nanoscópicos del benceno. En particular, la fabricación de anillos cuánticos semiconductores ha despertado gran interés por la realización de los fenómenos cuánticos topológicos, que se espera se manifiesten en

sistemas de geometría reducida (Aharonov & Bohm, 1959). Por ejemplo, Lorke, *et al.* observaron por primera vez la respuesta óptica de infrarrojo lejano en anillos cuánticos autoensamblados; revelando cambios en el estado fundamental inducidos magnéticamente (Lorke, *et al.*, 2000).

Por otro lado, también se ha estudiado la influencia de campos eléctricos laterales sobre las propiedades electrónicas y ópticas de anillos cuánticos en el régimen de confinamiento fuerte (Harutyunyan, 2009; Harutyunyan, 2011). Cabe mencionar que varios de esos estudios han investigado los

*Correspondencia:

Carlos Alberto Duque, cduque_echeverri@yahoo.es

Recibido: 01 de diciembre de 2014

Aceptado: 14 de mayo de 2015

estados excitónicos; así como las variaciones que se pueden inducir en el espectro de electroabsorción excitónica. En otro orden de cosas, Monozon y Schmelcher reportaron un conjunto de aproximaciones analíticas al problema de un electrón sometido al efecto de una impureza en anillos cuánticos en presencia de campos eléctricos y magnéticos (**Monozon & Schmelcher, 2003**), en tanto Aichinger y colaboradores consideraron los efectos de impurezas y las variaciones de la geometría sobre los niveles de muchos electrones confinados en anillos cuánticos sometidos a campos magnéticos externos (**Aichinger, et al., 2006**).

En los últimos años se han publicado una gran variedad de trabajos que tienen como objeto de estudio heteroestructuras en las cuáles se pueden encontrar ciertas simetrías que se preservan. Esto ocurre ya sea por la configuración específica del sistema o por la forma en que se aplican diversas perturbaciones externas. En los anillos cuánticos, en particular, se preserva la simetría azimutal (**Filikhin, et al., 2006; Culchac, et al., 2008; Bruno-Alfonso & Latgé, 2000; Assaid, et al., 2008; Kleemans, et al., 2009**). Muchos de los trabajos teóricos acerca de estos sistemas se han desarrollado haciendo uso de la aproximación de masa efectiva, conjuntamente con el empleo de esquemas de cálculo de distinta naturaleza: variacionales, perturbativos y, más recientemente, mediante el desarrollo de las funciones de onda en términos de conjuntos completos que constituyen bases adecuadas del espacio de Hilbert. Todo esto apuntando al objetivo central que es encontrar las autofunciones y autoenergías del Hamiltoniano del sistema. Tales cálculos han sido desarrollados para investigar distintas clases de problemas, como son: (1) espectros de electrones y huecos en anillos cuánticos aislados (**Filikhin, et al., 2006**) y dobles (**Culchac, et al., 2008**); (2) estados de impurezas aceptoras y donadoras poco profundas en anillos cuánticos con confinamiento rectangular bajo los efectos cruzados de campos eléctrico y magnético (**Bruno-Alfonso & Latgé, 2000**); (3) estados de impurezas poco profundas en puntos cuánticos parabólicos y semiparabólicos (**Assaid, et al., 2008**), y (4) complejos excitónicos en puntos cuánticos verticalmente acoplados bajo los efectos de campo magnético (**Kleemans, et al., 2009**). Los resultados más importantes pueden ser resumidos así: (1) los niveles excitónicos no aparecen equidistantes y se desdoblán con el campo magnético, reflejando con ello las características asociadas a la geometría de los anillos, (2) las oscilaciones de Aharonov-Bohm de excitones, que son características de anillos unidimensionales no aparecen en sistemas de dimensiones finitas, y (3) los campos eléctricos generan nuevas reglas de selección para las transiciones inter e intrabanda.

Estudios recientes han reportado el coeficiente de absorción óptica intrabanda lineal y no lineal en anillos cuánticos de GaAs aislados bajo los efectos de presión hidrostática y campo eléctrico (**Barseghyan, et al., 2012**). Entre los

resultados arrojados en dicha investigación está que la variación de los diferentes tamaños característicos de la geometría de la estructura puede generar corrimientos bien sea al rojo o al azul de los picos resonantes del espectro óptico intrabanda. Adicionalmente, se ha demostrado que la presencia de un campo eléctrico estático conduce a un desplazamiento hacia el rojo, mientras que la influencia de la presión hidrostática conduce a un desplazamiento hacia el azul en los espectros. En la misma línea de la óptica no lineal, algunos trabajos han reportado los estados de energía en un complejo D_2^+ formado por el acoplamiento de un electrón en la banda de conducción y dos centros donadores en un anillo cuántico con sección transversal rectangular, destacando la importante contribución de la interacción repulsiva entre los dos centros de Coulomb (**Fulla, et al., 2014**). En ese reporte se discuten también las condiciones que conducen a la destrucción de las oscilaciones Aharonov-Bohm del estado fundamental.

Teniendo en cuenta que las perturbaciones externas aplicadas son herramientas útiles para cambiar las propiedades electrónicas y ópticas de estructuras semiconductoras, se han potenciado nuevos estudios que permiten demostrar teóricamente que las nanoestructuras irradiadas por un campo de láser intenso (ILF del Inglés) presentan unas características muy diferentes a las de un semiconductor en volumen y que los efectos de la radiación se hacen mucho más pronunciados a medida que se incrementa el confinamiento de los portadores dada la reducción en la dimensionalidad de los sistemas (**Duque, et al., 2011; Mora-Ramos, et al., 2013**). Así, Peyghambarian *et al.* reportaron por vez primera la observación del efecto Stark sobre excitones sometidos a un ILF no resonante (**Peyghambarian, et al., 1989**), mientras Asmar y colaboradores consideraron un gas de electrones cuasi bidimensional en heteroestructuras de GaAs vestidas por un campo láser intenso de frecuencias en el rango de los terahertz (**Asmar, et al., 1995**). En la actualidad existe gran desconocimiento sobre la alta capacidad de ajuste de las transiciones inter-subbanda en sistemas unidimensionales y bidimensionales bajo los efectos de láser intenso no resonante. También se desconocen los efectos de la aplicación combinada de radiación de láser intenso y campos eléctricos estacionarios aplicados en el plano de heteroestructuras cuasi-bidimensionales. Los efectos de una radiación ILF en el rango de los terahertz sobre el potencial de confinamiento de puntos y anillos cuánticos pueden ser importantes para el diseño de nuevos láseres sintonizables, moduladores ópticos y detectores de infrarrojos ultra-rápidos.

El presente estudio está dedicado a la modelación de una impureza donadora poco profunda confinada en un anillo cuántico que está sometido a los efectos combinados de un campo eléctrico estacionario y a una radiación ILF no resonante polarizada en el plano del anillo. El campo eléctrico estacionario y la polarización de la radiación son paralelos. Los cálculos se hacen usando las aproximaciones de masa efectiva y bandas parabólicas. En el proceso de

obtener las funciones de onda y energías se hace uso de un esquema de desarrollo de la función de onda en una base de funciones sinusoidales asociadas a un electrón confinado en una región cuadrada de ancho suficientemente grande y que está restringida por un potencial de confinamiento infinito.

El artículo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se describe el marco teórico. La sección 3 presenta los resultados y discusión de los mismos. Por último, las conclusiones se resumen en la Sección 4.

Marco teórico

El sistema bajo estudio consiste de un electrón confinado en un anillo cuántico de GaAs de radios $R_1 < R_2$, rodeado por una matriz de $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$, con el origen de coordenadas localizado en el centro del anillo. Se implanta una impureza donadora en las coordenadas (x_0, y_0) y se aplica un campo eléctrico en dirección negativa del eje x . El Hamiltoniano para dicho sistema, en coordenadas cartesianas, está dado por:

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + V(x, y) - \frac{e^2}{\epsilon_r r} + e F x, \quad (1)$$

donde m^* y e son la masa efectiva y la carga del electrón, respectivamente, $V(x, y)$ es el potencial de confinamiento asociado al anillo cuántico, ϵ_r es la constante dieléctrica del GaAs, F es la magnitud del campo eléctrico aplicado y $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ es la distancia entre la impureza y electrón [el cual está localizado en el punto de coordenadas (x, y)]. En el presente modelo el potencial de confinamiento es cero en la región del anillo ($R_1 \leq r \leq R_2$) y $V(x, y) = V_0$ en las demás regiones.

Para introducir los efectos de láser se sigue el modelo de un electrón en un campo de radiación intensa [ver detalles en las Refs. (Duque, *et al.*, 2010; Kasapoglu, *et al.*, 2011)]. Esencialmente, el problema se aproxima a considerar la ecuación 1 con un potencial de confinamiento “vestido” por el efecto del láser. En ese caso se hace el cambio $V(x, y) \rightarrow \mathcal{V}(x, y, \alpha_0)$, donde (Radu, *et al.*, 2014)

$$\begin{aligned} \mathcal{V}(x, y, \alpha_0) = & \frac{V_0}{\pi} \text{Re} \left[\pi - \Theta(\alpha_0 - x - \text{Re}(z_1)) \cos^{-1} \left(\frac{\text{Re}(z_1) + x}{\alpha_0} \right) \right. \\ & + \Theta(\alpha_0 - x - \text{Re}(z_2)) \cos^{-1} \left(\frac{\text{Re}(z_2) + x}{\alpha_0} \right) \\ & - \Theta(\alpha_0 - x - \text{Re}(z_1)) \cos^{-1} \left(\frac{\text{Re}(z_1) + x}{\alpha_0} \right) \\ & \left. + \Theta(\alpha_0 - x - \text{Re}(z_2)) \cos^{-1} \left(\frac{\text{Re}(z_2) + x}{\alpha_0} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

En la ecuación (2), $z_1 = \sqrt{R_1^2 - y^2}$, $z_2 = \sqrt{R_2^2 - y^2}$. Además, $\Theta(w)$ es la función de paso unitario de Heaviside y $\text{Re}(Z)$ significa la parte real del número complejo Z . Aquí, la cantidad $\alpha_0 (= e A_0 / (c m^* \omega_d))$ es el parámetro asociado a la

radiación láser incidente (de frecuencia ω_d), c es la velocidad de la luz y A_0 es una constante, la cuál ha sido elegida con polarización lineal en dirección x .

Para hallar las autofunciones y autoenergías del operador de Hamilton en la ecuación (1), se puede proceder, por ejemplo, siguiendo un método de diagonalización donde se haga uso de un conjunto completo de funciones ortonormales mediante las cuales se pueda hacer un desarrollo de la función de onda del electrón confinado en la región de estudio y que está sometido a las diferentes perturbaciones que han sido consideradas sobre el sistema. Tal enfoque conduce a la construcción de una matriz hamiltoniana, a la cual se le buscan sus autovalores y autovectores, que no son otra cosa que las energías de los estados cuánticos posibles y los conjuntos de coeficientes del desarrollo para cada estado, respectivamente. En el presente estudio se ha usado como base un conjunto de funciones sinusoidales que son autofunciones del Hamiltoniano para un electrón confinado en una caja cuadrada de lados $L_x \times L_y$ con potencial de confinamiento infinito [ver detalles en Ref. (Xia & Fan, 1989)]. Una vez obtenidas las funciones de onda y las autoenergías se puede proceder a calcular por ejemplo las propiedades ópticas lineales y no lineales tales como absorción óptica y cambios en el índice de refracción.

Usando la técnica de matriz densidad y expresando la polarización eléctrica en una serie de potencias del campo eléctrico de la radiación incidente, se puede proceder a calcular la parte lineal y la corrección de tercer orden del coeficiente de absorción óptica. Respectivamente, ambas contribuciones están dadas por [ver detalles en la Ref. (Martínez-Orozco, *et al.*, 2012)]:

$$\alpha^1(\omega) = \omega \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \left[\frac{e^2 \sigma \hbar \Gamma_{if} |M_{if}|^2}{(E_{if}^\omega)^2 + (\hbar \Gamma_{if})^2} \right] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \alpha^3(\omega, I) = & -\omega \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \left(\frac{e^4 I}{2 n \epsilon_0 c} \right) \left\{ \frac{\sigma \hbar \Gamma_{if} |M_{if}|^2}{[(E_{if}^\omega)^2 + (\hbar \Gamma_{if})^2]^2} \right\} \\ & \times \left\{ 4 |M_{if}|^2 \right. \\ & \left. - \frac{|M_{ff} - M_{ii}|^2 [3 E_{if}^2 - 4 E_{if} \hbar \omega + \hbar^2 (\omega^2 - \Gamma_{if})]}{E_{if}^2 + (\hbar \Gamma_{if})^2} \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

Pueden calcularse también los coeficientes lineal y no lineal (de tercer orden) del cambio en el índice de refracción, que resultan estar dados por

$$\frac{\Delta n^1(\omega)}{n} = \left(\frac{e^2 \sigma |M_{if}|^2}{2 n^2 \epsilon_0} \right) \left[\frac{E_{if}^\omega}{(E_{if}^\omega)^2 + (\hbar \Gamma_{if})^2} \right]; \quad (5)$$

$$\frac{\Delta n^3(\omega)}{n} = - \left(\frac{e^4 \sigma |M_{if}|^2}{4 n^3 \epsilon_0} \right) \left\{ \frac{c I \mu_0}{[(E_{if}^\omega)^2 + (\hbar \Gamma_{if})^2]^2} \right\} \times \left\{ 4 E_{if}^\omega |M_{if}|^2 - \frac{|M_{ff} - M_{ii}|^2}{E_{if}^2 + (\hbar \Gamma_{if})^2} \right. \quad (6)$$

$$\times \{ E_{if}^\omega [E_{if} E_{if}^\omega - (\hbar \Gamma_{if})^2] - (\hbar \Gamma_{if})^2 (E_{if} + E_{if}^\omega) \}$$

donde $E_{if}^\omega = E_{if} - \hbar \omega$, $E_{if} = E_f - E_i$ es la energía de transición inter-subbanda y $\hbar \omega$ es la energía del fotón, de frecuencia ω , que genera la transición entre niveles. Por otra parte, $M_{if} = \langle \Psi_f | x | \Psi_i \rangle$ es proporcional al momento de dipolo eléctrico de la transición entre los estados Ψ_f y Ψ_i , en tanto que Γ_{if} es proporcional a la tasa de relajación entre los estados final e inicial. Adicionalmente, σ es la densidad tridimensional de electrones, $n = \sqrt{\epsilon_r}$ es el índice de refracción del material (GaAs en este estudio), μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío, ϵ_0 es la susceptibilidad del vacío, I es la intensidad de la radiación incidente que se usa para generar la transición intersubbandas, y c es la velocidad de la luz en el vacío. Una vez obtenidos los términos de primer y tercer orden la absorción total es el resultado de hacer la suma de dichas contribuciones. Igual procedimiento se sigue para calcular los cambios totales al índice de refracción.

Resultados y discusión

A continuación se procede a presentar los resultados obtenidos en el presente estudio. Los parámetros usados en el cálculo son: $m^* = 0.0665 m_0$ (donde m_0 es la masa del electrón libre), $L_x = L_y = 70 \text{ nm}$, $V_0 = 228 \text{ meV}$, (que corresponde a una concentración de aluminio de $x = 0.3$ en las regiones de la barrera), $\epsilon_r = 12.58$, $\sigma = 3.8 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$, $\Gamma_{if} = 5 \text{ THz}$, $I = 0.2 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$.

En la figura 1 se presenta la función de onda para los tres primeros estados de un electrón confinado en un anillo cuántico de GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As. De izquierda a derecha las columnas corresponden, respectivamente, al estado fundamental, primer y segundo estados excitados. En la primera fila el sistema corresponde a un electrón confinado en el anillo sin efectos de impureza y con $\alpha_0 = 0$. En las tres filas restantes la impureza está localizada en el punto de coordenadas $(\frac{R_1 + R_2}{2}, 0)$ y tres valores del parámetro de laser han sido considerados ($\alpha_0 = 0,5 \text{ nm}, 10 \text{ nm}$). En los gráficos de la primera fila se puede observar, por ejemplo, la simetría azimutal característica de los estados 1s. Adicionalmente, notamos que para dicho estado la densidad de probabilidad decrece en la medida que nos aproximamos hacia las regiones externas del anillo (tanto para $\rho < R_1$ como para $\rho < R_2$). Esta situación se debe fundamentalmente a que, para el estado fundamental, la barrera de potencial se comporta

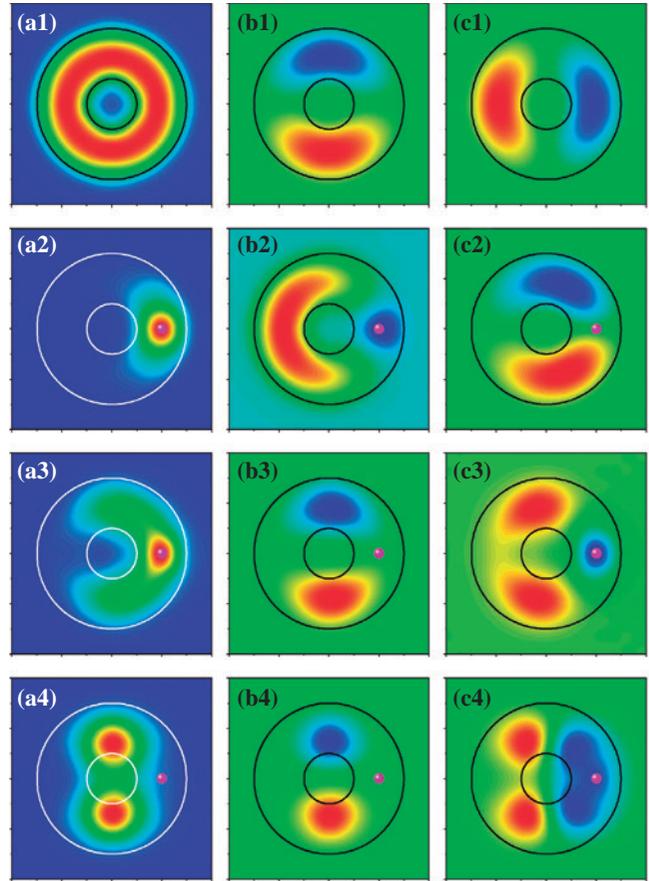


Figura 1. Función de onda para los tres primeros estados de un electrón confinado en un anillo cuántico de GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As con $R_1 = 5 \text{ nm}$, $R_2 = 25 \text{ nm}$ y $\alpha_0 = 5 \text{ nm}$. De izquierda a derecha las columnas corresponden, respectivamente, al estado fundamental, primer y segundo estados excitados. En la primera fila el sistema corresponde a un electrón confinado en el anillo sin efectos de impureza y con $F = 0$. En las tres filas restantes la impureza está localizada en el punto de coordenadas $(\frac{R_1 + R_2}{2}, 0)$ (ver el círculo violeta en las tres filas inferiores) y tres valores del parámetro de laser han sido considerados. Así, desde arriba hacia abajo las filas corresponden a tres valores del parámetro de laser ($\alpha_0 = 0,5 \text{ nm}, 10 \text{ nm}$).

esencialmente como una barrera de altura infinita. En el caso de los primeros dos estados excitados, se observa el comportamiento característico tipo $2\rho_x, 2\rho_y$. Es decir, estados que son idénticamente nulos en el origen y con lóbulos marcados en direcciones de los ejes de coordenadas x y y . La suma de las dos densidades de probabilidad asociadas a estos dos estados excitados corresponde nuevamente a una situación de simetría azimutal donde la densidad de probabilidad resultante es idénticamente igual a cero en el origen. Aquí es importante resaltar que los dos estados excitados son degenerados para la energía ($E_1 = E_2$).

Al considerar los efectos de una impureza (filas 2, 3 y 4), claramente se observa un rompimiento de la simetría azimutal. En el caso donde $\alpha_0 = 0$, el estado fundamental

es esencialmente de simetría esférica alrededor de la impureza con pequeñas deformaciones debida a las barreras de potencial en el anillo. Asimismo, los estados excitados conservan la forma característica de estados $2p$ con rompimientos de simetría debido a la presencia no simétrica de la impureza. Al incluir los efectos del campo de láser intenso, $\alpha_0 = 5 \text{ nm}$, aparece una deslocalización del estado fundamental, con la función de onda extendida sobre el eje y , llegando a presentar dos antinodos bien definidos. De igual manera, se manifiesta un estado $2p_y$ muy bien definido dada la presencia de una barrera central que se induce por efectos de láser. En cambio, en el caso del estado $2p_x$, se observa una deslocalización de la función de onda debido a los dos pozos de potencial que se inducen a lo largo de la dirección x .

Claramente, la degeneración de la energía de los dos primeros estados excitados se rompe producto del cambio en la simetría inducido tanto por la presencia de la impureza como por el efecto del campo de láser, como puede apreciarse en las filas 3 y 4 de la Fig. 1.

Por otra parte, en la figura 2 se presentan los resultados para la energía de los primeros estados de un electrón en un anillo cuántico de GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As en función de α_0 con y sin efectos de impureza y considerando dos posiciones diferentes de la misma. En general se observa que en ausencia de impureza y sin efectos de láser aparecen las degeneraciones propias de sistemas que tienen simetría azimutal [Fig. 2(a)] y que todos los estados aquí reportados tienen una energía creciente en función de α_0 .

Hay dos razones que explican tal clase de comportamiento: 1) para valores pequeños de α_0 se produce una reducción a lo largo de la dirección x del diámetro de los círculos que forman el anillo, generando con ello un mayor confinamiento de los portadores y por tanto un incremento de la energía; y 2) para valores altos de α_0 aparece un desplazamiento hacia el azul del nivel de referencia de la energía (el fondo del pozo de potencial), lo que a su vez implica un crecimiento en la energía de los portadores. En aquellas situaciones donde hay impureza y debido a que esta se encuentra ubicada en puntos de no simetría, se observa que en ausencia de efectos de láser incluso se pierde la degeneración de los estados. En presencia de impureza se observa un corrimiento al rojo de todos los estados, siendo el efecto más pronunciado sobre el estado fundamental, lo cual se asocia al carácter atractivo de la impureza que, dependiendo de las dimensiones de la estructura, puede tender a solapar los efectos del confinamiento geométrico.

El efecto de la aplicación de un campo eléctrico estacionario sobre las funciones de onda de los tres primeros estados de un electrón confinado en un anillo cuántico de GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As con $R_1 = 5 \text{ nm}$, $R_2 = 25 \text{ nm}$ y $\alpha_0 = 5 \text{ nm}$, aparece representado en la figura 3. En este caso, las filas corresponden a diferentes configuraciones del campo eléctrico aplicado; sin la inclusión de átomo de impureza (primera fila), y con los efectos de una impureza localizada a lo largo del eje x . Dado que en este caso desde el principio se está considerando un campo de láser diferente de cero, está claro que el sistema de entrada no preserva la simetría

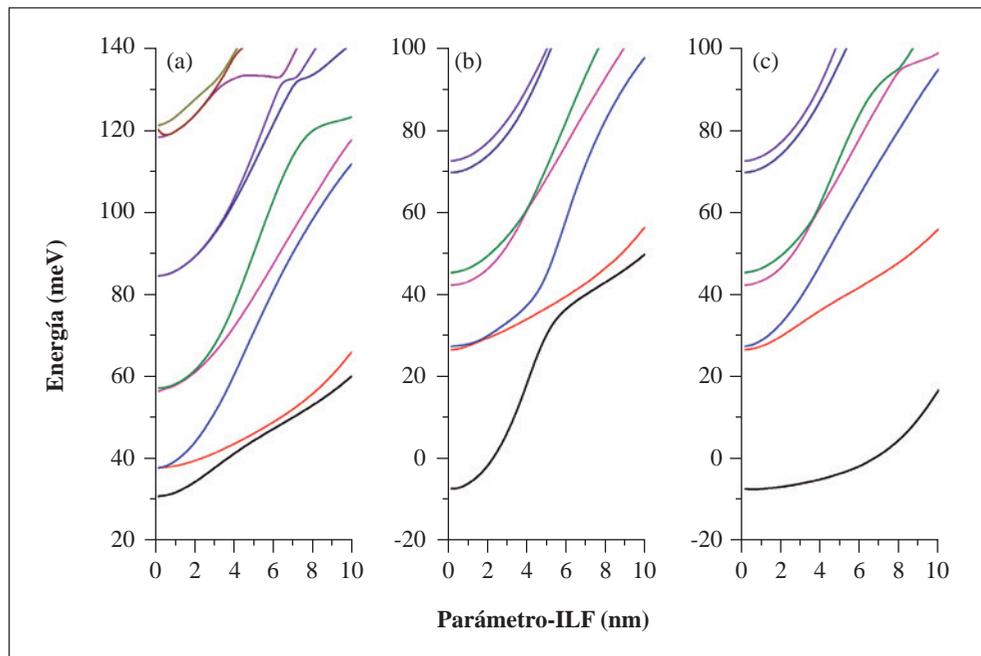


Figura 2. Energía de los primeros estados de un electrón en un anillo cuántico de GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As en función de α_0 . Los resultados son para $R_1 = 5 \text{ nm}$, $R_2 = 15 \text{ nm}$ y $F = 0$. En (a) no se consideran efectos de impureza mientras que en (b) y (c) la impureza está localizada, respectivamente, en las coordenadas $(\frac{R_1 + R_2}{2}, 0)$ y $(0, \frac{R_1 + R_2}{2})$.

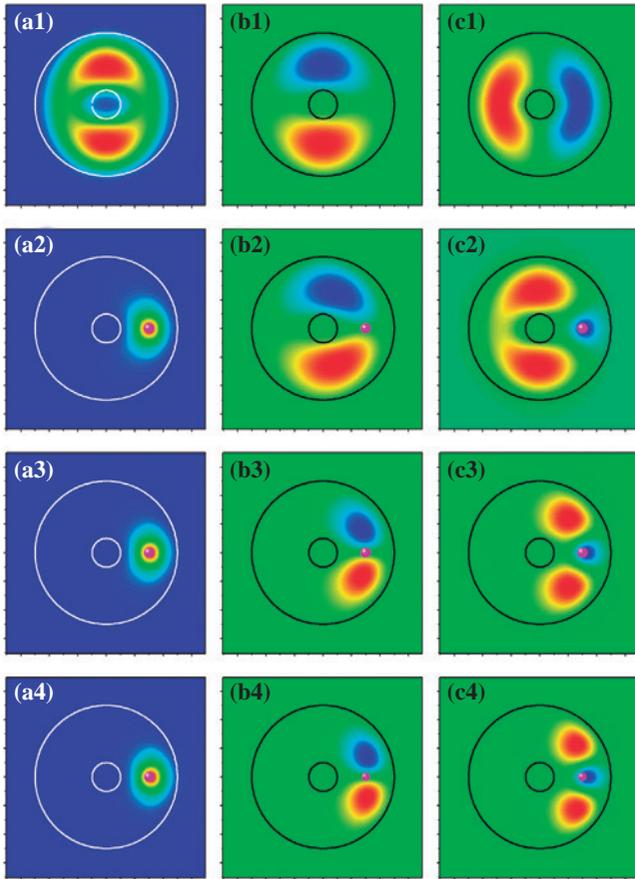


Figura 3. Función de onda para los tres primeros estados de un electrón confinado en un anillo cuántico de GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As con $R_1 = 5 \text{ nm}$, $R_2 = 25 \text{ nm}$ y $\alpha_0 = 5 \text{ nm}$. De izquierda a derecha las columnas corresponden, respectivamente, al estado fundamental, primer y segundo estados excitados. En la primera fila el sistema corresponde a un electrón confinado en el anillo sin efectos de impureza y con $F = 0$. En las tres filas restantes la impureza está localizada en el punto de coordenadas $(\frac{R_1+R_2}{2}, 0)$ (ver el punto violeta en las tres filas inferiores) y tres valores del campo eléctrico han sido considerados. De arriba hacia abajo ellos son: ($F = 0, 0.20 \text{ kV/cm}, 40 \text{ kV/cm}$).

azimutal, tal como puede apreciarse en las funciones de onda del problema sin impureza (ver primera fila de la figura 3). El potencial de confinamiento corresponde a un disco que se desplaza a lo largo del eje x , teniendo una barrera central que disminuye de ancho a medida que el potencial aumenta. Este tipo de potencial, que no es abrupto, genera un mayor confinamiento sobre los estados de más baja energía y permite una mayor deslocalización de los estados de más alta energía. Al considerar los efectos de impureza -segunda fila de la figura 3-, se observa que el estado fundamental aparece fuertemente localizado alrededor de la impureza, con un carácter bastante simétrico dadas las grandes dimensiones de la sección transversal del anillo. En los paneles b2 y c2 se puede notar que la impureza desplaza hacia ella la nube electrónica, pero mostrando aún las funciones de onda

el carácter $2p$ de las mismas. Dado que en este caso el campo eléctrico se aplica en dirección negativa del eje x , se entiende claramente por qué en las filas 3 y 4 las funciones de onda se desplazan hacia la posición de la impureza. Esto, más adelante, explicará la forma creciente que muestra la energía de enlace a medida que crece el campo eléctrico, particularmente en el caso de la impureza a lo largo del eje x .

La dependencia de la energía de los primeros estados electrónicos en un anillo cuántico de GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As, en función del campo eléctrico aplicado con y sin los efectos de potencial de impureza se representa en la figura 4. Debido a que el origen de coordenadas se toma en el centro del anillo, y dado que el potencial de confinamiento es simétrico con respecto al mismo puede entenderse por qué, a medida que se aplique el campo eléctrico se presente un corrimiento al rojo del mínimo de las energías en el problema. Teniendo esto en mente, se encuentra la razón por la cual como regla casi general la energía de todos los estados disminuye a medida que crece el campo eléctrico, tal como se muestra en todos los paneles de la figura 4. Nuevamente, como en el caso ya discutido de la figura 2, el potencial de la impureza aumenta el confinamiento de los portadores dando como resultado un corrimiento hacia el rojo de las curvas de energía. Este fenómeno puede ser apreciado al comparar las figuras 4(b) y 4(c) con la figura 4(a). En la figura 4 se aprecian algunos anti-cruces; bien conocidos en la literatura en problemas de campo eléctrico. Tales anti-cruces se entienden como intercambios en la simetría de las funciones de onda de los estados involucrados.

Por otra parte, en la figura 5, se reportan los resultados para los valores esperados de x (debe recordarse que la polarización de la radiación que excita el sistema se ha elegido de forma tal que está escogida en esa dirección) entre diferentes estados inicial y final [$M_{fi} = \langle \Psi_f | x | \Psi_i \rangle$] en función del campo eléctrico aplicado (a) y de α_0 (b) para un electrón en un anillo cuántico de GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As con una impureza donadora localizada en $(\frac{R_1+R_2}{2}, 0)$. Además, en las gráficas 5(c) y 5(d) se presentan, como funciones del campo eléctrico y de α_0 , respectivamente, las energías del estado fundamental, de los dos primeros estados excitados, así como la energía de transición entre el estado fundamental y cada uno de los dos primeros estados excitados. En 5(a), como comportamiento general, se observa que los diferentes elementos de matriz son funciones crecientes del campo eléctrico (excepto M_{02} cuya magnitud es una función decreciente, solo para valores pequeños del campo eléctrico). Esto está en perfecto acuerdo con el incremento del solapamiento de funciones de onda y la fuerte localización de los estados electrónicos alrededor de la posición de la impureza. Otro aspecto a destacar es que, para todo el rango de campo eléctrico considerado, el elemento de matriz M_{01} es idénticamente nulo. Esto se debe a la simetría impar que tiene el primer estado excitado con respecto a la reflexión sobre el eje x .

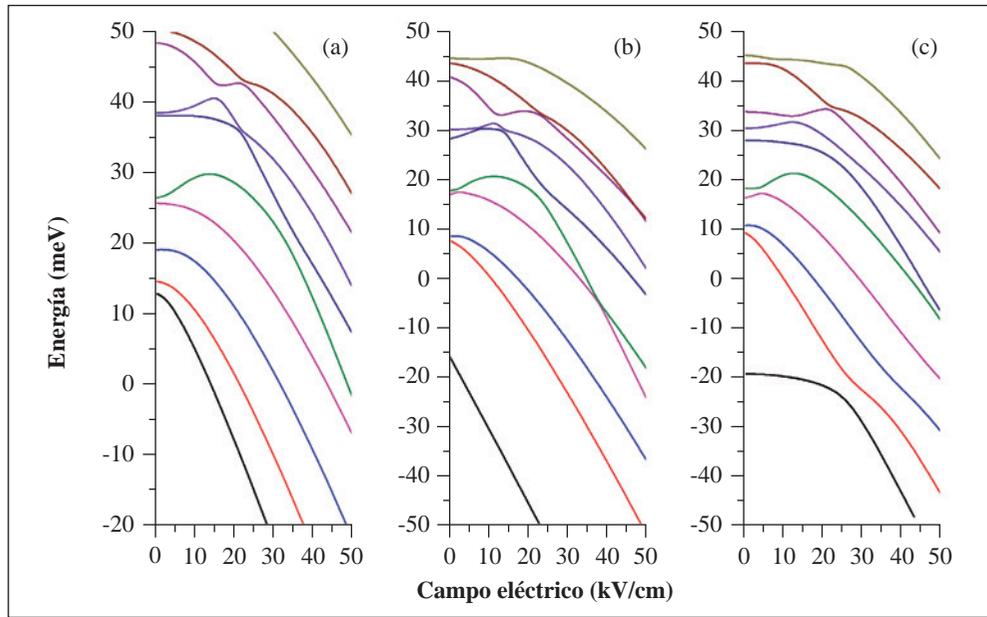


Figura 4. Energía de los primeros estados de un electrón en un anillo cuántico de GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As en función del campo eléctrico aplicado. Los resultados son para $R_1 = 5 \text{ nm}$, $R_2 = 25 \text{ nm}$ y $\alpha_0 = 5 \text{ nm}$. En (a) no se consideran efectos de impureza mientras que en (b) y (c) la impureza está localizada, respectivamente, en las coordenadas $(\frac{R_1+R_2}{2}, 0)$ y $(0, \frac{R_1+R_2}{2})$.

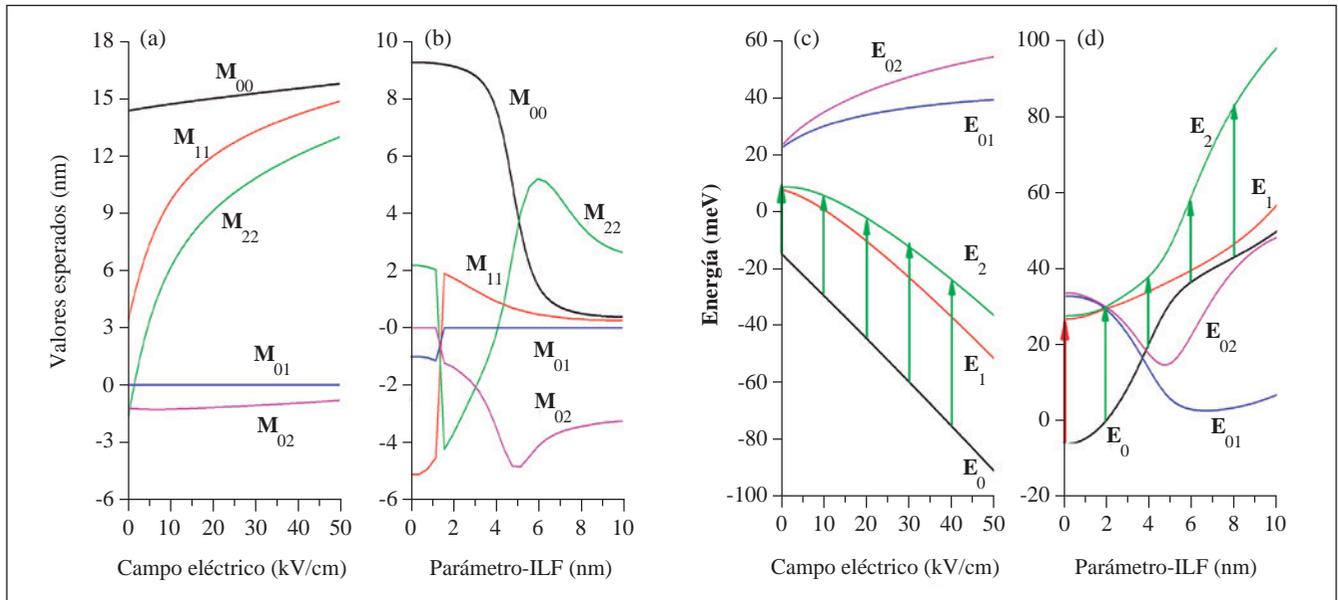


Figura 5. Valores esperados de x entre diferentes estados inicial y final [$M_{fi} = \langle \Psi_f | x | \Psi_i \rangle$] en función del campo eléctrico aplicado (a) y de α_0 (b) para un electrón en un anillo cuántico de GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As con una impureza donadora localizada en $(\frac{R_1+R_2}{2}, 0)$. En (c) y (d) se presentan en función del campo eléctrico y de α_0 , respectivamente, las energías del estado fundamental, de los dos primeros excitados y la energía de transición entre el fundamental y cada uno de los dos primeros excitados. En (a) y (c) los resultados son para $R_1 = 5 \text{ nm}$, $R_2 = 25 \text{ nm}$ y $\alpha_0 = 5 \text{ nm}$, y , mientras que en (b) y (d) los resultados son para $R_1 = 5 \text{ nm}$, $R_2 = 15 \text{ nm}$ y $F = 0$. Las flechas verticales en (c) y (d) corresponden a valores escogidos para el cálculo de propiedades ópticas que son reportadas posteriormente.

Si pasamos a analizar los elementos de matriz en función de α_0 , se observan comportamientos mucho más complejos dado los cambios de simetría que sufren las funciones

de onda en aquellos puntos donde hay anti-cruces (ver columnas 2 y 3 en la figura 1). Para valores de α_0 menores que 1.6 nm , es claro que las transiciones se dan desde el estado

fundamental hacia el primer estado excitado, mientras que para valores mayores, las transiciones son hacia el segundo estado excitado. De los resultados mostrados en las figuras 5(c) y 5(d), se concluye que los picos resonantes o ceros en las estructuras ópticas mostrarán siempre un corrimiento al azul para valores crecientes del campo eléctrico (ver en la figura 5(c) la forma en que crecen las flechas que indican las transiciones para diferentes valores del campo eléctrico). En el caso de la variación asociada al incremento de α_0 , se observa que para valores bajos de dicho parámetro la energía de transición inter-subbanda es decreciente, indicando un corrimiento al rojo en las estructuras de las propiedades ópticas, mientras que para α_0 mayor que 4 nm, aparece un corrimiento al azul. La combinación de los resultados en las figuras 5(a) y 5(c) o entre 5(b) y 5(d), explicará la

magnitud de los picos resonantes en la absorción óptica y de los máximos y mínimos en el índice de refracción, como se verá a continuación.

En la figura 6 hemos representado los resultados del cálculo de los coeficientes de cambio relativo del índice de refracción y de absorción óptica en un anillo cuántico de GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As en función de la energía del fotón incidente; considerando diferentes valores del campo eléctrico 6(a,c) y de α_0 6(b,d). Los datos de entrada y las dimensiones de las estructuras son los mismos que se emplearon para obtener la figura 5. Como ya se había predicho en el análisis de dicha figura, aquí se observa un corrimiento constante hacia el azul en ambas propiedades ópticas cuando se incorporan valores crecientes de la intensidad del campo eléctrico estacionario.

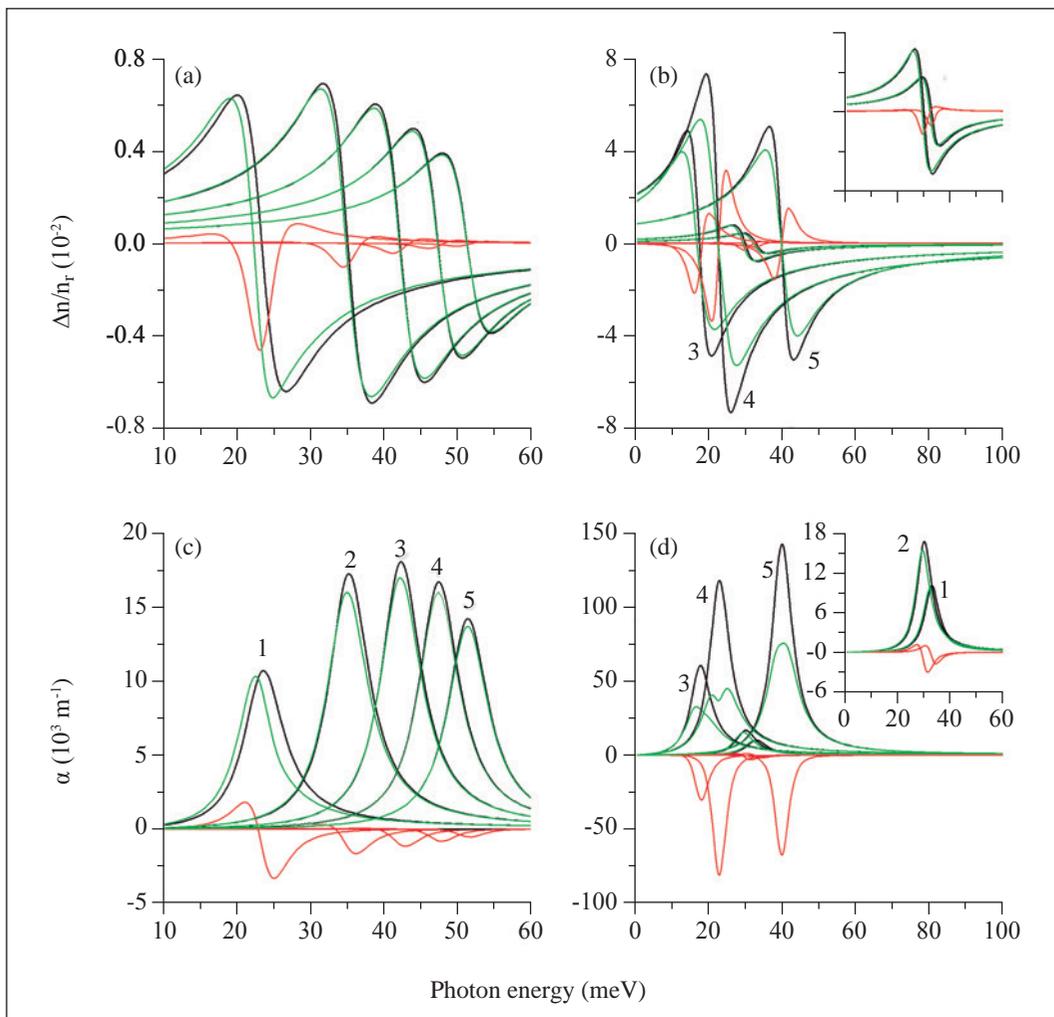


Figura 6. Cambios en el índice de refracción (a,b) y absorción óptica (c,d) en función de la energía de fotón incidente para transiciones intersubbandas para un electrón confinado en un anillo cuántico de GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As con una impureza donadora localizada en $(\frac{R_1 + R_2}{2}, 0)$. En (a,c) se presentan resultados para cinco valores del campo eléctrico aplicado ($F = 0, 10, 20, 30, 40 \text{ kV/cm}$) con $R_1 = 5 \text{ nm}$, $R_2 = 25 \text{ nm}$ y $\alpha_0 = 5 \text{ nm}$. En (b,d) se presentan resultados para cinco valores del parámetro de laser ($\alpha_0 = 0, 2, 4, 6, 8 \text{ nm}$) con $R_1 = 5 \text{ nm}$, $R_2 = 15 \text{ nm}$ y $F = 0$. Las líneas negras, rojas y verdes corresponden, respectivamente, al término de primer orden, el de tercer orden y el valor total bien sea para cambios en índice de refracción como absorción óptica.

En otro orden de cosas, al observar las líneas 1, 2 y 3 en 6(b) y 6(d) se detecta un corrimiento al rojo en los espectros mientras que de la comparación de las líneas 3, 4 y 5 se concluye la existencia de un corrimiento hacia el azul; tal como se había predicho de la figura 5(d). En cuanto a las figuras 6(a,c) se observa que la magnitud del pico resonante en la absorción y de los máximos y mínimos en los cambios de índice de refracción está gobernada fundamentalmente por el comportamiento de la magnitud del elemento M_{02} . Éste, a campos bajos es una función creciente de la intensidad, y luego se convierte en una función decreciente de F .

En la figura 6(d) se observa que para valores altos de α_0 , el factor dominante en la amplitud de la respuesta óptica de absorción es la magnitud de la energía de transición inter-subbanda mientras que a valores bajos de α_0 es dominante el factor M_{01} . En el caso de cambios en el índice de refracción, figura la 6(b), en el régimen de valores bajos de α_0 la magnitud de los máximos y mínimos está gobernada por el factor M_{01} mientras que en el caso de valores altos de esta cantidad, tal amplitud está gobernada por M_{02} .

Conclusiones

En este trabajo se ha hecho un estudio teórico de las propiedades ópticas y de impurezas para un electrón confinado en un anillo cuántico de GaAs-(Ga,Al)As sometido a los efectos combinados de campo eléctrico estacionario y radiación de alta intensidad no resonante. Los cálculos se han hecho en la aproximación de masa efectiva haciendo uso de una diagonalización en la cual se ha considerado un conjunto completo de funciones sinusoidales para obtener las auto-funciones y auto-energías del problema. Con las auto-funciones y auto-energías se ha procedido a estudiar la absorción óptica lineal y no lineal y los cambios en el índice de refracción. Los resultados obtenidos sugieren un corrimiento al rojo de las propiedades ópticas en función del campo eléctrico mientras que en el láser no resonante puede inducir efectos combinados de corrimientos al rojo y al azul. De los resultados aquí discutidos se concluye que no es posible hacer predicciones acerca del comportamiento de las propiedades ópticas lineales y no lineales en anillos cuánticos que están sometidos a efectos simultáneos de radiación láser intensa y no resonante, campos eléctricos estacionarios y centros de impurezas. Siempre será necesario recurrir a los cálculos numéricos de las heteroestructuras para así entrar a conocer las diferentes dependencias de la óptica de éstos sistemas, que pueden, en general, resumirse en la ocurrencia de corrimientos hacia más bajas o más altas energías de los picos resonantes –o de los máximos y mínimos– de los coeficientes ópticos estudiados, así como en la variación de las amplitudes de tales respuestas ópticas ante la influencia de los factores externos considerados.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las agencias colombianas: CODI-Universidad de Antioquia (Estrategia de Sostenibilidad 2014-2015 de la Universidad de Antioquia; proyecto “*On the way to development of new concept of nanostructure-based THz laser*”; proyecto “*Propiedades ópticas de impurezas, excitones y moléculas en puntos cuánticos autoensamblados*”), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales-Universidad de Antioquia (CAD y ALM-proyecto de dedicación exclusiva 2014-2015), El Patrimonio Autónomo Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, Francisco José de Caldas.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Referencias

- Aharonov Y., Bohm D., 1959. Significance of Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory. *Physical Review* **115**: 485-491.
- Aichinger M., Chin S. A., Krotscheck E., Räsänen E. 2006. Effects of geometry and impurities on quantum rings in magnetic fields. *Phys. Rev. B* **73**: 195310-195310-8
- Asmar N. G., Markelz A. G., Gwinn E. G., Cerne J., Sherwin M. S., Campman K. L., Hopkins P. F., Gossard A. C. 1995. *Phys. Rev. B* **51**: 18041-18044.
- Assaid E., Aydi M., Feddi E., and Dujardin F. 2008. Exact analytical solutions for shallow impurity states in symmetrical paraboloidal and hemiparaboloidal quantum dots. *Cent. Eur. J. Phys.* **6**: 97-104.
- Barseghyan M. G., Restrepo R. L., Mora-Ramos M. E., Kirakosyan A. A., and Duque C. A. 2012. Donor impurity-related linear and nonlinear intraband optical absorption coefficients in quantum ring: effects of applied electric field and hydrostatic pressure. *Nanoscale Research Letters* **7**: 538.
- Bayer M., Hawrylak P., Hinzer K., Fafard S., Korkusinski M., Wasilewski Z. R., Stern O., Forchel A. 2001. Coupling and Entangling of Quantum States in Quantum Dot Molecules. *Science* **291**: 451-453.
- Bruno-Alfonso A., Latgé A. 2000. Semiconductor quantum rings: Shallow-donor levels. *Phys. Rev. B* **61**: 15887-15894.
- Culchac F. J., Porrás-Montenegro N., Latgé A. 2008. GaAs-(Ga,Al)As double quantum rings: confinement and magnetic field effects. *J. Phys.: Condens. Matter* **20**: 285215-1-285215-6.
- Duque C. A., Kasapoglu E., Sakiroglu S., Sari H., and Sökmen I. 2010. Intense laser effects on donor impurity in a cylindrical single and vertically coupled quantum dots under combined effects of hydrostatic pressure and applied electric field. *Applied Surface Science* **256**: 7406-7413.
- Duque C. A., Mora-Ramos M. E., Kasapoglu E., Sari H., Sökmen I. 2011. Intense laser field effect on impurity states in a semiconductor quantum well: transition from the single to double quantum well potential. *Eur. Phys. J. B* **81**: 441-449.

- Filikhin I., Suslov V. M., Vlahovic B.** 2006. Electron spectral properties of the InAs/GaAs quantum ring *Physica E* **33**: 349-354.
- Fulla M. R., Marín J. H., Gutiérrez W., Duque C. A., and Mora-Ramos M. E.** 2014. D_2^+ molecular complex in ring-like nanostructures: hydrostatic pressure and electro-magnetic field effects. *Acta Physica Polonica* **125**: 241-244.
- Garcia J. M., Medeiros-Ribeiro G., Schmidt K., Ngo T., Feng J. L., Lorke A., Kotthaus J., Petroff P. M.** 1997. Intermixing and shape changes during the formation of InAs self-assembled quantum dots. *Applied Physics Letters* **71**: 2014-2016.
- Harutyunyan V. A.** 2009. Semiconductor nanocylindrical heterolayer in a radial electrostatic field: electronic spectrum and optical properties. *Applied Surface Science* **256**: 455 - 459.
- Harutyunyan V. A.** 2011. Semiconductor nanotube in strong electrostatic field. *Journal of Applied Physics* **109**: 014325-1-014325-8.
- Kasapoglu E., Duque C. A., Sari H., Sokmen I.** 2011. Intense laser field effects on the linear and nonlinear intersubband optical properties of a semi-parabolic quantum well. *European Physical Journal B* **82**: 13-17.
- Kleemans N. A. J. M., Blokland J. H., Taboada A. G., van Genuchten H. C. M., Bozkurt M., Fomin V. M., Gladilin V. N., Granados D., Garcia J. M., Christianen P. C. M., Maan J. C., Devreese J. T., Koenraad P. M.** 2009. Excitonic behavior in self-assembled InAs/GaAs quantum rings in high magnetic fields. *Phys. Rev.* **B 80**: 155318-155318-4.
- Lorke A., Luyken R. J., Govorov A. O., Kotthaus J. P., Garcia J. M., Petroff P.M.** 2000. Spectroscopy of Nanoscopic Semiconductor Rings. *Physical Review Letters* **84**: 2223-2226.
- Martínez-Orozco J. C., Mora-Ramos M. E., and Duque C. A.** 2012. The nonlinear optical absorption and corrections to the refractive index in a GaAs n-type delta-doped field effect transistor under hydrostatic pressure. *Physica Status Solidi (b)* **249**: 146-152.
- Monozon B. S., Schmelcher P.** 2003. Impurity center in a semiconductor quantum ring in the presence of crossed magnetic and electric fields. *Phys. Rev.* **B67**: 045203-045203-14
- Mora-Ramos M. E., Duque C. A., Kasapoglu E., Sari H., Sokmen I.** 2013. Electron-related nonlinearities in GaAs–Ga $_{1-x}$ Al $_x$ As double quantum wells under the effects of intense laser field and applied electric field. *J. Lumin.* **135**: 301-311.
- Peyghambarian N., Koch S. W., Lindberg M., Fluegel B., Joffe M.** 1989. Dynamic Stark effect of exciton and continuum states in CdS. *Phys. Rev. Lett.* **62**: 1185-1188.
- Radu A., Kirakosyan A. A., Laroze D., Baghramyan H. M., and Barseghyan M. G.** 2014. Electronic and intraband optical properties of single quantum rings under intense laser field radiation. *Journal of Applied Physics* **116**: 093101.
- Xia J-B. and Fan W-J.** 1989. Electronic structures of superlattices under in-plane magnetic field. *Phys. Rev.* **B40**: 8508-8515.

Photoanodes modified with reduced graphene oxide to enhance photoelectrocatalytic performance of B-TiO₂ under visible light

Andrés Fabián Gualdrón-Reyes¹, Angel M. Meléndez^{2,*}, Martha Eugenia Niño-Gómez^{1,2},
Vicente Rodríguez-González³, María Isabel Carreño-Lizcano¹

¹Centro de Investigaciones en Catálisis (CICAT)

²Centro de Materiales y Nanociencias (CMN), Universidad Industrial de Santander, Piedecuesta, Santander, Colombia

³División de Materiales Avanzados, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosí, México

Abstract

The effect of reduced graphene oxide (rGO) content in boron-modified TiO₂ nanocrystalline films on their photocatalytic activity in phenol oxidation is investigated. Visible-light-active TiO₂ modified photoanodes were prepared by incorporating graphene sheets into the sol-gel reaction of B-TiO₂, followed by depositing the reaction products on 304 stainless steel plates by dip-coating technique. Thin films obtained by in situ sol-gel synthesis were characterized by FESEM, GIXRD and UV-vis diffuse reflectance spectroscopy. FESEM examination showed cracked films due to the tensile stress generated by solvent evaporation. GIXRD results showed that boron in the films inhibits the growth of crystallites. Comparing to unmodified TiO₂, B-TiO₂/rGO showed a red shift in the band gap. The potentiodynamic anodic polarization measurements showed that graphene incorporation improved the photogenerated electron transport within the film, hence increasing the photocurrent. These enhancements are explained on the basis of the ability of graphene in promoting the charge carrier separation by transferring the photogenerated electrons from the illuminated photoanode to the substrate. The film B-TiO₂/rGO obtained from the sol solution containing 0.03 wt/v% boron and 3 wt/v% graphene exhibited the highest photocurrent, which was 30 times larger compared with the photocurrent of TiO₂ film.

Key words: Composite thin films, modified TiO₂ photoelectrode, graphene, electron transport, photoelectrocatalytic oxidation.

Fotoánodos modificados con óxido de grafeno reducido para mejorar el rendimiento fotoelectrocatalítico de B-TiO₂ bajo luz visible

Resumen

Se investiga el efecto del contenido de óxido de grafeno reducido (rGO) en películas de TiO₂ modificadas con boro sobre su actividad fotocatalítica en la oxidación de fenol. Fotoánodos modificados de TiO₂ activos a la luz visible fueron preparados incorporando hojas de grafeno en la reacción sol-gel de B-TiO₂, seguido por el depósito de los productos de la reacción sobre láminas de acero inoxidable 304 por la técnica dip-coating. Las películas delgadas obtenidas por síntesis sol-gel *in-situ* fueron caracterizadas por FESEM, GIXRD y espectroscopia de reflectancia difusa UV-vis. La observación por FESEM mostró películas agrietadas debido al estrés mecánico generado por la evaporación del solvente. Los resultados de GIXRD mostraron que el boro en las películas inhibe el tamaño de los cristallitos. Comparando con el TiO₂, el dióxido de titanio modificado presentó un desplazamiento de la banda de energía prohibida hacia el rojo. Las mediciones de polarización anódica potenciodinámica mostraron que la incorporación de grafeno mejora el transporte de electrones fotogenerados dentro de las películas compuestas incrementando así la fotocorriente. Estas mejoras se explican en base a la habilidad del grafeno para facilitar la separación de portadores de carga, transfiriendo los electrones fotogenerados desde la película iluminada de B-TiO₂ hasta el sustrato. La película compuesta B-TiO₂/rGO obtenida a partir de la solución con 0.03 % p/v de boro y 3 % p/v de grafeno presentó la fotocorriente más alta, la cual fue 30 veces mayor comparada con la fotocorriente de la película de TiO₂.

Palabras clave: películas delgadas de materiales compuestos, fotoelectrodos modificados de TiO₂, grafeno, transporte electrónico, oxidación fotoelectrocatalítica.

Correspondencia:

Angel M. Meléndez, angelemet@gmail.com

Recibido: 30 de junio de 2015

Aceptado: 9 de septiembre de 2015

Introduction

In photoelectrocatalytic (PEC) and photovoltaic processes, titanium dioxide is widely used as photoanode material on conductive substrates (Berger, Monllor-Satoca, Jankulovska, Lana-Villarreal, Gómez, 2010). When TiO_2 is illuminated electron/hole (e^-/h^+) pairs are generated. Holes are accumulated in the semiconductor while the electrons are transported from TiO_2 /solution interface to substrate. Subsequently, electrons are transported through the external circuit of the cell toward the cathode, thereby generating a photocurrent (Gerischer, 1990). A main inconvenience with TiO_2 is that only is active under UV light irradiation, limiting its PEC performance. Modification of TiO_2 can extend the light absorption to the visible region allowing the utilization of the sunlight (Akpan, Hameed, 2010). Titanium dioxide films have been conventionally prepared from nanoparticles suspension, but these materials exhibit low adherence due to particle detachment (Krýsa, *et al.*, 2006; Castellano-Leal, Córdoba, Meléndez, 2012; Wang, Ao, Wang, Hou, Qian, 2012). Instead, films preparation from the TiO_2 sol solutions can enhance the homogeneity and adherence of the film on the substrate. Nevertheless, if the electrode material is a nanoparticulated film, then the tortuous path that the electrons must follow through the nanoparticles hinders the electron transport, due to the presence of a high surface states density in the grain boundaries, thereby decreasing the photocurrent (Villarreal, Mao, Wong, Gómez, 2010; Castellano-Leal, Córdoba, Meléndez, 2012). Therefore, improvement of the electron transport within the TiO_2 is essential to increase the efficiency of electron collection.

Many alternatives have been proposed to enhance electron transport, such as the preparation of TiO_2 nanotubes to address the electron path (Macak, *et al.*, 2007) and the use of composite metal oxides (e.g. core shell) with matched band gaps (Ramírez-Ortega, Meléndez, Acevedo-Peña, González, Arroyo, 2014). Recently, incorporation of graphene sheets in TiO_2 nanoparticles has shown an improvement in the electron transport, increasing its PEC activity (Bell, *et al.*, 2011; Wang, Li, Chen, Tao, 2012). The excellent electronic conductivity of graphene endowed by its π - π conjugation structure, small particle size, and high specific surface area, becomes a convenient material to modified TiO_2 nanoparticles increasing the electron transport (Bell, *et al.*, 2011, Wang, Ao, Wang, Hou, Qian, 2012). Herein, B- TiO_2 /rGO films deposited on 304 stainless steel plates were prepared by sol-gel method and deposited by dip-coating technique. rGO was incorporated in sol-gel TiO_2 thin films to enhance the electron transport. In addition, boron was added to the films to shift the TiO_2 photoresponse into the visible region. In order to prove whether the photocurrent response of TiO_2 can be enhanced under visible light illumination, phenol oxidation on B- TiO_2 /graphene composite electrode was performed.

Materials and methods

All reagents were analytical reagent grade. All the solutions were prepared from Milli-Q deionized water (18.2 M Ω).

Synthesis of graphene

The general procedure for producing graphene oxide by the Hummers method has been described elsewhere (Martínez-Orozco, Rosu, Lee, Rodríguez-González, 2013). Briefly, graphene oxide GO was obtained by oxidation of graphite powder. The graphene oxide was dispersed in deionized water, 0.5 wt%. The exfoliation of GO was achieved using an ultrasound bath during 30 min. For reduction of GO (Li, Muller, Gilje, Kanerand, Wallace, 2008), a homogeneous dispersion of 0.05 wt% GO in deionized water (5.0 mL) was mixed with 5.0 mL of water, 5.0 mL of 35 wt% hydrazine and 35.0 mL of 28 wt% ammonia solution. After being vigorously stirred for a few minutes, the mixture was put in a water bath at 98°C during 1 h. The excess of hydrazine in the resulting dispersions was removed by exhaustive washing with deionized water using a vacuum system with a nylon membrane (0.45 μm pore size).

Preparation of modified TiO_2 films

TiO_2 sols with different boron and rGO content were obtained by dispersing rGO sheets in B- TiO_2 sols. Dispersions of (1, 2, 3 and 4) wt/v% rGO in ethanol were obtained using an ultrasound. A mixture of titanium butoxide and acetylacetone was added (molar ratio 1.0:0.5) into each rGO suspension under vigorous stirring at room temperature during 1 h, and a stable sol was achieved. Boric acid was added in different weight ratios (0.1, 0.2, 0.3) wt/v%. Thus, corresponding weight ratio of added boron was (0.017, 0.028, 0.038) wt/v%.

304 stainless steel plates (20 mm x 40 mm x 2 mm) were polished successively using emery papers of 120, 240, 320 and 600 grade. Plates were cleaned using an ultrasonic bath with ethanol and acetone. TiO_2 films with different boron and rGO content were deposited by dip-coating at a rate of 60 mm/min, followed by dehydration at 100°C for 10 min. This procedure was repeated 3 times to obtain three-layer films. Films were calcined by heating to 400°C at a rate of 3 deg/min and held at this temperature for 90 min. In this way, TiO_2 films were doped from different weight ratios 0.02, 0.03 and 0.04wt/v% of boron, and containing different amounts 1, 2, 3 and 4 wt/v% of rGO.

Characterization of B- TiO_2 /graphene composite films

The morphology of the composite films was analyzed by field emission scanning electron microscopy FESEM using a JOEL Quanta 650 FEG equipped with an EDAX Apollo X energy dispersive X-ray spectroscopy. The crystallinity of the materials was investigated with grazing incidence X-ray diffraction GIXRD in a Bruker D8 Discover diffractometer with Da Vinci geometry operated at 40 kV and 30 mA,

using Cu K α radiation selected with Ni filter, in grazing incidence mode with a step of 0.015° and a counting time of 1.0 s per step. Diffuse reflectance spectra were recorded with a Shimadzu PC 2401 UV-vis spectrophotometer. A 304 stainless steel plate was used as a reference.

Photoelectrochemical measurements

Photoelectrochemical measurements of B-TiO₂/rGO composite films were performed in a three-electrode cell with a potentiostat AUTOLAB PGSTAT 302N and Nova 10.1 software. A graphite rod was used as counter electrode and an Ag/AgCl/KCl (3 mol/L) electrode in a Luggin capillary was used as reference electrode. Linear sweep voltammetry was recorded at a scan rate of 10 mVs⁻¹ and each measurement was done in duplicate. The measurements were performed illuminating the films in 1 mM phenol and 0.1 M HClO₄. All the solutions were bubbled with nitrogen during 20 min to remove the dissolved oxygen. The visible light source was a 150 W metal halide lamp (Philips, MHN-TD) with UV-block. Electrochemical impedance spectroscopy measurements were carried out at open circuit potential, using a signal amplitude of 10 mV in a frequency range of 30 kHz to 0.1 Hz. All the electrochemical experiments were performed at room temperature. After an evaluation of photoelectrochemical responses [Gualdrón, 2014], composite TiO₂ film prepared from 0.03 wt/v% B in the sol solution was the material with the best photoelectrochemical response, hence only are presented the results of this modification.

Results and discussion

Graphene characterization

Figure 1 show the characteristic XRD pattern of the as-prepared graphene oxide GO (which was produced by chemical oxidation of graphite) and the pattern after its reduction with hydrazine. The XRD profile of GO exhibits a strong peak at a Bragg angle of $2\theta = 10.86^\circ$, corresponding to the 002 reflection of stacked GO sheets. The peak located at 2θ of $\sim 26^\circ$ in Figure 1a correspond to 002 reflection of graphite (JCPDS 75-1621). This result may be due to incomplete oxidation of graphite in synthesis procedure (McAllister, 2007). The broadening and asymmetry of 101 reflection ($2\theta = 42.5^\circ$) indicates the presence of turbostratic disorder in layers stacking (turbostrate carbon) (Zaikovskii, *et. al.*, 2012). After the reduction treatment, the 002 reflection of GO disappears (Figure 1b), and the characteristic peaks of rGO appear at 25.94° , 23.85° and 21.25° . The interlayer distance calculated from these peaks corresponding to 4.2 Å, 3.7 Å and 3.4 Å, respectively. These results indicates that the interlayer space between the graphene sheets was decreased by removing intercalated water molecules, and the oxygen-containing groups, during the hydrazine reduction process.

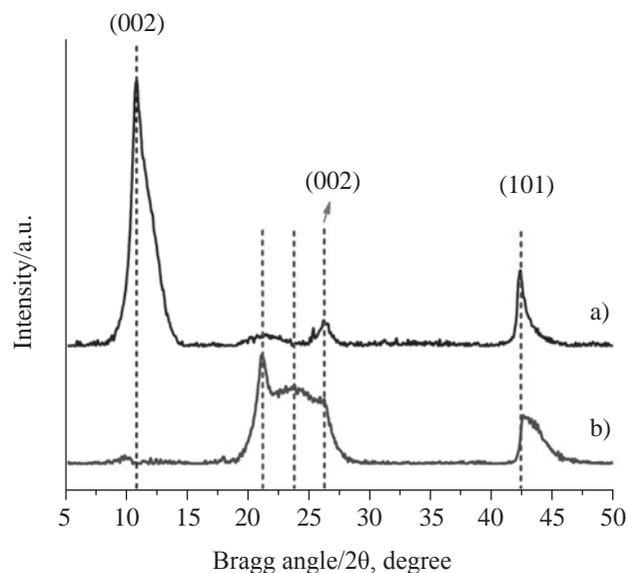


Figure 1. XRD profiles of (a) graphene oxide GO and (b) reduced graphene oxide rGO obtained after 1 h of hydrazine-reduction treatment of GO.

It is well known that titanium dioxide exhibit low conducting properties, which can restrain the photogenerated electron transport from the film to the substrate, hence decreasing the generated photocurrent. In order to increase the conductivity in the films, and promote the electron transport from the interface modified-TiO₂/electrolyte to the substrate, rGO was incorporated in the films.

Morphological, structural and optical properties

Figure 2 shows FESEM images of titanium dioxide films. The average thickness for TiO₂, B-TiO₂ and B-TiO₂/rGO (3 wt/v% rGO loading) films was approximately 288 nm, 159 nm and 168 nm, respectively. Boron doping promotes a high number of cracks than TiO₂ film. The cracked morphology can be associated to tensile stress generated by capillary pressure resulting from the solvent evaporation. Solvent evaporation rate is low as the thickness increases and hence the number of cracks diminishes (Jing, Zhao, Zhang, 2007). EDS mapping of B-TiO₂/rGO film (Figure 3) shows a homogeneous distribution of Ti, O, B, and C in the film. The limited number of points for Ti analysis in the cracks (dark zones) is due to a low amount of TiO₂ covering the stainless steel support, which is composed of Fe, Cr and Ni.

Figure 4 shows the GIXRD patterns of the different films. Only the characteristics reflections (101), (004), (200), (105) and (211) of anatase phase (JCPDS 211272) were observed. Diffraction peaks of modified films are wider and less intense than unmodified TiO₂ film. Assuming a spherical shape for the particles, the crystallite size (D) was calculated using the Scherrer equation (eq. 1)

$$D = \frac{0.89\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

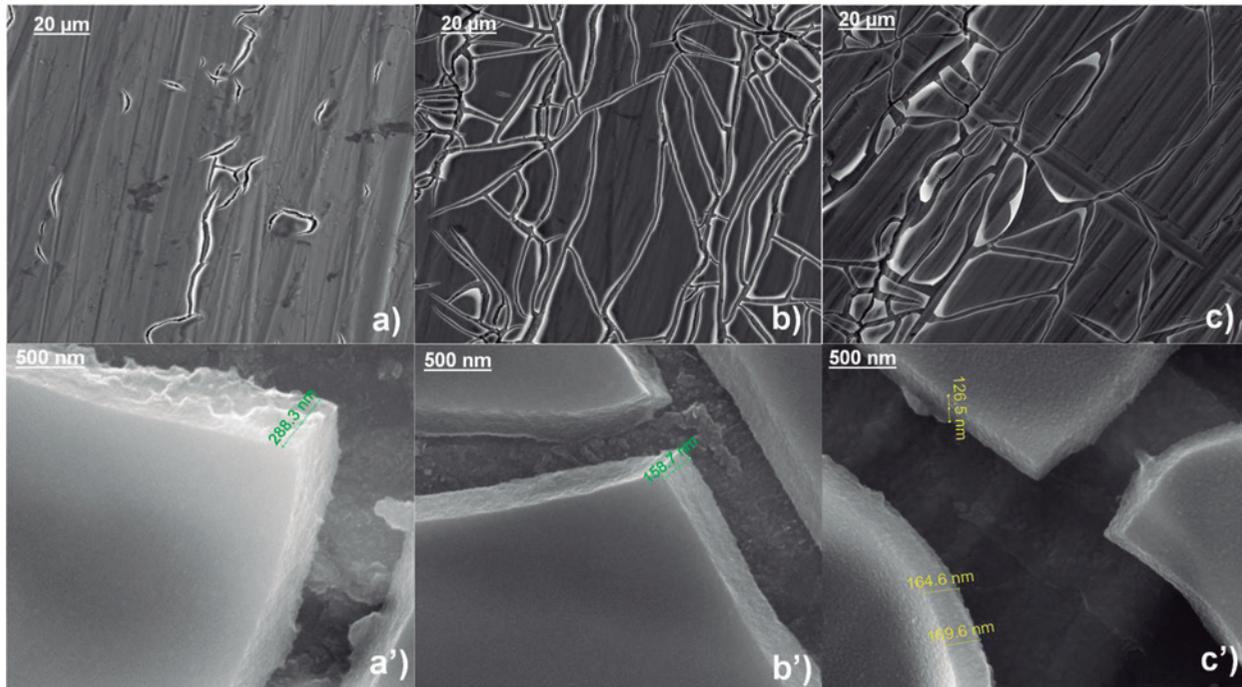


Figure 2. Typical FESEM images (5000x) of a) TiO_2 , b) B-TiO_2 and c) $\text{B-TiO}_2/\text{rGO}$ films, and their corresponding magnifications a'-c') at 150000x.

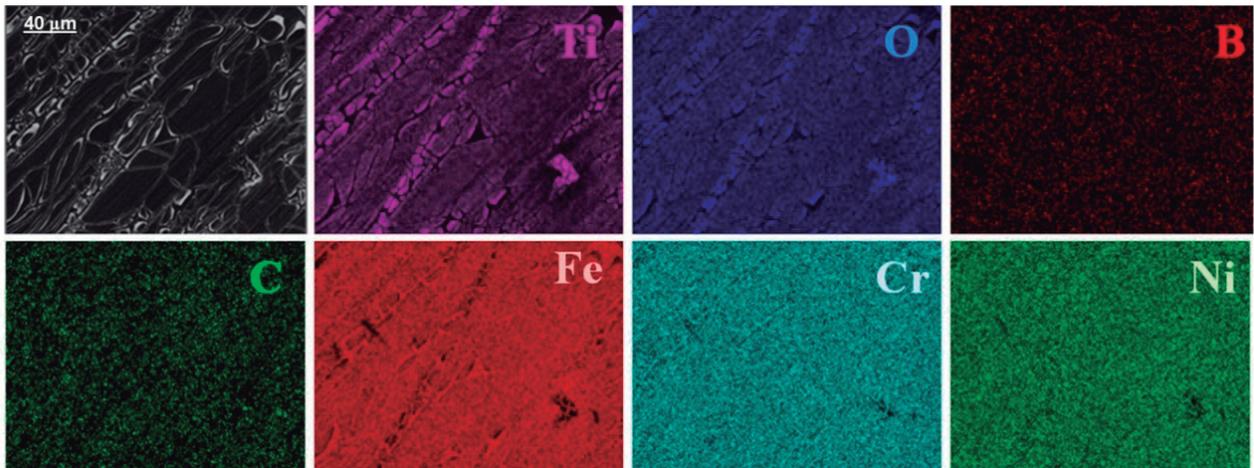


Figure 3. Representative FESEM-EDS mapping analysis of a photocatalytic film of $\text{B-TiO}_2/\text{rGO}$ supported on a stainless steel substrate.

where, λ is the X-ray wavelength of $\text{Cu K}\alpha$ radiation 0.15406 nm, β is the full width at half maximum (FWHM) of (101) anatase peak, and θ is the Bragg angle (Ramírez-Ortega, Meléndez, Acevedo-Peña, González, Arroyo, 2014). Average crystallite sizes for TiO_2 , B-TiO_2 and $\text{B-TiO}_2/\text{rGO}$ films are 18.94 nm, 11.60 nm and 13.94 nm, indicating that boron doping inhibits the growth of TiO_2 crystallites. Diffraction peaks of the different films (Figure 4) not show displacements of the Bragg angles. It is due to the ionic radius of B^{3+} (0.23 Å) is much smaller than Ti^{4+} (0.64 Å), and then boron could be incorporated in interstitial positions within the TiO_2 lattice (Lu, Tian, Chen, Zhang, 2010).

Figure 5 displays the modified Kubelka-Munk function used for determination of band gaps of the different titanium dioxide films. The calculated band gap values for TiO_2 , B-TiO_2 and $\text{B-TiO}_2/\text{rGO}$ films were 3.28 eV, 2.72 eV and 2.63 eV respectively. Thereby, boron decreases the energy of band gap towards the visible region. Incorporation of rGO also diminishes the band gap, extending even more the light absorption to the visible region, suggesting a chemical interaction of B-TiO_2 with graphene sheets. It has been associated to the formation of impurity levels located below of the bottom of the conduction band of TiO_2 (Ding, *et al.*, 2009).

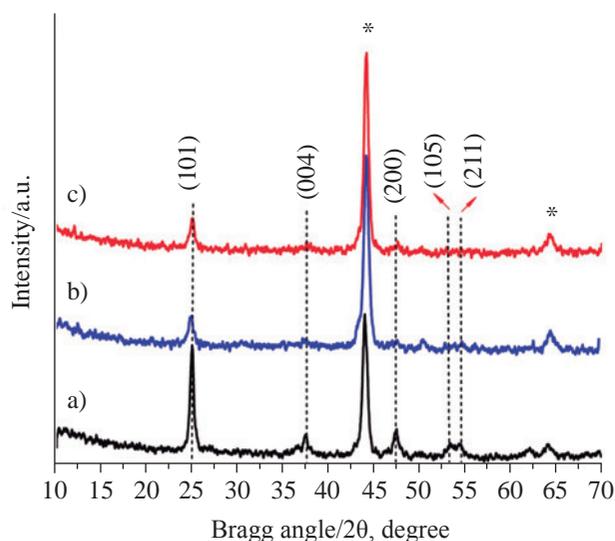


Figure 4. Typical GIXRD profiles of a) TiO₂, b) B-TiO₂ and c) B-TiO₂/rGO films. The asterisk corresponds to reflection of stainless steel substrate.

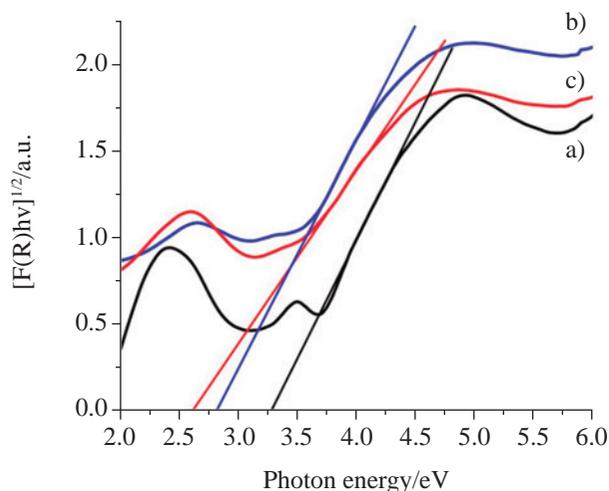


Figure 5. Schematic presentation of the method for band gap determination of a) TiO₂, b) B-TiO₂ and c) B-TiO₂/rGO (3 wt/v% rGO) films.

Photoelectrochemical properties

Figure 6(i) shows the potentiodynamic anodic polarization of TiO₂, B-TiO₂, and B-TiO₂/rGO films with different rGO load, illuminated under visible radiation, in 1 mM phenol using 0.1 M HClO₄ as supporting electrolyte. Unmodified TiO₂ showed negligible photocurrent in the potential window studied (Figure 6(i)-a). An increase in the content of graphene enhances the photoresponse until rGO content is 3 wt/v%. Thus, B-TiO₂/rGO film with 3 wt/v% rGO loading exhibited a photocurrent 30 higher than TiO₂ film. This indicates that more photogenerated electrons are transported from the film to the external circuit of the cell,

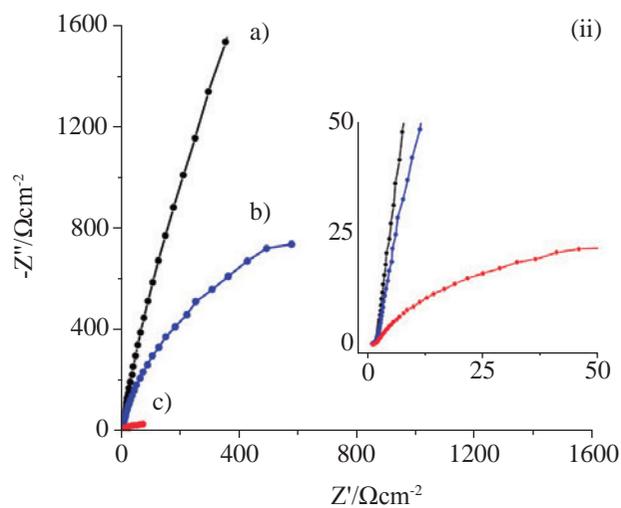
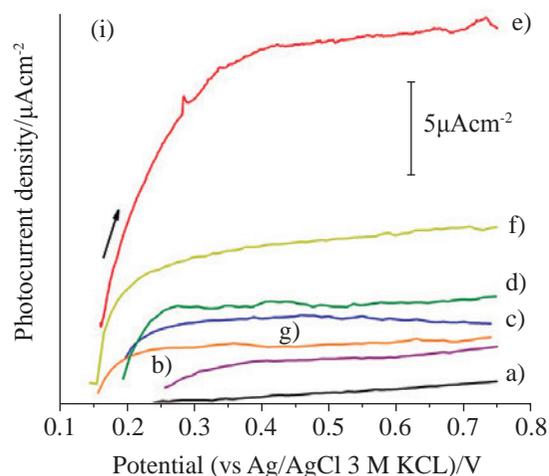
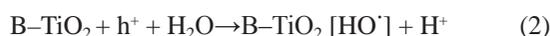


Figure 6. (i) Anodic polarization (10 mVs⁻¹) obtained in 1 mM phenol + 0.1 M HClO₄ under visible light for a) TiO₂ and b) B-TiO₂ films and B-TiO₂/r-GO composite films with different graphene content (wt %): c) 1, d) 2 , e) 3 , f) 4 and g) 10. (ii) Nyquist plots obtained under illumination for a) TiO₂, b) B-TiO₂ and c) B-TiO₂/rGO (3 wt/v% rGO loading) films in 0.1 M HClO₄ under visible light.

increasing the generated photocurrent (Berger, Monllor-Satoca, Jankulovska, Lana-Villarreal, Gómez, 2010; Castellano-Leal, Córdoba, Meléndez, 2012).

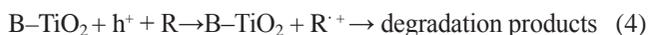
An increasing in the rGO content after 3 wt/v% did not improve the photoresponse, on the contrary photocurrent decreases. When the graphene content exceeded 3 wt/v%, redundant rGO can acts as a recombination center restraining the electron transport, or decreasing the passage of light through the film. Whereas the electrons are transported towards the external circuit of the cell, the photogenerated holes can react with adsorbed H₂O molecules in the film forming hydroxyl radicals as follows (eq. 2-4) (Comninellis, 1994):



thereby, phenol (R) is oxidized (RO) on the film surface



Or can be oxidized directly by the holes with formation of radical cations:



Therefore, phenol oxidation can be photodegraded by indirect (production of hydroxyl radicals, eqs. 2 and 3) or direct reactions (hole transfer, eq. 4).

To explain the increase in electron transport inside the films with the incorporation of rGO, electrochemical impedance spectroscopy (EIS) was performed under visible illumination at open-circuit potential. Figure 6(ii) exhibits the typical Nyquist plots of TiO_2 , B-TiO_2 and $\text{B-TiO}_2/\text{rGO}$ films. The curvature radius of the Nyquist plot decreases in the following order $\text{TiO}_2 > \text{B-TiO}_2 > \text{B-TiO}_2/\text{rGO}$ indicating that the resistance of the films is diminished with introducing rGO. Therefore, the improved voltammetry–photocurrent responses of the composite films showed in Figure 6(i)a is explained by fast interfacial charge transfer, which induce effective separation of photoinduced charge carriers.

It has been found that when stainless steel is coated with TiO_2 via sol-gel dip coating method, TiO_2 film is unintentionally contaminated with metallic impurities from substrate, which caused a decrease in the photocatalytic activity of TiO_2 (Fernández, *et al.*, 1995; Sokolov, *et al.*, 2009). Photoelectrochemical oxidation experiments of cyanide (Ardila-Alvarado, Fuentes-Torres, 2012), copper(I)-cyanide (Quesada-Plata, Quintero-Ruiz, 2014) and phenol (Joya-Herrera, Sequeda-Pico, 2014), mostly carried out by our research group, have shown that if modified TiO_2 films are prepared on stainless steel by sol-gel dip coating, then the photocurrent response in photovoltammetry only appears at large anodic overpotentials, where the electrochemical oxidation of pollutant takes place. The aforementioned results confirm the poor photocatalytic activity of this type of photoelectrodes. Conversely, herein it is possible to observe a well-behaved photoelectrochemical process for a TiO_2 thin-film deposited on stainless steel by sol-gel dip coating (Figure 6i), which shows the benefits of incorporating rGO sheets into a B-TiO_2 nanoparticulate film. However, it has been found that the value of the photocurrent is lower than that observed for B-TiO_2 supported in a titanium plate (Gualdrón-Reyes, *et al.*, 2014. Manuscript in preparation). Hence, the rate of photoelectrocatalytic oxidation of phenol on stainless steel coated with modified TiO_2 is lower than that of titanium. Current efforts are focused on avoid the contamination of TiO_2 film from metallic cations of stainless steel to improve the photocurrent generation.

Conclusions

$\text{B-TiO}_2/\text{rGO}$ composite films deposited on stainless steel were successfully prepared by sol-gel method and dip-coating technique. Boron and rGO in the titanium dioxide

films extended the light absorption to the visible region. The high photocurrent on the $\text{B-TiO}_2/\text{rGO}$ photoelectrode was attributed to the improved electron transport inside the films, due to graphene acts as an efficient acceptor and transporter of photogenerated electrons, facilitating the electron transport from the film/electrolyte interface to the substrate and towards the external circuit of the cell. An excess of graphene content in composite films promotes the formation of recombination centers, decreasing the electron transport in the $\text{B-TiO}_2/\text{rGO}$ films. The TiO_2 -modified composite photoelectrode here developed enables that photogenerated electrons under visible-light irradiation can generate a photocurrent, although their magnitude is not so high in comparison with the same photoelectrode material supported on titanium due to the synthesis method.

Acknowledgments

This study has been financially supported by Universidad Industrial de Santander (project 5704). Andrés Gualdrón is grateful to COLCIENCIAS for the Msc. grant through the program Jóvenes investigadores 2013.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest of any kind.

References

- Akpan, U.G., Hameed, B.H. 2010. The advancements in sol-gel method of doped- TiO_2 photocatalysts. *Appl. Catal. A-Gen.* **375**: 1-11.
- Ardila-Alvarado, L.F., Fuente-Torres, S.N. 2012 (in Spanish). Electrochemical study of the degradation of cyanide on titanium dioxide films doped with nitrogen, N-TiO_2 , under visible light. Undergraduate thesis. Industrial University of Santander, Colombia. p. 37, 38.
- Bell, N.J., Ng, Y.H., Du, H., Coster, H., Smith, S.C., Amal, A. 2011. Understanding the enhancement in photoelectrochemical properties of photocatalytically prepared TiO_2 -reduced graphene oxide composite. *J. Phys. Chem. C*, 2011, **115** (13): 6004-6009.
- Berger, T., Monllor-Satoca, D., Jankulovska, Lana-Villarreal, M.T., Gómez, R. 2010. The electrochemistry of nanostructured titanium dioxide electrodes. *ChemPhysChem* **13**: 2824-2875.
- Castellano-Leal, E.L., Córdoba, E., Meléndez, A.M. 2012 (in Spanish). *Effect of TiO_2N_x film thickness in electrophotocatalytic and photocatalytic degradation of methyl orange under visible-light illumination*. XXVII Congress of the Mexican Society of Electrochemistry -and- 5th Meeting of the ECS Mexican Section. Toluca, Mexico. p. 1-12.
- Comminellis, C. 1994. Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for waste water treatment. *Electrochim. Acta* **39** (11-12): 1857-1862.
- Ding, J., Yuan, Y., Xu, J., Deng, J., Guo, J. 2009. TiO_2 nanopowder co-doped with iodine and boron to enhance visible-light photocatalytic activity. *J. Biomed. Nanotechnol.* **5**: 1-7.

- Fernández, A., Lassaletta, G., Jiménez, V. M., Justo, A., González-Elipe, A. R., Herrmann, J.-M., Tahiri, H. Ait-Ichou, Y.** 1995. Preparation and characterization of TiO₂ photocatalysts supported on various rigid supports (glass, quartz and stainless steel). Comparative studies of photocatalytic activity in water purification. *Appl. Catal. B: Environ.* **7**: 49-63.
- Gerischer, H.** 1990. The impact of semiconductors on the concepts of electrochemistry. *Electrochim. Acta* **35** (11-12): 1677-1699.
- Gualdrón-Reyes, F.A.** 2014. Photoelectrochemical phenol oxidation in aqueous solution by using boron-doped TiO₂/graphene films deposited on stainless steel. Master thesis. Industrial University of Santander, Colombia. p. 37-38.
- Gualdrón-Reyes, F. A., Meléndez, A.M., González, I., Lartundo-Rojas, L., Niño-Gómez, M.** 2014. The effect of substrate on the photo(electro)chemical properties and photocatalytic activity of TiO₂ photoanodes modified with boron and graphene. Manuscript in preparation.
- Jing, C., Zhao, X., Zhang, Y.** 2007. Sol-gel fabrication of compact, crack-free alumina film. *Mater. Res. Bull.* **42**: 600-608.
- Joya-Herrera, L.M., Sequeda-Pico, J.A.** 2014 (in Spanish). Evaluation of N-TiO₂ semiconductors films in the photoelectrocatalytic oxidation of phenol with visible light. Undergraduate thesis. Industrial University of Santander, Colombia. p. 40-44.
- Krýsa, J., Waldner, G., Měšťánková, H., Jirkovský, J., Grabner, G.** 2006. Photocatalytic degradation of model organic pollutants on an immobilized particulate TiO₂ layer. *Appl. Catal. B-Environ.* **64**: 290-301.
- Li, D., Muller, M.B., Gilje, S., Kanerand, R.B., Wallace, G.G.** 2008. Processable aqueous dispersions of graphene nanosheets. *Nat. Biotechnol.* **3**: 101-105.
- Lu, X., Tian, B., Chen, F., Zhang, J.** 2010. Preparation of boron-doped TiO₂ films by autoclaved-sol method at low temperature and study on their photocatalytic activity. *Thin Solid Films* **519**: 111-116.
- Macak, J.M., Tsuchiya, H., Ghicov A., Yasuda, K., Hahn, R., Bauer, S., Schmuki, P.** 2007. TiO₂ nanotubes: self-organized electrochemical formation, properties and applications. *Curr. Opin. Solid St. M. Sci.* **11**: 3-18.
- McAllister, M.J., Li, J.L., Adamson, D.H., Schniepp, H.C., Abdala, A.A., Liu, J., Herrera-Alonso, M., Milius, D.L., Car, R., Prud'homme, R.K., Aksay, I.A.** 2007. Single sheet functionalized graphene by oxidation and thermal expansion of graphite. *Chem. Mater.* **19**: 4396-4404.
- Martínez-Orozco, R.D., Rosu, H.C., Lee, S.W., Rodríguez-González, V.** 2013. Understanding the adsorptive and photoactivity properties of Ag-graphene oxide nanocomposites. *J. Hazard. Mater.* **263**: 52-60.
- Quesada-Plata, F.E., Quintero-Ruiz, J.A.** 2014 (in Spanish). Electrochemical study of the effect of copper(I) as catalyst for oxidation of cyanide under visible light using titanium oxide films doped with nitrogen. Undergraduate thesis. Industrial University of Santander, Colombia. p. 37-43.
- Ramírez-Ortega, D., Meléndez, A. M., Acevedo-Peña, P., González, I., Arroyo, R.** 2014. Semiconducting properties of ZnO/TiO₂ composites by electrochemical measurements and their relationship with photocatalytic activity. *Electrochim. Acta*, **140**: 541-549.
- Lana-Villarreal, M.T., Mao, Y., Wong, S.S., Gómez, R.** 2010. Photoelectrochemical behavior of anatase nanoporous films: effect of the nanoparticle organization. *Nanoscale*, **2**: 1690-1698.
- Sokolov, S., Ortel, E., Radnik, J., Kraehnert, R.** 2009. Influence of steel composition and pre-treatment conditions on morphology and microstructure of TiO₂ mesoporous layers produced by dip coating on steel substrates *Thin Solid Films*, **518**: 27-35.
- Wang, P., Ao, Y., Wang, C., Hou, J., Qian, J.** 2012. Enhanced photoelectrocatalytic activity for dye degradation by graphene-titania composite film electrodes. *J. Hazard. Mater.* **223-224**: 79-83.
- Wang, D., Li, X., Chen, J., Tao, X.** 2012. Enhanced photoelectrocatalytic activity of reduced graphene oxide/TiO₂ composite films for dye degradation. *Chem. Eng. J.* **198-199**: 547-554.
- Zaikovskii, A.V., Mal'tsev, V.A., Novopashin, S.A., Sakhapov, S.Z., Smovzh, D.V.** 2012. Synthesis of nanocrystalline carbon upon methane pyrolysis in arc discharge. *Nanotechnologies in Russia*, **7**: 11.

Modificaciones fotomorfogénicas inducidas por la calidad de la luz en plantas cultivadas

Fánor Casierra-Posada*, Jaime E. Peña-Olmos

Grupo de Investigación de Ecofisiología Vegetal, Facultad de Ciencias Agropecuarias,
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC)

Resumen

Las longitudes de onda importantes en fotobiología son el ultravioleta, la luz visible y la infrarroja. Las longitudes de onda entre 300 y 900 nm son capaces de afectar el crecimiento y el desarrollo de los vegetales. Sin embargo, no solamente la calidad de luz puede influir en los procesos de crecimiento de las plantas, pues otras de sus propiedades, por ejemplo su intensidad y su duración, así como los factores climáticos, también están involucradas. El desarrollo de investigaciones con una sola franja de longitud de onda es muy útil en la identificación del espectro más adecuado para la aplicación en estudio. No obstante, la detección de las influencias de los segmentos de espectro adyacentes en ciertas aplicaciones es difícil debido a que este es continuo, sin márgenes aparentes entre los colores vecinos. El uso de coberturas de colores o filtros fotoselectivos es una técnica agrícola, que si bien no es nueva, aún puede explorarse y estudiarse para esclarecer aspectos relacionados con su uso, como los estímulos lumínicos y la respuesta de las plantas a ellos, con el objetivo de proporcionar al agricultor alternativas reales de manejo en el cultivo y, además, contribuir significativamente al desarrollo del campo de la fisiología vegetal. La investigación enfocada a la influencia de la luz sobre el crecimiento vegetal es extensa, y es necesario discutir sus hallazgos para consolidar su aporte sobre bases objetivas a la hora de hacer modificaciones en el ambiente lumínico como estrategia de manejo en los diversos cultivos.

Palabras clave: fotobiología, fotomorfogénesis, crecimiento, color.

Photomorphogenic changes induced by the quality of light in crops

Abstract

The most relevant wavelengths in photobiology are the ultraviolet, the visible light, and the infrared. Wavelengths between 300 and 900 nm can affect plants growth and development. Nevertheless, not only light quality can influence plant growth processes. Light properties such as its intensity and duration, as well as climatic factors, are also involved. The development of studies using a single wavelength is very useful to identify the most responsive spectrum in the target application. However, detecting the influences of adjacent spectrum segments in certain applications is difficult because the spectrum is continuous, with no apparent margins between neighboring colors. The agricultural technique of colored covering, although not new, can still be explored in order to clarify aspects concerning its use as light stimulus and the response of plants to it, and thus offer to farmers alternatives of crop management, which will also contribute significantly to the study of plant physiology. Research focused on the influence of light on plant growth is wide; however, it is necessary to discuss its findings so as to offer solid evidence if the aim is to introduce modifications in the light environment as a strategy for crop management.

Key words: Photobiology, photomorphogenesis, growth, color.

Introducción

La percepción de la luz permite a los seres vivos adaptarse a los cambios en la iluminación, e influye considerablemente en el control de la morfogénesis, la fotosíntesis y la prevención de daños causados por las radiaciones nocivas (Anders & Essen, 2015). En su gran mayoría, las especies vegetales tienen la capacidad de responder de diferentes formas a la calidad de la luz, entendida esta como el color o la longitud de onda, a su intensidad, es decir, la densidad del flujo fotónico o irradiancia, y a la combinación de ambas.

Este aspecto es de gran relevancia en comunidades vegetales como los cultivos y los ecosistemas vegetales, debido a que las plantas absorben ciertos rangos de la radiación incidente y transmiten la radiación no absorbida a las plantas vecinas. El efecto de la calidad e intensidad lumínica se combina con el componente de sombra en la oferta ambiental y produce

*Correspondencia:

Fánor Casierra-Posada, fanor.casierra@uptc.edu.co

Recibido: 31 de agosto de 2015

Aceptado: 14 de septiembre de 2015

un espectro de radiación singular en el entorno de las plantas (Nguy-Robertson, *et al.*, 2015). Los órganos fotosintéticos de las plantas (hojas y tallos verdes) absorben los fotones en las franjas azul y roja del espectro de la radiación visible incidente, mientras que la absorción en la franja del verde y del infrarrojo es escasa, y la mayoría de estos fotones se reflejan como radiación difusa (Lazo & Ascencio, 2010).

La eficiencia de la luz, cuya energía es almacenada en los fotosintatos luego de un complejo proceso, es una medida muy útil para determinar la productividad de las plantas cultivadas (Monteith, 1972). No obstante, la incorporación de la calidad de la luz a las mediciones de su eficiencia ha demostrado que mejora la agudeza de los modelos con los que se pretende expresar o predecir la productividad de los ecosistemas (Suyker & Verma, 2012).

Las plantas poseen diferentes tipos de fotorreceptores que les son muy útiles para relacionarse con las variables de la oferta ambiental, y la captación de la luz les facilita el control de todos los procesos involucrados en el desarrollo y en la conservación de la homeostasis. Estos fotorreceptores son de diversos tipos y capturan la radiación en diferentes rangos del espectro. Algunos de ellos capturan la luz en el rango del UV-B, mientras que los criptocromos y las fototropinas reciben la luz en las franjas del UV-A y el azul (Štroch, *et al.*, 2015). Las clorofilas, por su parte, absorben la radiación en las franjas del azul y el rojo, y los carotenos capturan los colores verde y amarillo (Kendrick & Weller, 2003, Esteban, *et al.*, 2015). Por último, los fitocromos absorben en las franjas del rojo y el infrarrojo (Anders & Essen, 2015). La acción conjunta de estos pigmentos en cuanto a sus rangos de absorción induce en las plantas las respuestas fotomorfogénicas; no obstante, entre estos grupos de fotorreceptores los fitocromos y los criptocromos son los más estudiados en relación con la fotomorfogénesis en vegetales (Yeom, *et al.*, 2014, Zhang, *et al.*, 2014, OuYang, *et al.*, 2015).

La calidad de la radiación solar, medida en términos del color de la luz captada por las plantas, podría convertirse en una herramienta muy útil en el manejo de las plantas cultivadas y para lograr un aumento en la cantidad o en la calidad del producto cosechado (Casierra-Posada, *et al.*, 2014a). Teniendo en cuenta que las plantas cuentan con diversas rutas para llevar a cabo su metabolismo, la captación de luz y su posterior transformación en energía química, que finalmente es distribuida a lo largo del vegetal, requiere de mecanismos complejos y fotoselectivos específicos para llevar a cabo procesos como la fotosíntesis (Casierra-Posada, *et al.*, 2011a).

El crecimiento y el desarrollo de un vegetal están influenciados, entre otros factores, por la intensidad y la calidad de la luz captada por los órganos que realizan la fotosíntesis. Cuando se generan cambios en la calidad o en la intensidad de la radiación incidente, se producen modificaciones en

la planta que afectan su anatomía y fisiología, así como su crecimiento y desarrollo, fuertemente influenciados por la calidad de la luz en términos del color o la longitud de onda que llega a la superficie de las hojas (Johkan, *et al.*, 2010, Takahashi, *et al.*, 2012). Se ha encontrado que la calidad de la luz afecta la tasa fotosintética, la eficiencia cuántica para la asimilación del CO₂ y la máxima actividad de la fosfoenolpiruvato carboxilasa. Por ejemplo, estos valores fueron significativamente inferiores en plantas de *Zea mays* y *Miscanthus x giganteus* al ser expuestas a la luz azul, en comparación con los valores obtenidos cuando las plantas se expusieron a la luz blanca, roja y verde, por lo que se concluyó que la calidad de la luz afectó la tasa de asimilación de CO₂ en estas plantas, pero no la eficiencia del mecanismo de concentración del CO₂ (Sun, *et al.*, 2012).

El uso de coberturas en la propagación y producción de especies de interés agrícola es una práctica que despierta cada vez más el interés de muchos investigadores de las ciencias agrarias. Las modificaciones del ambiente lumínico en el cual la planta lleva a cabo su crecimiento y desarrollo, inducen en el vegetal varias respuestas morfogenéticas que, por un lado, contrarrestan las condiciones adversas y, por otro, promueven respuestas fisiológicas que mejoran su funcionamiento y aumentan la cantidad y la calidad del producto cosechado (Rajapakse & Shahak, 2007, Cope & Bugbee, 2013, Casierra-Posada, *et al.*, 2014a).

A pesar de los muchos estudios orientados a determinar y esclarecer los efectos de la luz y su influencia sobre el crecimiento y el desarrollo de los vegetales, los resultados relativos a las diferentes respuestas de las plantas a estímulos mediados por cambios en el ambiente lumínico han sido contradictorios y, en ocasiones, poco consistentes, dado que las variables que componen la oferta ambiental son numerosas y en muchos casos, además, estas respuestas dependen de la capacidad de la planta misma para reaccionar a los cambios en su entorno. Las plantas poseen diferentes tipos de fotorreceptores, cada uno con una función definida por la longitud de onda que incide sobre la hoja (Jiao, *et al.*, 2007, Folta & Maruhnich, 2007, Mathews, 2010, Strasser, *et al.*, 2010, Casierra-Posada, *et al.*, 2014b). Del mismo modo, la eficiencia con que cada fotorreceptor es capaz de captar determinado color de luz puede medirse, indirectamente, mediante diversas metodologías. El crecimiento vegetal es uno de tales recursos, y para medirlo se cuenta con variables como el peso seco, el área foliar y los índices de crecimiento (Santos-Castellanos, *et al.*, 2010).

En el presente manuscrito se informa a la comunidad académica acerca de los alcances del uso de la exposición de las plantas a la calidad de la luz en diferentes rangos del espectro, y se analizan las respuestas fotomorfogénicas de algunas plantas cultivadas bajo estas condiciones con base en algunos trabajos llevados a cabo en el altiplano tropical cuyos resultados se confrontan con los de investigaciones desarrolladas en diferentes latitudes.

La luz como factor de crecimiento

La participación de la luz en el crecimiento de las plantas es compleja. Las características de la luz cambian con la longitud de onda. Hay ondas electromagnéticas perjudiciales, como los rayos cósmicos y los gamma, que pueden lesionar a los organismos vivos. Sin embargo, los seres vivos pueden utilizar la mayoría del espectro electromagnético que incide sobre la superficie de la tierra, en particular la parte visible de este espectro, que llamamos “luz”. En general, se sabe que la luz visible tiene aproximadamente la misma longitud de onda que la radiación fotosintética activa (Fukuda, 2013).

La luz tiene dos funciones importantes en el crecimiento de las plantas: como fuente de energía para la fotosíntesis, pues sin su participación las plantas superiores no pueden crecer, y como un estímulo, por ejemplo, para el control del crecimiento de las plantas, o para regular el momento de la floración o la morfogénesis (Momokawa, *et al.*, 2011, Higuchi, *et al.*, 2012). Por lo tanto, el crecimiento de las plantas y su desarrollo a veces se alteran como respuesta a los cambios en el color de la luz irradiada (Eskins, 1992, Guo, *et al.*, 2012, Nguy-Robertson, *et al.*, 2015). Por otro lado, debido a la gran variación de las condiciones de iluminación natural y a su carácter sésil, las plantas se ven obligadas a aclimatarse a nivel celular y molecular ante los cambios en la oferta ambiental. Los cambios en la intensidad o en la calidad de la luz inducen alteraciones en los estados de oxidación y reducción (redox) de la cadena transportadora

de electrones para la fotosíntesis, que actúa como inicio de las respuestas de aclimatación compensatorias, incluidos los ajustes funcionales y estructurales de la fotosíntesis y el metabolismo (Dong, *et al.*, 2014, Dietzel, *et al.*, 2015).

La calidad de la luz y su influencia sobre el crecimiento vegetal

Los filtros foselectivos garantizan a la planta ambientes controlados con un determinado porcentaje de opacidad (disminución de la radiación directa), el cual depende del color y de la naturaleza del material de la cobertura, y causan modificaciones con respecto a la radiación fotosintéticamente activa (PAR) disponible para la planta (Casierra-Posada & Rojas, 2009, Casierra-Posada & Pinto-Correa, 2011, Casierra-Posada, *et al.*, 2012a, Casierra-Posada, *et al.*, 2012b, Casierra-Posada, *et al.*, 2014b, Casierra-Posada, *et al.*, 2014c). En la Tabla 1 se presentan los valores de la PAR y de opacidad de diferentes tipos de coberturas utilizadas en algunos cultivos de interés agrícola.

La luz influye igualmente en el peso seco total de la planta. Las plantas de diversos cultivos de interés agrícola presentan diferencias significativas en la producción de biomasa cuando son afectadas por la calidad de la luz. Las longitudes de onda entre 400 y 550 nm, que corresponden al rango azul-verde, han inducido una disminución en el peso seco total de la planta en algunos cultivos como el de fresa (Casierra-Posada, *et al.*, 2012b), remolacha (Casierra-Posada & Pinto-Correa, 2011) y brócoli (Casierra-

Tabla 1. Radiación fotosintéticamente activa (PAR) y opacidad determinadas bajo filtros foselectivos utilizados en diferentes cultivos (Casierra-Posada & Rojas, 2009, Casierra-Posada & Pinto-Correa, 2011, Casierra-Posada, *et al.*, 2012a, Casierra-Posada, *et al.*, 2012b, Casierra-Posada, *et al.*, 2014b, Casierra-Posada, *et al.*, 2014c)

Radiación fotosintéticamente activa – PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)							
Color de cobertura							
	Azul	Rojo	Verde	Amarillo	Transparente	Naranja	Control
Remolacha	303,78	467,67	-	-	720,6	-	898,27
Acelga	185	278	261	234	265	-	-
Pimentón	486	578	452	376	622	-	1380
Fresa	99,31	86,95	78,87	152,19	210,46	-	299,94
Brócoli	299,45	425,74	-	356,24	667,29	423,59	818,12
Calas	99,31	86,95	78,87	152,19	210,46	-	299,94
Opacidad (%)							
Color de cobertura							
	Azul	Rojo	Verde	Amarillo	Transparente	Naranja	Control
Remolacha	65,72	48,73	-	-	21,39	-	0
Acelga	62,3	43,5	46,9	52,4	46,1	-	-
Pimentón	35,22	41,88	32,78	27,25	45,07	-	0
Fresa	66,89	71,01	73,7	49,25	29,83	-	0
Brócoli	63,4	48	-	56,5	18,5	48,3	0
Calas	66,89	71,01	73,7	49,25	29,83	-	0

Posada & Rojas, 2009); sin embargo, Casierra-Posada, et al., (2012a) también encontraron que en plantas de cala, el color verde (500-550 nm) favorecía la acumulación de materia seca (Tabla 2). Xiaoying, et al., (2012) encontraron que la luz de diodo emisor de luz (*light-emitting diode*, LED) de color azul aumentaba el peso seco total de la planta en tomates cherry. La fotosíntesis y el crecimiento de estas plantas de tomate bajo la influencia de la luz azul, fue superior en comparación con las plantas de control. Según los autores, este resultado podría explicarse con los hallazgos de Matsuda, et al., (2008), quienes afirman que la luz azul se convierte en un estímulo para inducir respuestas de aclimatación en las plantas, encaminadas a la distribución de energía en el fotosistema II (PSII) y, a su vez, tiene que ver con la asimilación del CO₂ en condiciones de alta irradiación.

En estudios llevados a cabo por Casierra-Posada, et al., (2012b), las plantas de fresa presentaron un incremento en el peso seco total de la planta cuando crecieron bajo un filtro fotoselectivo de color rojo, en comparación con los filtros de colores azul, verde y amarillo. Hultberg, et al. (2014) encontraron que al exponer la microalga *Chlorella vulgaris* a luces monocromáticas de colores amarillo, rojo y blanco, la biomasa total acumulada se incrementó en comparación con las microalgas expuestas a luces de colores azul, verde y púrpura. Del mismo modo, Rodríguez & Lazo, (2012) encontraron que 35 días después de la siembra, las plantas de coquito (*Cyperus rotundus* L.) presentaron un aumento en la masa seca total al crecer expuestas a un filtro de papel celofán de color rojo en comparación con los filtros de colores verde y blanco.

Por otro lado, Casierra-Posada, et al., (2011) encontraron que la relación F_v/F_m , o eficiencia cuántica máxima del PSII, disminuyó significativamente en las hojas de las plantas que crecieron bajo filtros fotoselectivos de colores amarillo y transparente comparadas con las plantas expuestas a coberturas de colores azul, verde y roja. Según los autores, este resultado se debió al aumento de la fluorescencia inicial (F_0) causado por una elevada reducción del primer receptor de electrones (el *pool* de quinonas A: Q_A), lo que influyó

directamente en una variación en la tasa de transporte de electrones y, por ende, modificó el rendimiento fotosintético del vegetal, mientras que los altos valores de esta misma variable en las coberturas de colores azul, verde y rojo se relacionaron con la eficiencia de los mecanismos fotoprotectores de la planta que se encargan de modular la probabilidad de los daños ocasionados por la luz. Por otro lado, Slauenwhite & Qaderi, (2013) encontraron que en *Brassica napus* un valor bajo de la relación entre el rojo y el rojo lejano reducía no solo el valor del coeficiente F_v/F_m sino también los contenidos de las clorofilas a y b y de los carotenos.

Estos hallazgos demuestran que la exposición de las plantas a diferentes ambientes lumínicos mediada ya sea por filtros fotoselectivos o por fuentes de luz adicional, modifica el rendimiento fotoquímico de los vegetales y su eficiencia fotosintética, lo que incide directamente en la síntesis de fotoasimilados y, por ende, en el peso seco total de la planta.

Cuando el ambiente lumínico sufre modificaciones las plantas utilizan diversas estrategias para contrarrestar algunas condiciones que pueden considerarse adversas dependiendo del estado fisiológico del vegetal. En el caso de las coberturas de colores rojo, azul y verde, la expansión del área foliar podría estar relacionada con el porcentaje de opacidad en cada uno de los filtros. En los estudios de Casierra-Posada, et al., (2012b) en la fresa, la mayor área foliar la presentaron las plantas que crecieron bajo la cobertura de color rojo (Tabla 3), con una opacidad cercana a 71 %; sin embargo, en ese mismo experimento las plantas de fresa que crecieron bajo la cobertura verde, con un porcentaje de opacidad de 73,7 %, presentaron valores inferiores de área foliar. Para el caso de las plantas de remolacha (Casierra-Posada & Pinto-Correa, 2011) y brócoli (Casierra-Posada & Rojas, 2009), los investigadores encontraron que los porcentajes de opacidad de los filtros fotoselectivos de color azul indujeron mayores valores de área foliar en comparación con los filtros de color rojo; sin embargo, la expansión del área foliar de las plantas que crecieron bajo la cobertura roja fue la más alta en comparación con las demás coberturas de colores y el control sin cobertura (Tabla 3).

Tabla 2. Peso seco total de la planta en cinco diferentes cultivos de importancia agrícola expuestos a diferente calidad de luz (Casierra-Posada & Rojas, 2009), Casierra-Posada & Pinto-Correa, 2011, Casierra-Posada, et al., 2012a, Casierra-Posada, et al., 2012b, Casierra-Posada, et al., 2014b)

	Peso seco total (g)						
	Color de la cobertura						
	Azul	Rojo	Verde	Amarillo	Transparente	Control	Naranja
Acelga	2,44	2,76	2,87	4,80	2,38	-	-
Remolacha	18,12	30,99	-	-	27,42	-	-
Fresa	21,96	36,44	6,33	34,69	37,60	40,59	-
Brócoli	45,57	106,62	-	70,01	80,75	91,74	88,97
Cala	26,48	36,07	41,31	32,37	40,81	37,71	-

Tabla 3. Área foliar determinada en cinco cultivos de importancia agronómica expuestos a diferente calidad de luz (Casierra-Posada & Rojas, 2009, Casierra-Posada & Pinto-Correa, 2011, Casierra-Posada, *et al.*, 2012a, Casierra-Posada, *et al.*, 2012b, Casierra-Posada, *et al.*, 2014b).

	Área foliar (cm ²)						
	Color de cobertura						
	Azul	Rojo	Verde	Amarillo	Transparente	Control	Naranja
Acelga	319,84	356,70	357,88	817,87	177,34		
Remolacha	1032,80	1489,93			1268,51	1218,40	
Fresa	768,74	928,37	348,23	776,89	487,26	527,14	
Brócoli	232,56	580,17		341,03	446,8	498,79	486,89
Calas	350,50	490,21	727,58	381,70	505,60	640,21	

El mejor desarrollo foliar en las plantas evaluadas probablemente se debió al efecto Emerson, ya que bajo los filtros fotoselectivos rojos, las longitudes de onda están en el rango de los 670 a los 700 nm, lo cual supondría un aumento en la tasa de fotosíntesis bajo dicha cobertura. Por otro lado, la luz roja es un componente del espectro visible y este solo hecho es suficiente para que la planta crezca y realice su proceso fotosintético (Lu, *et al.*, 2012, Olle & Virsile, 2013).

En *Cyperus rotundus* el área foliar aumentó a los 21 y 28 días después de la siembra en las plantas que crecieron bajo una película de papel celofán rojo, en comparación con las plantas que crecieron bajo filtros de celofán de colores blanco y verde (Rodríguez & Lazo, 2012). Stutte, *et al.*, (2009) encontraron que al combinar luces LED de longitud de onda en el rango del rojo y rojo lejano, la biomasa vegetal y la longitud de las hojas de lechuga se incrementaron, pero disminuyó la concentración de clorofila, antocianinas y carotenoides. Del mismo modo, el incremento en el crecimiento de plantas de lechuga bajo luces LED del espectro rojo lejano se relacionó estrechamente con un aumento en el área foliar y, por ende, una mayor intercepción de luz solar (Kubota, *et al.*, 2012).

Ayala-Tafuya, *et al.*, (2015) encontraron que el área foliar en plantas de pepino aumentó considerablemente cuando crecían bajo una malla de polisombra roja, efecto que probablemente se debió a los incrementos en los flujos de radiación total, de radiación fotosintéticamente activa y de luz roja determinados en el mismo estudio. El incremento en el área foliar suele estar relacionado con incrementos en la producción, ya que a mayor área foliar, mayor es la capacidad del vegetal para captar la luz, lo que permite obtener una mayor fuente de fotoasimilados destinados al abastecimiento de los órganos vertedero, como los frutos.

La luz puede utilizarse para mejorar la calidad nutricional de los vegetales e incrementar la producción en plantas. El uso de luces LED afecta de manera diferenciada el metabolismo de las plantas y puede originar cambios en la acumulación de azúcares en las hojas, lo cual sería un parámetro deseable en términos de calidad nutricional de los alimentos. Lin, *et al.*, (2013) reportan que en plantas de lechuga influenciadas

por luces LED de colores rojo, azul, blanco, el contenido de sólidos solubles totales aumentó en comparación con las plantas expuestas a luz fluorescente y de color rojo.

Al exponer las plantas a ambientes previamente modificados por coberturas de colores, su funcionamiento se ve influenciado de distintas formas, lo que afecta igualmente su crecimiento y desarrollo. Cuando el crecimiento vegetativo incrementa con determinado color de cobertura, generalmente aumentan también la producción y la calidad del producto cultivado, debido, ante todo, al efecto positivo que genera la calidad de la luz disponible y la eficiencia fotosintética del vegetal bajo esas condiciones en particular. Cuando se presenta un incremento en el área foliar en un vegetal, se asume que dicho comportamiento fisiológico es una estrategia de la planta para aumentar la superficie fotosintética y ser más eficaz en la captación de energía lumínica, lo que finalmente redundará en un incremento en la producción y la calidad del producto (Casierra-Posada, *et al.*, 2011). Casierra-Posada, *et al.*, (2011b) encontraron que bajo las coberturas de colores rojo y amarillo, los valores de acidez titulable en frutos de fresa disminuyeron en comparación con las plantas de control sin cobertura, mientras que el índice de madurez aumentó. En ese mismo estudio, los autores encontraron que los frutos que crecieron bajo la cobertura roja fueron más largos y más anchos que los de las plantas de control que crecieron sin cobertura.

La tasa de crecimiento relativo (TCR) también se vio notablemente influenciada por los filtros fotoselectivos y, además, la longitud de onda afectó el crecimiento de los vegetales dependiendo del cultivo evaluado. En la acelga la cobertura amarilla incrementó el valor de esta variable en comparación con los demás filtros; en las calas la cobertura verde presentó los valores más altos, y en fresa la luz roja mostró diferencias con respecto a las demás coberturas (Tabla 4). En cuanto a la tasa de crecimiento absoluto (TCA), las plantas de fresa presentaron los valores más altos en el control, seguidas por las plantas desarrolladas bajo las coberturas de colores transparente y rojo. En la acelga y las calas la tendencia fue la misma que en la de los valores de TCR registrados, siendo las plantas de acelga expuestas a

Tabla 4. Índices de crecimiento determinados en tres cultivos de interés agronómico expuestos a diferente calidad de luz (Casierra-Posada, *et al.*, 2012a, Casierra-Posada, *et al.*, 2012b, Casierra-Posada, *et al.*, 2014b)

Tasa de crecimiento relativo ($\text{g g}^{-1} \text{d}^{-1}$)						
Color de cobertura						
	Azul	Rojo	Verde	Amarillo	Transparente	Control
Fresa	0,00640	0,00787	0,00400	0,00723	0,00777	0,00781
Acelga	0,02260	0,02350	0,02390	0,02740	0,02220	
Calas	0,00260	0,00330	0,00360	0,00310	0,00350	0,00340
Tasa de asimilación neta ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$)						
Color de cobertura						
	Azul	Rojo	Verde	Amarillo	Transparente	Control
Fresa	1,26536	1,80774	0,75433	2,00601	3,49125	3,56716
Acelga	0,00040	0,00043	0,00046	0,00039	0,00058	
Calas	1,65850	2,04970	1,84680	2,09060	2,26600	1,84090
Tasa de crecimiento absoluto (g d^{-1})						
Color de cobertura						
	Azul	Rojo	Verde	Amarillo	Transparente	Control
Fresa	0,09698	0,16460	0,02523	0,15551	0,16963	0,18320
Acelga	0,03900	0,04430	0,04620	0,07820	0,03800	
Calas	0,08610	0,13180	0,15480	0,11550	0,15270	0,14170

la cobertura amarilla y las plantas de calas expuestas a la cobertura verde las de mayor TCA. La tasa de asimilación neta (TAN) es una medida indirecta de la eficiencia fotosintética en la planta. En ensayos con plantas de fresa, acelga y calas, la cobertura transparente mostró muy buenos valores, los más altos para el caso de la acelga y las calas, y el segundo más alto para el cultivo de fresa después del control sin cobertura.

Según Lin, *et al.*, (2013) y Li, *et al.*, (2013) la luz blanca combinada con luz roja y luz azul puede ser una buena estrategia de manejo para muchos cultivos en ambientes controlados, como en el caso de cultivos bajo invernadero o en cultivos *in vitro*. Del mismo modo, Lazo & Ascencio (2010), Casierra-Posada, *et al.*, (2012a) y Kurepin, *et al.*, (2015) han afirmado que las plantas absorben fotones en los rangos del azul y el rojo del espectro, que la absorción de fotones en el rango del verde y el rojo lejano es muy débil, y que la mayoría de esos fotones son reflejados por las plantas en forma de radiación difusa.

En los estudios enfocados a evaluar la influencia de la luz sobre el crecimiento y el desarrollo de los vegetales, es común encontrar contradicciones entre los autores, lo que explicaría que las plantas de fresa, acelga, remolacha, calas y brócoli presentaran diferentes respuestas de acuerdo a cada longitud de onda del espectro lumínico en el cual se desarrolló el vegetal. Al respecto Liu, *et al.*, (2011) y Casierra-Posada, *et al.*, (2014b) coinciden en afirmar que muchos de los estudios relacionados con la calidad de la

luz y el espectro lumínico son inconsistentes en cuanto a las intensidades de la luz, las cuales no son uniformes, muy probablemente porque los investigadores son incapaces de modular y cuantificar los parámetros de la energía espectral, lo que dificulta la comparación de los resultados.

Conclusiones

Los vegetales reaccionan de diferente manera a la radiación incidente. De igual forma, la calidad de la luz y la irradiancia tienen notables efectos morfogenéticos sobre ellos. Estos dos factores inducen modificaciones en su morfología y fisiología que determinan su adaptación a los componentes de la oferta ambiental. La calidad de la luz altera, además, la cantidad y la calidad del producto de la cosecha. Es así como los metabolitos producidos bajo estas condiciones se pueden ver alterados en cuanto a su contenido y actividad. De igual forma, el crecimiento se ve fuertemente influenciado por la calidad de la luz, lo cual puede ser una consecuencia de las modificaciones en el área foliar o en la producción de biomasa. La morfología del vegetal sufre cambios en respuesta a la calidad de la luz, lo cual se refleja en la altura de las plantas o en el grosor de sus órganos. A pesar de que la influencia de la calidad de la luz es evidente, no existe un modelo de respuesta en la mayoría de las plantas cuando se las expone a rangos específicos de longitud de onda, dado que al comparar los hallazgos de investigaciones llevadas a cabo bajo condiciones similares, se observan grandes contrastes cuando diferentes especies se exponen a la misma franja de longitud de onda. Este resultado sugiere que las

plantas reaccionan a la calidad de la luz de acuerdo con las señales provenientes de los pigmentos fotorreceptores. No obstante las diferencias de los resultados en las distintas especies, la exposición de las plantas a la luz enriquecida con una franja determinada del espectro continúa siendo una herramienta muy útil que debe aprovecharse para obtener un mejor producto cosechado.

Agradecimientos

Los estudios realizados por los autores, que fueron la base para la redacción del presente manuscrito, se desarrollaron con el apoyo de la Dirección de Investigaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia en el marco del plan de trabajo del Grupo de Investigación de Ecofisiología Vegetal adscrito al programa de Ingeniería Agronómica de la Facultad de Ciencias Agropecuarias.

Conflicto de interés

El autor declara que no tiene conflicto de interés

Bibliografía

- Anders, K., Essen, L.-O. (2015). The family of phytochrome-like photoreceptors: Diverse, complex and multi-colored, but very useful. *Current Opinion in Structural Biology*. **35**: 7-16.
- Ayala-Tafuya, F., Yáñez-Juárez, M.G., Partida-Ruvalcaba, L., Ruiz-Espinosa, F.H., Campos-García, H., Vásquez-Martínez, O., Velázquez-Alcaraz, T. de J., Díaz-Valdés, T. (2015). Producción de pepino en ambientes diferenciados por mallas de sombreado fotoselectivo. *Información Técnica Económica Agraria*. **111** (1): 3-17.
- Casierra-Posada, F. & Rojas, J.F. (2009). Efecto de la exposición del semillero a coberturas de colores sobre el desarrollo y productividad del brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*). *Agronomía Colombiana*. **27** (1): 49-55.
- Casierra-Posada, F. & Pinto-Correa, J.R. (2011). Crecimiento de plantas de remolacha (*Beta vulgaris* L. var. Crosby Egipcia) bajo coberturas de color. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. **64** (2): 6081-6091.
- Casierra-Posada, F., Peña-Olmos, J.E., Ulrichs, C. (2011a). Crecimiento y eficiencia fotoquímica del fotosistema II en plantas de fresa (*Fragaria* sp.) afectadas por la calidad de la luz: implicaciones agronómicas. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. **14** (2): 43-53.
- Casierra-Posada, F., Peña-Olmos, J.E., Vargas-Martínez, A.F. (2011b). Propiedades fisicoquímicas de fresas (*Fragaria* sp) cultivadas bajo filtros fotoselectivos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. **64** (2): 6221-6228.
- Casierra-Posada, F., Nieto, P.J., Ulrichs, C. (2012a). Crecimiento, producción y calidad de flores en calas (*Zantedeschia aethiopica* (L.) K. Spreng) expuestas a diferente calidad de luz. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. **15** (1): 97-105.
- Casierra-Posada, F., Peña-Olmos, J.E., Ulrichs, C. (2012b). Basic growth analysis in strawberry plants (*Fragaria* sp.) exposed to different radiation environments. *Agronomía Colombiana*. **30** (1): 25-33.
- Casierra-Posada, F., Peña-Olmos, J.E., Zapata-Casierra, E. (2014a). Pigment content in strawberry leaves (*Fragaria* sp.) exposed to different light quality. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. **17** (1): 87-94.
- Casierra-Posada, F., Zapata-Casierra, E., Chaparro-Chaparro, D.A. (2014b). Growth analysis in chard plants (*Beta vulgaris* L. Cicla, cv. Pencas Blancas) exposed to different light quality. *Agronomía Colombiana*. **32** (2): 205-212.
- Casierra-Posada, F., Matallana-Díaz, Y.A., & Zapata-Casierra, E. (2014c). Growth of bell pepper plants (*Capsicum annum*) affected by coloured covers. *Gesunde Pflanzen*. **66** (4): 149-155.
- Cope, K.R., & Bugbee, B. (2013). Spectral effects of three types of white light-emitting diodes on plant growth and development: Absolute versus relative amounts of blue light. *HortScience*. **48** (4): 504-509.
- Dietzel, L., Gläßer, C., Liebers, M., Hiekel, S., Courtois, F., Czarnecki, O., Schlicke, H., Zubo, Y., Börner, T., Mayer, K., Grimm, B., & Pfannschmidt, T. (2015). Identification of early nuclear target genes of plastidial redox signals that trigger the long-term response of *Arabidopsis* to light quality shifts. *Molecular Plant*. **8** (8):1237-1252.
- Dong, C., Fu, Y., Liu, G., Liu, H. (2014). Growth, photosynthetic characteristics, antioxidant capacity and biomass yield and quality of wheat (*Triticum aestivum* L.) exposed to LED light sources with different spectra combinations. *Journal of Agronomy and Crop Science*. **200** (3): 219-230.
- Eskins, K. (1992). Light quality effects on *Arabidopsis* development. Red, blue and far-red regulation of flowering and morphology. *Physiologia Plantarum*. **86**: 439-444.
- Esteban, R., Morán, J.F., Becerril, J.M., García-Plazaola, J.I. (2015). Versatility of carotenoids: An integrated view on diversity, evolution, functional roles and environmental interactions. *Environmental and Experimental Botany*. **119**: 63-75.
- Folta, K.M., & Maruhnich, S.A. (2007). Green light: A signal to slow down or stop. *Journal of Experimental Botany*. **58**: 3099-3111.
- Fukuda, N. (2013). Advanced light control technologies in protected horticulture: A review of morphological and physiological responses in plants to light quality and its application. *Journal of Developments in Sustainable Agriculture*. **8**: 32-40.
- Guo, B. A., Mu, Y.C., Wang, F., Dong, S. L. (2012). Effect of periodic light color change on the molting frequency and growth of *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture*. **362**: 67-71.
- Higuchi, Y., Sumitomo, K., Oda, A., Shimizu, H., & Hisamatsu, T. (2012). Day light quality affects the night-break response in the short-day plant chrysanthemum, suggesting differential phytochrome-mediated regulation of flowering. *Journal of Plant Physiology*. **169**: 1789-1796.

- Hultberg, M., Larsson, H., Bergstrand, K.J., Carlsson, A.S.** (2014). Impact of light quality on biomass production and fatty acid content in the microalga *Chlorella vulgaris*. **159**: 465-467.
- Jiao, Y., Lau, O.S., Deng, X.W.** (2007). Light-regulated transcriptional networks in higher plants. *Nature Reviews Genetics*. **8**: 217-230.
- Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hashida, S., Yoshihara, T.** (2010). Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. *HortScience*. **45**: 1809-1814.
- Kendrick, R.E. & Weller J.L.** (2003). Regulators of growth / Phytochromes and other photoreceptors. *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*. P. 1063-1069.
- Kubota, C., Chia, P., Yang, Z., Li, Q.** (2012). Application of far-red light emitting diodes in plant production under controlled environments. *Acta Horticulturae*. **952**: 59-66.
- Kurepin, L.V., Pharis, R.P., Emery, R.J.N., Reid, D.M., Chinnappa, C.C.** (2015). Phenotypic plasticity of sun and shade ecotypes of *Stellaria longipes* in response to light quality signaling, gibberellins and auxin. *Plant Physiology and Biochemistry*. **94**: 174-180.
- Lazo, J.V., & Ascencio, J.** (2010). Efecto de diferentes calidades de luz sobre el crecimiento de *Cyperus rotundus*. *Bioagro*. **22** (2): 153-158.
- Li, H., Tang, C., Zu, Z.** (2013). The effects of different light qualities on rapeseed (*Brassica napus* L.) plantlet growth and morphogenesis *in vitro*. *Scientia Horticulturae*. **150**: 117-124.
- Lin, K.-H., Huang, M.Y., Huang, W.D., Hsu, M.H., Yang, Z.W., Yang, C.M.** (2013). The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Capitata). *Scientia Horticulturae*. **150**: 86-91.
- Lu, N., Maruo, T., Johkan, M., Hohjo, M., Tsukagoshi, S., Ito, Y., Ichimura, T., Shinohara, Y.** (2012). Effects of supplemental lighting with light-emitting diodes (LEDs) on tomato yield and quality of single-truss tomato plants grown at high planting density. *Environmental Control in Biology*. **50** (1): 63-74.
- Liu, M., Xu, Z., Yang, Y.** (2011). Effects of different spectral lights on *Oncidium* PLBs induction, proliferation, and plant regeneration. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. **106**: 1-10.
- Mathews, S.** (2010). Evolutionary studies illuminate the structural-functional model of plant phytochromes. *The Plant Cell*. **22**: 4-16.
- Matsuda, R., Ohashi-Kaneko, K., Fujiwara, K., Kurata, K.** (2008). Effects of blue light deficiency on acclimation of light energy partitioning in PSII and CO₂ assimilation capacity to high irradiance in spinach leaves. *Plant and Cell Physiology*. **49**: 664-670.
- Monteith, J.L.** (1972). Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*. **9**: 747-766.
- Momokawa, N., Kadono, Y., Kudoh, H.** (2011). Effects of light quality on leaf morphogenesis of a heterophyllous amphibious plant, *Rotala hippuris*. *Annals of Botany*. **108**: 1299-1306.
- Nguy-Robertson, A., Suyker, A., Xiangming X.** (2015). Modeling gross primary production of maize and soybean croplands using light quality, temperature, water stress, and phenology. *Agricultural and Forest Meteorology*. **213**: 160-172.
- Olle, M., & Virsile, A.** (2013). The effect of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agricultural and Food Science*. **22**: 223-234.
- OuYang, F., Mao, J.-F., Wang, J., Zhang, S., Li, Y.** (2015). Transcriptome analysis reveals that red and blue light regulate growth and phytohormone metabolism in Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.]. *PLoS ONE*. **10** (8): 1-19.
- Rajapakse, N.C., & Shahak, Y.** (2007). Light-quality manipulation by horticulture industry. En: Whitelam, G.C.; Halliday, K.J. (editors). *Light and plant development*. Blackwell Publ. Oxford, UK. p. 290-312.
- Rodríguez, N. & Lazo, J.V.** (2012). Efecto de la calidad de luz sobre el crecimiento del corocillo (*Cyperus rotundus* L.). *Revista Científica UDO Agrícola*. **12** (1): 74-82.
- Santos-Castellanos, M., Segura-Abril, M., Nustez-López, C.E.** (2010). Análisis de crecimiento y relación fuente-demanda de cuatro variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el municipio de Zipaquirá (Cundinamarca, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. **63** (1): 5253-5266.
- Slauenwhite, K.L.I. & Qaderi, M.M.** (2013). Single and interactive effects of temperature and light quality on four canola cultivars. *Journal of Agronomy and Crop Science*. **199**: 286-298.
- Štroch, M., Materová, Z., Vrábl, D., Karlický, V., Šigut, L., Nezval, J., Špunda, V.** (2015). Protective effect of UV-A radiation during acclimation of the photosynthetic apparatus to UV-B treatment. *Plant Physiology and Biochemistry*. **96**: 90-96.
- Stutte, G.W., Edney, S., Skerritt, T.** (2009). Photoregulation of bioprotectant content of red leaf lettuce with light-emitting diodes. *HortScience*. **44**: 79-82.
- Sun, W., Ubierna, N., Ma, J.Y., Cousins, A.B.** (2012). The influence of light quality on C4 photosynthesis under steady-state conditions in *Zea mays* and *Miscanthus x giganteus*: Changes in rates of photosynthesis but not the efficiency of the CO₂ concentrating mechanism. *Plant, Cell and Environment*. **35**: 982-993.
- Suyker, A.E., & Verma, S.B.** (2012). Gross primary production and ecosystem respiration of irrigated and rainfed maize-soybean cropping systems over 8 years. *Agricultural and Forest Meteorology*. **165**: 12-24.
- Strasser, B., Sánchez-Lamas, M., Yanovsky, M.J., Casal, J.J., Cerdán, P.D.** (2010). *Arabidopsis thaliana* life without phytochromes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **107**: 4776-4781.

Takahashi, H., Yamada, H., Yoshida, C., Imamura, T. (2012). Modification of light quality improves the growth and medicinal quality of clonal plantlets derived from the herbal plant *Gentiana*. *Plant Biotechnology*. **29**: 315-318.

Xiaoying, L., Shirong, G., Taotao, C., Zhigang, X., Tezuka, T. (2012). Regulation of the growth and photosynthesis of cherry tomato seedlings by different light irradiations of light emitting diodes (LED). *African Journal of Biotechnology*. **11** (22): 6169-6177.

Yeom, M., Kim, H., Lim, J., Shin, A.Y., Hong, S., Kim, J., Nam, H.G. (2014). How do phytochromes transmit the light quality information to the circadian clock in *Arabidopsis*? *Molecular Plant*. **7** (11): 1701-1704.

Zhang, Z., Ji, R., Li, H., Zhao, T., Liu, J., Lin, C., Liu, B. (2014). CONSTANS-LIKE 7 (COL7) is involved in phytochrome B (PhyB)-mediated light-quality regulation of auxin homeostasis. *Molecular Plant*. **7** (9): 1429-1440.



Silencio:
una hoja se hunde
en el agua clara.

Issa Kobayashi (1763 - 1827)

La luz a Antioquia llegó desde Austria y perdura

Francisco Medina-Estrada¹, Jorge García-Sucerquia^{2,*}

¹Universidad de Antioquia

²Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín – Escuela de Física

Resumen

Se presenta en este artículo un recuento resumido desde la perspectiva de los autores de la forma como se inició el estudio de la luz en Antioquia y como se mantiene. Se hace énfasis en las contribuciones a este proceso por parte del Prof. Dr. Peter Barlai, quien llegó desde Austria al principio de los años 70, estableció las bases de los grupos de óptica de las dos Universidades más importantes de la región antioqueña. Se mencionan además, los aportes a la constitución de los demás grupos que estudian la luz en Antioquia por parte de instituciones nacionales e internacionales. Se muestra la conexión existente entre el trabajo actual de los grupos más representativos y los estudios originales en el campo de la luz en la región.

Palabras clave: óptica en Antioquia, Peter Barlai.

Light came to Antioquia from Austria and last

Abstract

In this paper, we present a condensed summary on the onset of the study of light in Antioquia and how it has prevailed until today. We highlight the contributions of Prof. Dr. Peter Barlai since he arrived from Austria in the early seventies, and how he laid the basis for the establishment of the optics groups of the two leading Universities of Antioquia. In addition, we explain the involvement of national and international institutes in the formation of the optics groups of Antioquia, as well as the link between the original onset of the study of light and the current interest of the leading groups.

Key words: Optics in Antioquia, Peter Barlai.

Introducción

La celebración de un evento tan importante como el Año Internacional de la Luz 2015 trajo a nuestro país eminentes personajes de la escena mundial en tema relacionados con la luz, entre los que se encontraban premios Nobel en física, e incentivó a personalidades del más alto nivel gubernamental a interesarse por el que hacer con la luz. El Presidente de la República y la Ministra de Educación, se animaron a mirar hacia los que estudiamos esta temática y permitió a una gran cantidad de ciudadanos que leen la hora en su reloj de pulsera, o en su teléfono inteligente, a acercarse a temas tan exóticos como relojes atómicos con exactitud en el rango de las oscilaciones atómicas o el entrelazamiento cuántico entre partículas; a algunos nos permitió distraernos de nuestra agitada vida para atender a tan ilustres visitantes y para preguntar por temas como: ¿de dónde surgió el interés por la luz en nuestro entorno?, quizás con el ánimo de ofrecer un reconocimiento hasta ahora negado a todos aquellos que nos inculcaron el interés por estudiar la luz, entendida ésta como esa oscilación electromagnética que nos maravilla.

Atendiendo a esta inquietud y en el inigualable marco de la celebración del Año Internacional de la Luz 2015, queremos

hacer un recuento de cómo llegó la luz a Antioquia para perdurar hasta nuestros días, entendiendo esta frase como la forma en la cual se estableció el estudio de las ondas electromagnéticas.

El origen

Al ingresar al cuarto de revelado fotográfico del Laboratorio de Óptica de la Universidad de Antioquia, los visitantes preguntan: ¿Quién es él? Se indaga por una copia en tamaño 9"x11" de la fotografía que se muestra abajo. "Es Peter Barlai", es la respuesta del anfitrión.

El departamento de Física de la Universidad en los primeros años de la década de los 70 centraba su labor en ofrecer cursos de servicio para la establecida Facultad de Ingeniería. Se iniciaba de forma incipiente la investigación en dicho departamento con los grupos de investigación en las áreas de Fenomenología de Partículas, Estado Sólido y Biofísica. Con el apoyo de la Organización Internacional para las

*Correspondencia:

Jorge García-Sucerquia, jgarcia@unal.edu.co

Recibido: 16 de julio de 2015

Aceptado: 18 de septiembre de 2015

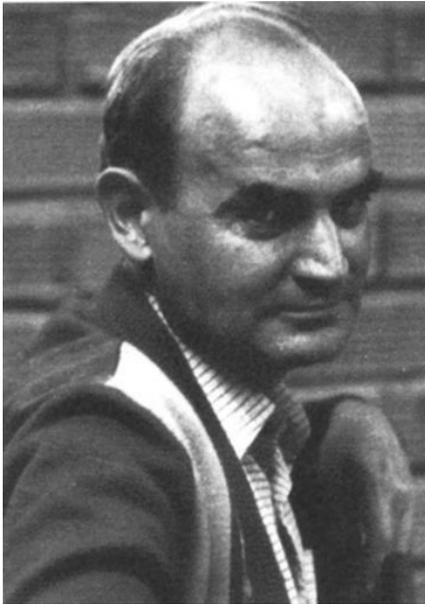


Figura 1. Fotografía del Dr. Peter Barlai, cortesía Grupo de Óptica y Fotónica de la Universidad de Antioquia.

Migraciones, se incorporó a este departamento el Prof. Dr. Peter Barlai (Viena-Austria, agosto 22 de 1939 – Asunción-Paraguay enero 20 de 1985), quien dio origen en el año 1972, el grupo de investigación en Óptica con el objetivo de estudiar al grupo de la luz desde diferentes perspectivas.

Bajo la coordinación del Prof. Barlai, los profesores del departamento de Física Lorenzo de la Torre, Francisco Fernando Medina, Orlando Quintero y Fabio Machado, participaron en seminarios en el tema de la luz como por ejemplo holografía (Barlai, 1971a; Barlai, 1971b; Barlai, 1972a), láseres y sus aplicaciones (Barlai, 1971b; Barlai, 1972b), ergodicidad y coherencia (Barlai, 1973a; Barlai, 1971c; Barlai, 1973b); también se contó con la participación de algunos estudiantes de la carrera de Física, los cuales posteriormente se unieron al grupo liderado por el Prof. Barlai. Además de estos seminarios, se iniciaron cursos dirigidos con la participación activa de cada uno de los miembros del grupo y se dio comienzo a la realización de trabajos de grado a nivel de pregrado, formalizando de esta forma la investigación en el grupo de Óptica, principalmente en las temáticas de los seminarios desarrollados. Se trazaron de esta forma las líneas de interés de estudio de la luz en Antioquia que perduran hasta nuestros días.

Entre 1975 y 1977, como coordinador del grupo de Óptica, el Prof. Barlai tuvo una estancia académica en Alemania con el fin de continuar trabajos investigativos en el área de la holografía. Durante este periodo, el Prof. Francisco Fernando Medina asumió la coordinación del grupo, llevando a feliz término trabajos de grado en las áreas de interés del grupo de Óptica.

El Prof. Peter Barlai regresó con nuevas ideas, con lo cual se intensificó el trabajo académico del grupo de Óptica de la Universidad de Antioquia realizando nuevos seminarios, cursos de formación y nuevos proyectos de investigación. Tres años después, se incorporó al grupo el primer doctor nacional en el dominio la luz, el Dr. Eddien Álvarez, quien regresó de Suecia con un doctorado en espectroscopia láser y abrió una nueva línea de trabajo independiente en el campo de la luz en la Universidad.

La consolidación del estudio de la luz en Antioquia se llevó a cabo en la década de los años 80, con las primeras tesis de Maestría en Física en el área de Óptica. Se registran, por ejemplo, los trabajos de los profesores Francisco F. Medina y Luis Fernando Jaramillo, sobre las funciones de Walsh y la borrosidad de los patrones de *Speckles*, respectivamente.

De forma paralela, algunos de los egresados de pregrado y maestría en Física con énfasis en Óptica realizaron su formación doctoral en el extranjero. Por ejemplo, los profesores Román Castañeda y Rodrigo Henao, lo hicieron en Alemania y Argentina, respectivamente.

La reincorporación del Prof. Dr. Castañeda a la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (UN-Med) en 1993 y del Prof. Dr. Henao a la Universidad de Antioquia en 1997, marcó la consolidación formal del estudio de la luz en Antioquia. El Prof. Castañeda formalizó el grupo de Óptica de la UN-Med donde inició de manera decidida el estudio de la coherencia espacial de la luz (Castañeda & Medina, 1999), la interferometría y los *speckles* con el apoyo de profesores y estudiantes de dicha Universidad. Por su parte, el Prof. Henao continuó el estudio de los *speckles* (Henao, *et al.*, 1993; Torroba, Henao, & Carletti, 1996; Henao, *et al.*, 1997) e inició el estudio del cifrado de información con el uso de la luz (Castañeda, *et al.*, 2001), temas que se añadieron al estudio de la holografía. De forma conjunta estos dos doctores dirigieron al Prof. Francisco Fernando Medina para obtener el primer título de doctor en Física otorgado por la Universidad de Antioquia, que fue precisamente en el marco del estudio de la luz en el campo de la coherencia espacial parcial.

Los doctores en Física Castañeda y Medina, graduados con estudios en temas relacionados con la luz y con relación directa con el Prof. Peter Barlai, lideraron los procesos formativos en el área de Óptica en las dos Universidades más importantes de la región. En la Universidad Pontificia Bolivariana doctores formados en la escuela de la Universidad Industrial de Santander conformaron el grupo de Óptica y Espectroscopia. El grupo de Óptica Aplicada de la Universidad Eafit se conformó bajo el liderazgo del Dr. Luciano Ángel Toro formado en el Centro de Investigaciones Óptica de la Plata, Argentina. A estos grupos se unieron magísteres y doctores que realizaron sus estudios en diferentes instituciones nacionales e internacionales y fortalecieron los grupos de la Universidad Eafit, Universidad

Pontificia Bolivariana, Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), entre otras. La suma de estos esfuerzos constituyó el factor determinante para consolidar la región antioqueña como líder en el estudio de la luz en nuestro país.

Nuestros formadores

El interés inicial sembrado por el Prof. Dr. Peter Barlai se fortaleció con los doctores Castañeda y Medina. Formados bajo el amparo del Prof. Barlai, ellos mantuvieron la tradición instaurada por él en el estudio de la coherencia [5–7], los *speckles* y la holografía (Barlai, 1971a; Barlai, 1971b; Barlai, 1972a). Además, el estudio de la luz en Antioquia ha tenido un importante apoyo por parte de instituciones del ámbito internacional.

Así, a través del Centro Internacional de Física Teórica (ICTP) de la ciudad de Trieste (Italia) se inició una cooperación con la Universidad de Boloña, más exactamente con los profesores Missiroli, Pozzi y Matteucci. Esta cooperación fortaleció de manera decidida las líneas de coherencia y holografía (Matteucci, *et al.*, 1992; Medina, *et al.*, 2004; Garcia-Sucerquia, *et al.*, 2004; Medina & Pozzi, 1990).

El Centro de Investigaciones Ópticas de La Plata, Argentina (CIOP), en cabeza de los doctores Roberto Torroba, Marcelo Trivi, Héctor Rabal, Lía Zerbino, Enrique Sicre y Mario Garavaglia, marcó el desarrollo de los grupos de investigación en Óptica de las Universidades de Antioquia, Eafit, Politécnico Jaime Isaza Cadavid y Pontificia Bolivariana. Varios de los investigadores de estos grupos recibieron su formación doctoral en dicho centro y continúan manteniendo una estrecha cooperación científica con sus directores de tesis.

En España, la Universidad de Valencia representada por los profesores Pedro Andrés-Bou, Miguel Andrés-Bou, Manuel Martínez-Corral, Genaro Saavedra, la Universidad Jaume I, con los profesores Enrique Tajahuerce y Jesús Lancis y la Universidad de Murcia con el Profesor Pablo Artal, han hecho parte de la consolidación de los grupos de investigación en óptica de la región por medio de la formación de doctores en sus unidades académicas a través de la dirección de doctorandos con co-tutoría así como también de profesores de nuestros grupos de investigación.

Desde Polonia, los profesores Zbigniew Jaroszewicz y Andrzej Kolodziejczyk del instituto de Óptica Aplicada de Varsovia y la Universidad Tecnológica de Varsovia, han dejado un legado importante en el estudio de elementos difractivos diseñados para el mejoramiento del sistema visual humano (Kakarenko, *et al.*, 2015). Así mismo, sus enseñanzas han marcado el desarrollo de grupos de estudio de la luz como el de la Universidad de Antioquia.

Son muchas las instituciones que han contribuido en el proceso de formación de los miembros de los grupos de investigación que estudian la luz en Antioquia. Dalhousie University (Canadá), Pontificia Universidad Católica Do

Rio De Janeiro (Brasil), Danish Institute of Technology (Dinamarca), Florida Atlantic University (Estados Unidos), figuran entre las instituciones que han hecho parte de estos procesos de formación y de alguna forma han contribuido a mantener vivo el interés sembrado por el Prof. Dr. Peter Barlai.

El estudio de la luz se mantiene hasta nuestros días

El interés por el estudio de la luz, demostrado e inculcado por aquellos que trajeron esta pasión a la región, se ha fortalecido en nuestros días. Grupos consolidados de investigación en las Universidades de Antioquia, Eafit, ITM, Medellín, Nacional de Colombia Sede Medellín, Politécnico Jaime Isaza Cadavid y Pontificia Bolivariana, constituyen el núcleo más sólido para el estudio de la luz en Colombia. La región cuenta en la actualidad con grupos de investigación en este campo con la máxima categoría otorgada por la rectora de la investigación en Colombia Colciencias, trabajando en temas como óptica visual (Kakarenko, *et al.*, 2015), teoría de coherencia (Castañeda, 2014), fotónica y optoelectrónica (Torres, Aristizábal, & Andrés, 2011; Reyes-Vera, *et al.*, 2012; Reyes-Vera, *et al.*, 2014), vórtices ópticos (Sierra-Sosa, *et al.*, 2013; Angel-Toro, *et al.*, 2013; Angel-Toro, *et al.*, 2012; Londoño, *et al.*, 2015; Rueda, *et al.*, 2013), óptica no-lineal (Serna, *et al.*, 2014), fenómenos ultra-rápidos (Mendoza-Yero, Tajahuerce, *et al.*, 2013; Mendoza-Yero, Calabuig, *et al.*, 2013), microscopía confocal (Garzón, *et al.*, 2008), holografía digital (Hincapie, Herrera-Ramírez, & Garcia-Sucerquia, 2015; Garcia-Sucerquia, *et al.*, 2005; Velásquez Prieto & Garcia-Sucerquia, 2006), microscopía holográfica digital (Garcia-Sucerquia, *et al.*, 2006; Sánchez-Ortiga, *et al.*, 2014; Doblas, Sánchez-Ortiga, *et al.*, 2015; Doblas, Hincapie-Zuluaga, *et al.*, 2015), microscopía holográfica digital multiespectral (Garcia-Sucerquia, 2012; Mendoza-Yero, Tajahuerce, *et al.*, 2013), métodos opto-digitales para cifrado de información (Barrera, Vélez, & Torroba, 2014; Barrera, Mira, & Torroba, 2013; Barrera, *et al.*, 2012; Barrera & Torroba, 2009), entre otros.

El sueño de aquellos que iniciaron el estudio de la luz en Antioquia se ha hecho realidad. Varios grupos de la región son referentes internacionales en su dominio de conocimiento. Este liderazgo se ha traducido en el otorgamiento de patentes de invención (Sánchez-Ortiga, *et al.*, 2014; Garcia-Sucerquia, Trujillo, & Restrepo Agudelo, 2014), producción de los artículos más descargados (Barrera, *et al.*, 2012) y más citados (Check out the Top Cited Articles in Applied Optics, 2013) en revistas de primera línea en el ámbito internacional, realización de conferencias e invitación a participar en los más prestigiosos eventos de la óptica en el mundo, publicación de artículos en las revistas del más alto impacto en la rama de la óptica, el reconocimiento por medio de premios nacionales e internacionales y la formación de estudiantes con proyección nacional e internacional.

Muchos de los estudiantes formados en nuestras escuelas de estudio de la luz han encontrado acogida en centros de investigación tan prestigiosos como Oxford University, Max Planck Institute o DTU, donde hacen parte de grupos de primera línea mundial. Algunos otros han regresado de sus estudios doctorales así como también estancias posdoctorales en prestigiosos centros del ámbito internacional con el ánimo y la capacidad de establecer programas de investigación de relevancia internacional, demostrando que ese interés por el estudio de la luz que nos llegó a Antioquia desde Austria se ha consolidado y se proyecta como uno de los dominios en los cuales la región se destaca en el contexto latinoamericano, garantizando de esta forma su permanencia a corto y mediano plazo.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la Universidad Nacional de Colombia, Proyecto Hermes 19384, el Programa de Internacionalización del Conocimiento y el programa de Jóvenes Investigadores de Colciencias-Universidad Nacional de Colombia código Hermes 28751.

Referencias

- Angel-Toro, L., Sierra-Sosa, D., Tebaldi, M., & Bolognini, N.** (2012). Vortex Metrology Using Fourier Analysis Techniques: Vortex Networks Correlation Fringes. *Applied Optics*, **51** (30). OSA, 7411-19. doi:10.1364/AO.51.007411.
- Angel-Toro, L., Sierra-Sosa, D., Tebaldi, M., & Bolognini, N.** (2013). In-Plane Displacement Measurement in Vortex Metrology by Synthetic Network Correlation Fringes. *Journal of the Optical Society of America A*, **30** (3). OSA, 462-69. doi:10.1364/JOSAA.30.000462.
- Barlai, P.** (1971a). Holographic Reconstruction without Granularity. *Naturforsch*, **26** 1, 1441.
- Barlai, P.** (1971b). Information Processing by Holograms. *Kybernetik*, **2**: 78.
- Barlai, P.** (1971c). Quantum Theory of Diffraction. *Angeu Phys*, **31**: 82.
- Barlai, P.** (1972a). Hologramme Mit Nichtspharischer Referenzwelle Im Inkoharenten Strahlungsfeld. *Z. Naturforsch*, **27a**: 1777-83.
- Barlai, P.** (1972b). Phasenhologramme in Photographischen Emulsionen Mit Hohem Wirkungsgrad Im Blaugriinen Spektralbereich. *Z. Naturforsch*, **27a**: 544.
- Barlai, P.** (1973a). Higher-Order Coherence in Optics. *Naturforsch*, **28a**.
- Barlai, P.** (1973b). Koharenz Hoherer Ordnung in Der Optik Und Ihre MeBbarkeit. *Z. Naturforsch*, **28a**: 19461950.
- Barrera, J., Mira, A., & Torroba, R.** (2013). Optical Encryption and QR Codes: Secure and Noise-Free Information Retrieval. *Optics Express*, **21** (5). OSA, 5373-78. doi:10.1364/OE.21.005373.
- Barrera, J., Tebaldi, M., Ríos, C., Rueda, E., Bolognini, N., & Torroba, R.** (2012). Experimental Multiplexing of Encrypted Movies Using a JTC Architecture. *Optics Express*, **20** (4). OSA, 3388-93. doi:10.1364/OE.20.003388.
- Barrera, J., Vélez, A., & Torroba, R.** (2014). Experimental Scrambling and Noise Reduction Applied to the Optical Encryption of QR Codes. *Optics Express*, **22** (17). OSA, 20268-77. doi:10.1364/OE.22.020268.
- Barrera, J., & Torroba, R.** (2009). Efficient Encrypting Procedure Using Amplitude and Phase as Independent Channels to Display Decoy Objects. *Applied Optics*, **48** (17). OSA, 3120-28. doi:10.1364/AO.48.003120.
- Castañeda, R., & Medina, F.** (1999). Moiré Patterns in Spatially Partial Coherent Interference with Non-Regular Gratings. *Optik*, **110** (3). Elsevier, 123-26.
- Castañeda, R.** (2014). Electromagnetic Wave Fields in the Microdiffraction Domain. *Physical Review A*, **89** (1). American Physical Society, 13843. <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.89.013843>.
- Castañeda, R., Garcia-Sucerquia, J., Henao, R., & Trabocchi, O.** (2001). Information Encryption through Dyadic Permutations. *Optics and Lasers in Engineering*, **36** (6): 537-44. doi:10.1016/S0143-8166(01)00079-3.
- Check out the Top Cited Articles in Applied Optics.** (2013). Optical Society of America. http://www.medellin.unal.edu.co/boletines/images/Top_Cited_Articles_from_Applied_Optics_2014.pdf.
- Doblas, A., Hincapie-Zuluaga, D., Saavedra, G., Martínez-Corral, M., & Garcia-Sucerquia, J.** (2015). Physical Compensation of Phase Curvature in Digital Holographic Microscopy by Use of Programmable Liquid Lens. *Applied Optics*, **54** (16). OSA, 5229-33. doi:10.1364/AO.54.005229.
- Doblas, A., Sánchez-Ortiga, E., Martínez-Corral, M., & Garcia-Sucerquia, J.** (2015). Study of Spatial Lateral Resolution in off-Axis Digital Holographic Microscopy. *Optics Communications*, **352** (October), 63-69. doi:10.1016/j.optcom.2015.04.066.
- Garcia-Sucerquia, J., Trujillo, C., & Restrepo, J.** (2014). Microscopio Holográfico Digital Sin Lentes (MHDSL) Y Método Para Visualizar Muestras. Colombia: SIC (Colombia).
- Garcia-Sucerquia, J.** (2012). Color Lensless Digital Holographic Microscopy with Micrometer Resolution. *Optics Letters*, **37** (10), 1724-26. doi:10.1364/OL.37.001724.
- Garcia-Sucerquia, J., Medina, F., & Matteucci, G.** (2004). Optical Tubular Structures Produced by Diffraction of Circular Apertures. *Optics and Lasers in Engineering*, **42** (1): 61-70. doi:10.1016/S0143-8166(03)00077-0.
- Garcia-Sucerquia, J., Herrera-Ramírez, J., & Velásquez, D.** (2005). Reduction of Speckle Noise in Digital Holography by Using Digital Image Processing. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, **116** (1): 44-48. doi:10.1016/j.ijleo.2004.12.004.
- Garcia-Sucerquia, J., Xu, W., Jericho, S., Klages, P., Jericho, M., & Kreuzer, H.** (2006). Digital in-Line Holographic Microscopy. *Appl. Opt.*, **45** (5). OSA, 836-50.

- Garzón, J., Gharbi, T., & Meneses, J.** (2008). Real Time Determination of the Optical Thickness and Topography of Tissues by Chromatic Confocal Microscopy. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, **10** (10): 104028. <http://stacks.iop.org/1464-4258/10/i=10/a=104028>.
- Henao, R., Medina, F., Rabal, H., & Trivi, M.** (1993). Three-Dimensional Speckle Measurements with a Diffraction Grating. *Applied Optics*, **32** (5). OSA, 726-29. doi:10.1364/AO.32.000726.
- Henao, R., Rabal, H., Tagliaferri, A., & Torroba, R.** (1997). Determination of the Zero-Order Fringe Position in Digital Speckle Pattern Interferometry. *Applied Optics*, **36** (10). OSA, 2066-69. doi:10.1364/AO.36.002066.
- Hincapie, D., Herrera-Ramirez J., & Garcia-Sucerquia, J.** (2015). Single-Shot Speckle Reduction in Numerical Reconstruction of Digitally Recorded Holograms. *Optics Letters*, **40** (8). OSA, 1623-26. doi:10.1364/OL.40.001623.
- Kakarenko, K., Ducin, I., Grabowiecki, K., Jaroszewicz, Z., Kolodziejczyk, A., Mira-Agudelo, A., Krzysztof Petelczyc, Skłodowska, A., & Sypek, M.** (2015). Assessment of Imaging with Extended Depth-of-Field by Means of the Light Sword Lens in Terms of Visual Acuity Scale. *Biomedical Optics Express*, **6** (5). OSA, 1738-48. doi:10.1364/BOE.6.001738.
- Londoño, N., Rueda, E., Gómez, J., & Lencina, A.** (2015). Generation of Optical Vortices by Using Binary Vortex Producing Lenses. *Applied Optics*, **54** (4). OSA, 796-801. doi:10.1364/AO.54.000796.
- Matteucci, G., Medina, F. & Pozzi, G.** (1992). Electron-Optical Analysis of the Electrostatic Aharonov-Bohm Effect. *Ultramicroscopy*, **41** (4): 255-68. doi:10.1016/0304-3991(92)90205-X.
- Medina, F., & Pozzi, G.** (1990). Spatial Coherence of Anisotropic and Astigmatic Sources in Interference Electron Microscopy and Holography. *Journal of the Optical Society of America A*, **7** (6). OSA, 1027-33. doi:10.1364/JOSAA.7.001027.
- Medina, F., Garcia-Sucerquia, J., Castañeda, R., & Matteucci, G.** (2004). Angular Criterion to Distinguish between Fraunhofer and Fresnel Diffraction. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, **115** (11-12): 547-52. doi:10.1078/0030-4026-00547.
- Mendoza-Yero, O., Calabuig, A., Tajahuerce, E., Lancis, J., Andrés, P., & Garcia-Sucerquia, J.** (2013). Femtosecond Digital Lensless Holographic Microscopy to Image Biological Samples. *Optics Letters*, **38** (17). OSA, 3205-7.
- Mendoza-Yero, O., Tajahuerce, E., Lancis, J., & Garcia-Sucerquia, J.** (2013). Diffractive Digital Lensless Holographic Microscopy with Fine Spectral Tuning. *Optics Letters*, **38** (12): 2107-9.
- Reyes-Vera, E., Torres, P., Chesini, G., & Cordeiro, C.** (2012). Temperature Sensitivity of Photonic Crystal Fiber with Integrated Electrodes. *In Press Opt Express*.
- Reyes-Vera, E., Gómez-Cardona, N., Chesini, G., Cordeiro, C., & Torres, P.** (2014). Temperature Sensibility of the Birefringence Properties in Side-Hole Photonic Crystal Fiber Filled with Indium. *Applied Physics Letters*, **105** (20): -. doi:<http://dx.doi.org/10.1063/1.4902157>.
- Rueda, E., Muñeton, D., Gómez, J., & Lencina, A.** (2013). High-Quality Optical Vortex-Beam Generation by Using a Multilevel Vortex-Producing Lens. *Optics Letters*, **38** (19). OSA, 3941-44. doi:10.1364/OL.38.003941.
- Sánchez-Ortiga, E., Doblas, A., Saavedra, G., Martínez-Corral, M., & Garcia-Sucerquia, J.** (2014). Microscopio, Método Y Programa de Ordenador Para La Obtención de Imágenes Cuantitativas de Fase Por Medio de Microscopía Holográfica Digital, Y Kit Para Adaptar Un Microscopio Óptico. España: Oficina Española de Patentes.
- Sánchez-Ortiga, E., Doblas, A., Saavedra, G., Martínez-Corral, M. & Garcia-Sucerquia, J.** (2014). Off-Axis Digital Holographic Microscopy: Practical Design Parameters for Operating at Diffraction Limit. *Applied Optics*, **53** (10). OSA, 2058-66. doi:10.1364/ao.53.002058.
- Serna, J., Hamad, A., García, H., & Rueda, E.** (2014). Measurement of Nonlinear Optical Absorption and Non-Linear Optical Refraction in CdS and ZnSe Using an Electrically Focus-Tunable Lens. In 12th International Conference on Fiber Optics and Photonics, T2C.2. OSA Technical Digest (online). Kharagpur : Optical Society of America. doi:10.1364/PHOTONICS.2014.T2C.2.
- Sierra-Sosa, D., Angel-Toro, L., Bolognini, N., & Tebaldi, M.** (2013). Novel Vortex-Transform for High Frequency Modulated Patterns. *Optics Express*, **21** (20). OSA, 23706-11. doi:10.1364/OE.21.023706.
- Torres, P., Aristizábal, V., & Andrés, M.** (2011). Modeling of Photonic Crystal Fibers from the Scalar Wave Equation with a Purely Transverse Linearly Polarized Vector Potential. *J. Opt. Soc. Am. B*, **28** (4). OSA, 787-91. <http://josab.osa.org/abstract.cfm?URI=josab-28-4-787>.
- Torroba, R., Henao, R., & Carletti, C.** (1996). Digital Polarization-Encoding Technique for Optical Logic Operations. *Optics Letters*, **21** (23). OSA, 1918-20. doi:10.1364/OL.21.001918.
- Velásquez, D., & Garcia-Sucerquia, J.** (2006). Three-Dimensional Surface Contouring of Macroscopic Objects by Means of Phase-Difference Images. *Applied Optics*, **45** (25): 6381-87.

Colombia en el Año Internacional de la Luz 2015: Conferencia Internacional

Enrique Forero

Presidente

Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

El año 2015 fue designado por la UNESCO y por la Organización de Naciones Unidas (ONU) como el Año Internacional de la Luz y las tecnologías basadas en la luz. De acuerdo con la Sociedad Europea de Física, la elección responde a que en este año se cumplen mil años (1015) de la aparición de los trabajos de óptica de Alhazen (o Ibn Al-Haytham), 200 años de la publicación por parte de Augustin-Jean Fresnel de un artículo en el cual se plantea la naturaleza ondulatoria de la luz (1815) y 150 años del trabajo de James Clerk Maxwell acerca del electromagnetismo (1865), los cuales abrieron el camino a las modernas tecnologías basadas en las ondas electromagnéticas, tales como los láseres y los teléfonos móviles. Igualmente, el año 2015 marca el primer centenario de la introducción de la velocidad de la luz como parte esencial de las ecuaciones de Einstein en la teoría general de la relatividad (1915), así como los 50 años del descubrimiento (1965) de la radiación cósmica de fondo (el eco electromagnético del *Big Bang*) por Arno Penzias y Robert Woodrow Wilson, y de los logros de Charles Kao en relación con la transmisión de la luz en fibras para la comunicación óptica.

La ONU acordó enfocar la celebración en la promoción de los aspectos educativos y del desarrollo sostenible a partir de la óptica y la fotónica. Pero la luz es de interés no solo para los físicos y los científicos sino para toda la humanidad. La celebración tiene relevancia en campos tales como la educación, el arte, la música, la filosofía, la arquitectura, las humanidades, la arqueología y la herencia cultural. Como dice Heiner Castañeda (revista Experimenta, No. 3, U. de Antioquia), la luz “se cuele en el cine, la fotografía o la pintura; en el celular, en el computador o el televisor; en el microscopio, la impresora o el escáner; el tomógrafo, el endoscopio o electrocardiógrafo”. La experimentación con la luz y sus aplicaciones no pueden llevarse a cabo independientemente de la materia; la producción y la detección de la luz, y su propagación y manipulación requieren de medios materiales. Las conexiones con las matemáticas, la física atómica y molecular y las demás áreas de la física (muy especialmente con la mecánica cuántica), la química y la biología también son evidentes. La ciencia del siglo XXI se desenvuelve en una estrecha colaboración entre las más diversas disciplinas.

La luz es protagonista central de la tecnología y de la vida moderna. La imagenología de resonancia magnética nuclear se basa en la manipulación de los espines nucleares mediante fotones de radiofrecuencia. La cirugía laparoscópica se realiza en forma cotidiana. La fluorimetría permite la detección temprana de pequeños tumores cancerosos. Se prevén avances inmensos con los computadores basados en circuitos ópticos. Los sistemas satelitales basados en las ondas de radio y en las microondas ya forman parte de la vida diaria, así como la prospección satelital del clima, la minería, la agricultura, la prevención de desastres. Hoy los sistemas de identificación y encriptación basados en la luz son una realidad, basta mencionar los que recurren a las huellas digitales y el iris. El útil instrumento llamado GPS integra estas tecnologías y usa los resultados de la teoría especial y la teoría general de la relatividad. Sin duda alguna, la luz es un instrumento fundamental para mejorar el nivel de vida de la población y el desarrollo económico general.

La comunidad científica colombiana se ha unido a esta importante celebración con diferentes actividades en muchas ciudades del país. Así, la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, en colaboración con la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad de los Andes y la Universidad de Antioquia, se dio a la tarea de organizar la conferencia internacional denominada “Colombia en el Año Internacional de la Luz”, evento que se realizó del 16 al 20 de junio con actividades en las ciudades de Bogotá y Medellín.

Es prudente aclarar que la organización de la Conferencia “Colombia en el Año Internacional de la Luz” fue un proceso de varios años. A comienzos de 2013 el Profesor de la Universidad Nacional de Colombia, Herbert Vinck-Posada le expresó al profesor Jorge Mahecha, del Instituto de Física de la Universidad de Antioquia, su interés en invitar a los doctores Alain Aspect y Serge Haroche para que participaran en la celebración de los 100 años del átomo de Bohr en la Universidad Nacional de Colombia durante 2014. Para ello le sugirió que contactara a algunas personas del Laboratorio Aimé Cotton en Orsay y del Instituto de Óptica en Palaiseau. El doctor Jean-Pierre Galaup, del Aimé Cotton, hizo los contactos correspondientes en Francia, pero en aquel momento tanto el doctor Haroche como el doctor

Aspect ya tenían sus agendas ocupadas. Vale recordar que el doctor Vinck-Posada propició la participación del doctor Paulo Guimarães de Belo Horizonte.

El doctor Galaup visitó la ciudad de Medellín a finales de 2013 para hacer una presentación en la escuela ENO-CANCOA de la Universidad Pontificia Bolivariana, y en el curso de una conversación sobre el Año de la Luz con el doctor Mahecha le sugirió que invitara a los doctores Haroche y Aspect para el año 2015. A su regreso a Francia el doctor Galaup se puso en contacto con ellos y obtuvo su aprobación para venir a Colombia este año. Posteriormente, sugirió que se invitara también a la doctora Suzanne Fery-Forgues.

A finales de 2013, el doctor Boris Rodríguez convidó a la doctora Ana María Rey a participar en un evento sobre mecánica cuántica y a dictar una conferencia en el marco del programa “Ciencia en bicicleta” en el Parque Explora de Medellín, durante 2014. Luego del evento, el doctor Mahecha le comentó al doctor Rodríguez sobre la conferencia que se iba a organizar para el Año de la Luz y le sugirió que invitara a la doctora Rey, quien no sólo aceptó la invitación sino que propuso convidar al doctor David Wineland, ganador con el doctor Haroche del Premio Nobel de Física en 2012, y este también aceptó la invitación. En diciembre de 2013 el doctor Jorge Mahecha entró en contacto conmigo para invitar a la Academia a vincularse a esta Conferencia Internacional.

Desde ese momento se iniciaron conversaciones con la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad de los Andes y la Universidad de Antioquia, para que las cuatro instituciones lideraran el proceso de organización. En un primer momento se contó con la participación de la doctora Ángela Guzmán y el doctor Roberto Martínez, ambos pertenecientes a la Academia. La doctora Guzmán sugirió contactar al Nobel, de 2005 Theodor Hänsch; el presidente de la Academia realizó ese contacto que desafortunadamente no pudo concluirse exitosamente. El doctor Martínez por su parte adelantó gestiones ante el rector de la Universidad Nacional de Colombia y consiguió la promesa de otorgarle un apoyo económico importante a la Conferencia. También el doctor Martínez sugirió involucrar a personas que trabajan en procesos ópticos de altas energías y en temas de astrofísica. El doctor Mahecha sugirió contactar a dos personalidades de la astrofísica: a la doctora Ingrid Stairs (experta en pulsares) y al doctor William Unruh (experto en agujeros negros), ambos de la Universidad de British Columbia en Vancouver.

En la Universidad de los Andes la doctora Silvia Restrepo, entonces Decana de la Facultad de Ciencias y posteriormente Vicerrectora de Investigación, así como las doctoras Yenny Hernández y Alejandra Valencia, aceptaron de inmediato el reto y comenzaron a programar eventos adicionales, al tiempo que participaban activamente en la organización de la Conferencia. Las doctoras Valencia y Hernández, junto con la doctora Karen Fonseca, profesora

de la Universidad Nacional de Colombia, prepararon la solicitud de financiación que se presentó con éxito al Centro Internacional de Física Teórica (ICTP).

La presencia de la Universidad de Antioquia también se cristalizó a través del doctor Jorge Mahecha, de la señora Decana de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, doctora Nora Restrepo, y del Profesor Edgar Rueda, entre otros.

La Universidad Nacional de Colombia delegó la participación en la organización de la Conferencia en la Sede de Medellín, más específicamente en el doctor Román Castañeda, Director de Investigaciones de la Sede y Miembro de la Academia. Desde finales de 2014 se conformó en Medellín el comité Agenda Antioquia: Celebración Año Internacional de la Luz 2015, con la finalidad de organizar durante todo el año diferentes actividades, las cuales se cumplieron exitosamente; este comité, en el cual participaron muchas universidades e instituciones culturales de Medellín, brindó un apoyo fundamental para la conferencia de junio.

A comienzos de 2014 se produjo un primer documento descriptivo del evento que se distribuyó ampliamente y sirvió de base para presentar solicitudes de apoyo, las cuales recibieron respuesta positiva de la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad de los Andes, la Universidad de Antioquia, la Embajada de la República de Francia, Ruta N, el Parque Explora, el Instituto Jorge Robledo, la Universidad Pontificia Bolivariana, la Universidad EAFIT, el *Institut Française - Colombia*, el Ministerio de Educación Nacional, el *International Center for Theoretical Physics* (ICTP) y el *European Council for Nuclear Research* (CERN).

Posteriormente se unió a nosotros la Fundación Centro de Estudios Interdisciplinarios Básicos y Aplicados – Ceiba –, con su curso de verano “Conectando a los mejores para la paz”. Los doctores Paulo Orozco, Roberto Zarama y todo su equipo apoyaron activamente la organización de la Conferencia en sus últimas etapas. Gracias a las gestiones del doctor Eduardo Posada, la Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia también se sumó a las actividades en Bogotá.

Como resultado de las gestiones adelantadas en distintos frentes durante 2013 y 2014, se logró conformar, finalmente, una excelente nómina de conferencistas que incluyó a cuatro representantes de Francia, el doctor Serge Haroche, galardonado con el Premio Nobel de Física en 2012, el doctor Alain Aspect, ganador de la Medalla Bohr, el doctor Jean-Pierre Galaup y la doctora Suzanne Fery-Forgues, un representante de Canadá, el doctor William Unruh, dos de los Estados Unidos, el doctor David Wineland, quien compartió el Premio Nobel de Física en 2012 con el doctor Haroche, y la doctora Ana María Rey, colombiana residente en ese país, un representante de Brasil, el doctor Paulo Sergio S. Guimarães, y cuatro colombianos, la doctora Alejandra Valencia de la Universidad de los Andes,

el doctor Boris Rodríguez y el doctor Alejandro Mira de la Universidad de Antioquia, y el doctor John Henry Reina de la Universidad del Valle.

La Conferencia Colombia en el Año Internacional de la Luz comenzó el día 15 de junio de 2015 con un programa radial preparado conjuntamente por la Emisora de la Universidad Nacional de Colombia - UN Radio, y la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. El programa se emitió durante todo el día y constó de tres franjas de discusión e información, de una hora cada una, sobre asuntos relacionados con la luz, junto con una riquísima programación musical con temas que también tenían que ver con la luz. Este programa se extendió desde las 7:30 de la mañana hasta la media noche.

Las actividades académicas se iniciaron el martes 16 de junio en el Auditorio León de Greiff de la Universidad Nacional de Colombia, con las conferencias de los doctores Alain Aspect, Jean-Pierre Galaup, Boris Rodríguez, Paulo S.S. Guimarães y Serge Haroche. Al final de la sesión se realizó un foro sobre el concepto de fotón, a cargo de todos los participantes del día, el cual contó con numerosas preguntas de los asistentes.

En una breve ceremonia al final de la tarde del martes 16, los doctores David Wineland y Serge Haroche fueron exaltados como Miembros Honorarios de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Las conferencias continuaron el miércoles 17 en el Auditorio Mario Laserna de la Universidad de los Andes, con la participación de los doctores Suzanne Fery-Forgues, William Unruh, Ana María Rey, Alejandra Valencia y David Wineland. El doctor Serge Haroche dictó una conferencia dirigida a estudiantes y profesores de colegios de Bogotá en la Biblioteca Luis Ángel Arango del Banco de la República, organizada por la Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia.

En la noche del miércoles 17 todos los conferencistas se trasladaron a la ciudad de Medellín, donde durante el jueves 18 y el viernes 19 de junio se llevó a cabo un completísimo programa en el auditorio del Parque Explora y en el de Ruta N, así como en otras instituciones académicas de la ciudad.

El jueves 18 de junio dictaron conferencias en el auditorio del Parque Explora los doctores Haroche, Aspect, Rodríguez, Rey y Unruh. Hacia las 6 de la tarde, el Dr. Haroche dictó una charla abierta al público no inscrito en la conferencia principal en el marco del programa “Ciencia en bicicleta” del Parque Explora. Ese mismo día, en horas de la tarde, los doctores Wineland y Rey visitaron el Instituto Jorge Robledo. Por primera vez en Colombia un ganador del Premio Nobel tiene un encuentro con profesores y sobre todo con estudiantes de secundaria en un colegio. Esta actividad fue posible gracias a las gestiones del Académico Jorge Cossio, profesor de Matemáticas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

El viernes 19, también en el auditorio del Parque Explora, dictaron conferencias los doctores Reina, Wineland, Galaup, Mira, Guimarães y Fery-Forgues. Hacia las 6 de la tarde, el doctor Wineland dictó una charla abierta al público no inscrito en la conferencia principal en el marco del programa “Ciencia en bicicleta” del Parque Explora. El mismo día se realizó en el auditorio de Ruta N un foro sobre entrelazamiento cuántico de fotones, a cargo de los doctores Aspect y Unruh, con nutrida asistencia y participación.

Paralelamente a las actividades de la Conferencia, visitó el país la socióloga y antropóloga social Claudine Haroche, quien dictó conferencias en la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín el miércoles 17, en la Universidad Jorge Tadeo Lozano el jueves 18 y en la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá el viernes 19, acerca de su trabajo sobre “La Sociedad de la Desconfianza”.

Agradecimientos

Todas las personas y entidades involucradas en la preparación de la Conferencia dejamos expresa constancia de nuestro agradecimiento a los invitados especiales, doctores Alain Aspect, Suzanne Fery-Forgues, Jean-Pierre Galaup, Paulo Guimarães, Serge Haroche, Alejandro Mira, John Henry Reina, Ana María Rey, Boris Rodríguez, William Unruh, Alejandra Valencia y David Wineland. Todos ellos aceptaron acompañarnos en esta Conferencia desde el primer momento en que se les contactó, y a lo largo de todo el programa estuvieron siempre dispuestos a colaborar, a adaptarse a nuestros requerimientos e, inclusive, a viajar largas distancias para estar con nosotros. En total entregaron, en Bogotá y Medellín, 16 temas avanzados y divulgativos diferentes sobre la luz.

En nombre de los organizadores, reitero nuestras expresiones de reconocimiento a la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad de los Andes, la Universidad de Antioquia, la Embajada de la República de Francia, Ruta N, el Parque Explora, el Instituto Jorge Robledo, la Universidad Pontificia Bolivariana, la Universidad EAFIT, el *Institut Française* - Colombia, el Ministerio de Educación Nacional, el *International Center for Theoretical Physics* (ICTP), el *European Council for Nuclear Research* (CERN), la Fundación Centro de Estudios Interdisciplinarios Básicos y Aplicados – Ceiba –, y la Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia.

Personalmente, agradezco al doctor Jorge Mahecha por haber traído a la atención de la Academia la celebración del Año Internacional de la Luz, por habernos hecho la invitación a participar y por su incansable trabajo en todo el proceso de organización de la Conferencia. Así mismo, agradezco al doctor Román Castañeda, quien, junto con el doctor Mahecha, el doctor Edgar Rueda y todo el equipo de Medellín, adelantó una excelente labor de preparación del evento.

Un sincero agradecimiento va también para el doctor Román Castañeda, editor invitado de este número especial de la Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, para la doctora Elizabeth Castañeda, editora de la Revista y para Carolina Acosta, asistente y coordinadora editorial, quienes trabajaron constantemente para facilitar la labor del editor invitado.

La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales se siente particularmente honrada y orgullosa de haber realizado la primera sesión de la Conferencia “Colombia en el Año Internacional de la Luz” en el auditorio León de Greiff de la Universidad Nacional de Colombia. En nombre de la Academia, dejo constancia de un sincero agradecimiento al señor Rector, doctor Ignacio Mantilla, a la Secretaria General Catalina Ramírez y a la señora Vicerrectora de Investigación, doctora Dolly Montoya. En la Universidad de Antioquia el apoyo de la Decana de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, doctora Nora

Restrepo, y del Vicerrector de Investigaciones y miembro de la Academia, doctor Fanor Mondragón, fueron de enorme utilidad. En la Universidad Pontificia Bolivariana colaboró activamente el doctor Freddy Pérez.

Quiero expresar aquí mi sincero reconocimiento a mis colaboradores en la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Su dedicación, entusiasmo y voluntad de trabajo son realmente encomiables. Cabe mencionar también la alianza entre UN Radio y la Academia, que viene produciendo frutos muy importantes. El trabajo del Profesor Carlos Raigoso, Director de UN Radio y de todo su equipo, y de César Moreno y el Profesor Mauricio García por parte de la Academia en el programa del lunes 15 de junio, es digno de elogio y reconocimiento.

<http://indico.cern.ch/e/iyl2015colombiaconf>

<http://iyl.uniandes.edu.co/>

<http://antioquiayl2015.com.co/>



▶ Auditorio León de Greiff de la Universidad Nacional, Bogotá, Colombia



◀ Planetario de Medellín, Parque Explora, Medellín, Colombia

Conferencia Colombia en el Año Internacional de la Luz 2015

Perfiles de los conferencistas y resúmenes de sus presentaciones

Recopilados por Jorge Mahecha Gómez, Instituto de Física,
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia



Serge Haroche

(*Collège de France, París, Francia*) se graduó en la École Normale Supérieure (ENS), obtuvo su doctorado en la Universidad de París VI en 1971. Después de una visita postdoctoral a la Universidad de Stanford en el laboratorio de Arthur Schawlow (1972-1973), fue nombrado profesor de tiempo completo en la Universidad de París VI en 1975, cargo que ocupó hasta 2001, cuando fue nombrado profesor en el Collège de France (para ocupar la cátedra de física cuántica y la dirección desde 2012).

Su investigación ha tenido lugar principalmente en Laboratoire Kastler Brossel en ENS, donde ahora trabaja con un equipo de compañeros de trabajo de alto nivel, postdoctorados y estudiantes de posgrado.

Serge Haroche ha recibido numerosos premios y distinciones, entre ellos la Medalla de Oro del CNRS (2009) y el Premio Nobel de Física (2012) con David J. Wineland,

por “inventar métodos experimentales innovadores que les permitieron la medición y la manipulación de sistemas cuánticos individuales”.

Su grupo sobre Electrodinámica Cuántica en Cavidades (QED) de la ENS ha sido, desde principios de la década de 1980, un pionero del campo de la electrodinámica cuántica en cavidades, un dominio de la óptica cuántica que estudia el comportamiento de los átomos confinados por fronteras metálicas en una región limitada del espacio, con el objetivo de poner a prueba los aspectos fundamentales de la física cuántica como la superposición de estados, el entrelazamiento, la complementariedad y la decoherencia. Algunos de estos experimentos son realizaciones reales en el laboratorio de los “experimentos mentales” imaginados por los padres fundadores de la mecánica cuántica. En 2006, el grupo construyó una cavidad con un factor-Q-súper-alto capaz de almacenar fotones entre espejos durante más una décima de segundo. El atrapamiento de cuantos de luz en esta cavidad le ha permitido al equipo detectar un mismo campo de manera repetida y no destructiva, proyectarlo en estados con un número de fotones definidos (llamados estados de Fock) y observar los saltos cuánticos de la luz debidos a la pérdida o ganancia de un solo fotón en la cavidad (2007). Esto constituye una nueva forma de ver la luz. Mientras que los fotones son usualmente destruidos en la medición, ahora se pueden contar repetidamente en la cavidad como se haría con bolas en una caja. Este método de detección no destructiva ha llevado a Serge Haroche y su equipo a desarrollar nuevas formas de generar y reconstruir estados no clásicos de radiación atrapados en una cavidad llamados estados gato de Schrödinger de la luz, e investigar en detalle la de coherencia, un fenómeno esencial para explicar la transición entre los comportamientos cuánticos y clásicos (2008). El equipo de la ENS ha llevado recientemente estos experimentos aún más lejos mediante la demostración de un procedimiento de retroalimentación cuántica para lograr la preparación de un estado predeterminado no clásico de un campo atrapado en una cavidad y contrarrestar los efectos de coherencia en estos estados (2011).

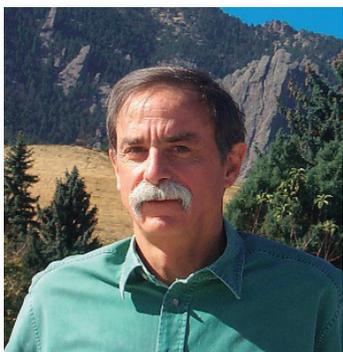
Conferencia plenaria

Experimentos sobre QED en cavidades: control de los fotones en una caja y formación de gatos de Schrödinger de luz

Serge Haroche

Los fundadores de la física cuántica con frecuencia analizaron “experimentos mentales” con el fin de discutir los conceptos de superposición, complementariedad y entrelazamiento que gobiernan el mundo a escala microscópica. A su juicio, este tipo de experimentos con electrones individuales, átomos o fotones no tenían alcance práctico, y se sorprenderían al ver que hoy en día estos experimentos mentales se realizan en laboratorios de todo el mundo. En nuestros estudios acerca de la electrodinámica cuántica en cavidades (CQED), atrapando fotones de microondas en una cavidad superconductoras y dejando que ellos interactúen con átomos de Rydberg portadores de dipolos eléctricos grandes que cruzan la cavidad de uno en uno. “Esto nos permite contar fotones sin destruirlos, y estabilizar los estados de número de fotones en la cavidad usando retroalimentación cuántica”.

También preparamos y reconstruimos estados fotónicos en superposición suspendidos entre diferentes realidades clásicas, generando una versión de laboratorio del famoso gato que Schrödinger había imaginado que podía estar muerto y vivo al mismo tiempo. Con estos experimentos, ilustramos conceptos fundamentales de la física cuántica e investigamos experimentalmente el proceso de decoherencia que explica la transición entre los mundos cuántico y clásico”, reseña el Dr. Haroche. La física de CQED se ha extendido recientemente a átomos artificiales hechos de junturas Josephson superconductoras, dando lugar a un nuevo dominio de la física mesoscópica llamado “QED de circuitos”, abriendo el camino a aplicaciones prometedoras en la ciencia de la información cuántica.



David Wineland

(*National Institute of Standards and Technology (NIST), Boulder, Colorado*) recibió una licenciatura de la Universidad de California en Berkeley en 1965 y un doctorado de la Universidad de Harvard en 1970. Ha sido miembro de la División Tiempo y Frecuencia del NIST (Instituto Nacional de Estándares y Tecnología) en Boulder, Colorado desde 1975, donde es líder de grupo y NIST Fellow. A partir de la escuela de posgrado, un objetivo a largo plazo de su trabajo ha sido aumentar la precisión de la espectroscopia atómica, la medición de las frecuencias de vibraciones características de los átomos.

Esto condujo a algunos experimentos que incorporan un control preciso de los niveles de energía atómica y de su movimiento. Estas capacidades permiten mediciones cuya precisión sólo está limitada por las restricciones de la mecánica cuántica y ofrecen demostraciones de las componentes básicas de un computador cuántico.

David Wineland ha recibido muchos premios y reconocimientos, incluyendo el **Premio Nobel de Física (2012)** junto con Serge Haroche, por “inventar métodos experimentales innovadores que les permitieron la medición y la manipulación de sistemas cuánticos individuales”.

El Grupo de Almacenamiento de Iones, el cual dirige el Dr. Wineland, es parte de la División de Tiempo y Frecuencia del NIST. Una actividad principal de la investigación del grupo es desarrollar patrones de frecuencia de alta precisión y relojes atómicos. Un avance importante hacia este objetivo fue la demostración del enfriamiento por láser por el grupo. El enfriamiento de átomos a temperaturas de alrededor de un milikelvin o menos, es importante para suprimir la incertidumbre debido a la dilatación del tiempo relativista de Einstein. Actualmente, los relojes más precisos se basan en oscilaciones a frecuencias ópticas en los átomos e iones. Extensiones del enfriamiento por láser condujeron a experimentos en los que el grupo demostró las primeras puertas lógicas deterministas en un sistema escalable de bits cuánticos de iones, en el que las puertas lógicas deben actuar en estados de superposición cuántica de bits. El enfriamiento láser también permitió la investigación de estados exóticos de la materia, tales como plasmas cristalinos y líquidos.

Conferencia plenaria

Relojes ópticos con un átomo individual

David Wineland

Con la disponibilidad de láseres espectralmente puros y la capacidad de medir con precisión las frecuencias ópticas, parece que la era de los relojes atómicos ópticos ha comenzado.

En un proyecto de reloj en el NIST hemos utilizado un único ión de Al⁺ atrapado para hacer un reloj basado en una transición ultravioleta. Con iones individuales las incertidumbres en los efectos sistemáticos son las más pequeñas, alcanzando un error fraccional de $f/f_0 = 8,0 \times 10^{-18}$. En este nivel, muchos efectos interesantes, como los debidos a la relatividad especial y general, deben ser calibrados y corregidos.



Ana María Rey

(*JILA, NIST and Department of Physics, University of Colorado, Boulder*) obtuvo su licenciatura en física en 1999 en la Universidad de los Andes en Bogotá, Colombia. Realizó sus estudios de postgrado en la Universidad de Maryland, College Park, recibiendo un doctorado en 2004. Su tesis doctoral, “Átomos bosónicos ultrafríos en redes ópticas”, fue reconocida por la Sociedad Americana de Física (APS) con el premio a la Tesis Doctoral Sobresaliente en Física Atómica, Molecular y Óptica en 2005. Rey luego se unió al Instituto de Física Molecular y Óptica Teórica en el Centro Harvard-Smithsoniano para Astrofísica como Postdoctoral Fellow de 2005 a 2008. Se vinculó como profesora a JILA, NIST y la Universidad de Colorado Boulder en 2008. Actualmente pertenece a JILA y se desempeña como profesor asociado de investigación en el Departamento de Física.

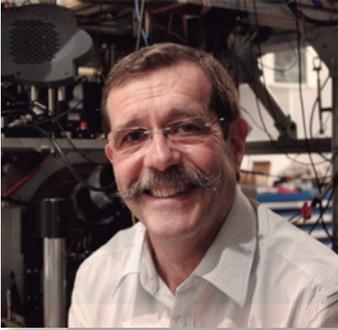
Busca desarrollar modelos teóricos para estudiar y sondear el magnetismo cuántico en los gases ultrafríos. En los últimos cinco años Rey recibió el Premio Nacional Hispanic Engineer al Mérito, la beca de la Fundación MacArthur, el Premio Presidencia a la carrera Temprana para Científicos e Ingenieros, el Premio APS María Goeppert Mayer, el Premio Museo de la Ciencia y la Industria a la Carrera Nacional Temprana de Científicos Hispánicos del Año y una beca de APS.

Conferencia plenaria

Nuevas perspectivas sobre la simulación cuántica de materia ultra-fría

Ana María Rey

Comprender el comportamiento de los electrones que interactúan en los sólidos o líquidos es la esencia de la ciencia cuántica moderna y es necesario para los avances tecnológicos. Sin embargo, la complejidad de sus interacciones en general, nos impide dar una descripción matemática exacta de su comportamiento. Los gases ultrafríos diseñados con ingeniería de precisión, se están convirtiendo en una poderosa herramienta para desentrañar estos difíciles problemas físicos. En la conferencia se presentarán recientes acontecimientos en el uso de los átomos y las moléculas en los cristales de luz como simuladores cuánticos de materiales de estado sólido y para la investigación de fenómenos complejos de muchos cuerpos.



Alain Aspect

(*Escuela de Posgrados del Institut d'Optique, Palaiseau, Francia*) es profesor de la escuela de posgrado del Institut d'Optique y de la Escuela Politécnica, en la Universidad de París-Saclay. Entre los muchos premios que ha recibido, se pueden citar la medalla de oro del CNRS en 2005, el Premio Wolf de Física en 2010, las medallas de oro y Niels Bohr, la medalla Albert Einstein en 2012 y el premio Balzan en información cuántica en 2014.

Alain Aspect es un físico conocido por sus experimentos que ilustran las propiedades más intrigantes de la mecánica cuántica: dualidad onda-partícula para una sola partícula y entrelazamiento de dos partículas. Sus pruebas experimentales de las desigualdades de Bell con pares de fotones entrelazados contribuyeron a resolver un debate entre Albert Einstein y Niels Bohr, que comenzó en 1935. Con sus colaboradores, también dio una comprobación sorprendente de la dualidad onda partícula de un solo fotón, y realizó el experimento de la celebrada idea de Wheeler acerca de la elección retardada.

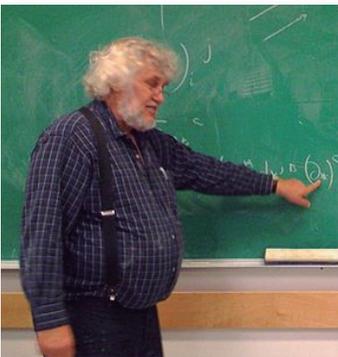
Después de su contribución al desarrollo de enfriamiento por láser de átomos, con Claude Cohen-Tannoudji, cambió su interés hacia los átomos, los cuales utiliza para explorar conceptos de interés en la óptica cuántica y como simuladores cuánticos de difíciles problemas de la materia condensada.

Conferencia plenaria

El efecto atómico Hong-Ou-Mandel: una nueva evidencia del entrelazamiento atómico

Alain Aspect

A pesar de que fue descubierto y demostrado después de la evidencia experimental de las violaciones de las desigualdades de Bell, el efecto de Hong-Ou-Mandel es una manifestación conceptualmente más simple del entrelazamiento y de los efectos de interferencia de partículas, imposibles de describir en términos clásicos. Al respecto, el Dr. Aspect indica que “tres décadas después de su demostración con fotones, lo hemos observado con pares de átomos He*. Esto abre el camino hacia la prueba de las desigualdades de Bell con observables mecánicos de partículas masivas”.



William G. Unruh

(*Canadian Institute for Advanced Research, Program in Cosmology and Gravity and Department of Physics & Astronomy, UBC, Vancouver, Canadá*) es profesor del Programa de gravedad, Instituto Canadiense de Investigación Avanzada de Física y Astronomía de la Universidad de British Columbia, Vancouver, Canadá (UBC), y Miembro y Director fundador del programa Cosmología y Gravitación, Toronto, Canadá. BSc (con honores) - University of Manitoba 1967, MSc - Princeton U 1969. PhD - Princeton U 1971. NSERC postdoctoral Fellow - Birkbeck College, Londres, Reino Unido (con R. Penrose) 1971-1972.

Varios reconocimientos, incluyendo Fellow APS, Miembro Extranjero Honorario del Instituto de Artes y Ciencias de Estados Unidos, Miembro de la Royal Society of Canada, Miembro de la Royal Society de Londres. Se interesa en la relación entre la gravedad y la mecánica cuántica, sobre todo en el universo temprano, en la detección de ondas de gravedad y los agujeros negros. Descubrió la radiación emitida por aceleración (un detector acelerado percibe el estado de vacío como un estado térmico con una temperatura proporcional a la aceleración, “radiación de Unruh”). También demostró que la radiación térmica de un agujero negro (radiación de Hawking) no se limita a los agujeros negros gravitacionales, porque también existe en otros horizontes (agujeros mudos).

Conferencia plenaria

Física, analogías, y agujeros negros

William G. Unruh.

Una de las áreas fructíferas de la física ha sido el uso de analogías. Con frecuencia, el reconocimiento de que una forma de la física es similar a otra, u obedece a las mismas ecuaciones de alguna otra área de la física, ha llevado a visiones que han aclarado y explicado ambas áreas. “Voy a ilustrar esto con la historia del Agujero Negro, de la evaporación de un agujero negro descubierta por Hawking y del líquido que fluye.

Esto ha llevado a los primeros experimentos para medir dicha radiación, que muestran su carácter térmico y tal vez incluso muestran la naturaleza cuántica de la misma”, indicó el Dr. Unruh sobre su conferencia.



Suzanne Fery-Forgues

(*Instituto de Tecnología Avanzada en Ciencias de la Vida, Toulouse, Francia*) es directora de investigación en el CNRS, el Centro Nacional de Investigación Científica de Francia. Es fotoquímica, especializada en la fluorescencia de los compuestos orgánicos. Después de una tesis doctoral sobre la fototoxicidad de drogas y una posición post-doctoral en Londres trabajando en la terapia fotodinámica, entró en el CNRS en París, donde trabajó por primera vez en sondas fluorescentes para la detección de iones de relevancia biológica.

Luego pasó la mayor parte de su carrera en Toulouse. Fue pionera en la investigación sobre nanopartículas orgánicas fluorescentes no dopadas. Durante los últimos tres años, ha sido responsable de un proyecto europeo destinado a desarrollar un nuevo dispositivo óptico para el diagnóstico de tumores.

Conferencia plenaria

Las nanopartículas orgánicas fluorescentes como una nueva herramienta para bio-imágenes in vivo

Suzanne FERY-FORGUES

El procesamiento de imágenes de fluorescencia *in vivo* ha surgido recientemente como una disciplina promisoría en la investigación biomédica básica y la práctica clínica.

Dentro de este campo, las nanopartículas orgánicas fluorescentes ofrecen varias posibilidades únicas. Un cuidadoso diseño les permite combinar el brillo, la biocompatibilidad y la selectividad respecto a tejidos específicos, por tanto, pueden proporcionar una visualización en tiempo real de la fisiopatología a escalas espaciales desde la subcelular hasta niveles de órganos enteros. Gracias a su versatilidad, son plataformas atractivas de acceso a la detección multimodal y a dispositivos teranósticos. “Como ejemplo, vamos a ver cómo se desarrollaron nanopartículas fluorescentes en el marco de un proyecto europeo para la detección de pequeños tumores de cáncer de esófago”, anticipa la Dra. Fery-Forgues.



Jean-Pierre Galaup

(*Laboratoire Aimé Cotton, Orsay cedex, Francia*). CNRS, Laboratoire Aimé Cotton, Orsay, Francia. Sus campos de especialización: espectroscopia molecular, espectroscopia vibracional, espectroscopía del agujero espectral, polímeros y xerogeles dopados con moléculas, agujero espectral de alta temperatura, espectroscopia de ecos de fotones, holografía espectro-temporal, dinámica de excitaciones vibracionales, pinzas ópticas.

Investigación actual: pinzas ópticas holográficas para el control completo de objetos microscópicos en 3D, ecos de fotones IR de moléculas pequeñas atrapadas en matrices criogénicas, polímeros y sol-geles dopados con moléculas para memorias ópticas y tecnologías de la información. Árbitro regular en varias revistas científicas, editor invitado en la Revista Cubana de Física.

Dentro de sus principales logros están los siguientes: átomos fríos y moléculas frías (experimentos y teoría), microscopía de foto-desprendimiento, control de átomos por láseres, captura láser de objetos individuales, tecnología de láseres monomodo de ultra-alta resolución y ultra-estables, procesadores atómicos y moleculares en sólidos para el almacenamiento óptico y manipulaciones cuánticas, y el desarrollo de dispositivos para las personas ciegas.

Conferencia plenaria

Pinzas ópticas

Jean-Pierre Galaup

Algunos aspectos históricos y principios fundamentales de la acción mecánica de la luz serán enunciados y explicados brevemente. Se explicarán los fundamentos de un experimento típico de pinzas ópticas. Una fecha importante es 1986, cuando el uso de un haz láser altamente enfocado a través de un objetivo de microscopio de gran apertura numérica revolucionó los métodos de captura y control de partículas de tamaño de micras o inferior a una micra. En algunos experimentos modernos, se logran configuraciones versátiles de trampas con luz mediante el uso de pinzas ópticas holográficas.

Por difracción de un haz láser Gaussiano sobre hologramas de fase computarizados y grabados en un modulador espacial de luz hecho con un cristal líquido, se consiguen fácilmente trampas ópticas múltiples y el control de la forma de un haz de luz. Se mostrarán ejemplos de la generación de rayos láser huecos conocidos como haces de Laguerre-Gauss. “En el marco de nuestro trabajo, hemos estudiado especialmente la captura de monocristales orgánicos con forma de paralelepípedo y hemos logrado la rotación de alta velocidad de estos microcristales mediante un haz de luz polarizada circularmente. Esta observación y otras de la literatura, abren grandes perspectivas para la realización de micro motores o dispositivos totalmente alimentados y controlados por la luz”, reseña el Dr. Galaup al respecto.



Paulo Sérgio Soares Guimarães

(*Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil*). Licenciado en Física en la Universidad Federal de Minas Gerais en 1979, obteniendo el grado de maestría en Física en 1982 en la misma universidad. Realizó estudios de doctorado en la Universidad de Nottingham en el Reino Unido, donde obtuvo el título en 1986. Post-doctorado en la Universidad de California en Santa Barbara, 1992-1993. Se vinculó como profesor en la Universidad Federal de Minas Gerais en 1988. Fue profesor visitante en la Universidad de Sheffield, Reino Unido, en el período 2004-2005. Tiene experiencia en Física de la Materia Condensada, especialmente en las propiedades de transporte ópticas y electrónicas de materiales y dispositivos

semiconductores. Sus intereses de investigación son cristales fotónicos, microcavidades, puntos cuánticos semiconductores y fotodetectores infrarrojos.

Conferencia plenaria

Puntos cuánticos y cristales fotónicos

Paulo Sérgio Soares Guimarães

Se presenta una introducción a las nanoestructuras de semiconductores conocidos como puntos cuánticos auto-ensamblados, que son una prometedora fuente de luz para la próxima generación de dispositivos ópticos. Se describen las principales formas de obtener estas estructuras, sus propiedades físicas y sus aplicaciones. Se presentará el concepto de estructuras de cristal fotónico, las formas en que se utilizan comúnmente para la fabricación y su uso y aplicaciones. Se muestra cómo los cristales fotónicos pueden ser utilizados en conjunción con los puntos cuánticos para implementar nuevos dispositivos ópticos basados en conceptos de la física cuántica. Se discuten algunos ejemplos de investigaciones recientes sobre los puntos cuánticos y cristales fotónicos.



Alejandro Mira-Agudelo

Grupo de Óptica y Fotónica, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, Físico de la Universidad de Antioquia- UdeA (2002), Magister en Física de la Universidad de Antioquia (2004), Doctor en Ciencias de la Visión de la Universidad de Murcia - España (2011).

Profesor del Instituto de Física de la Universidad de Antioquia desde el año 2004. Al inicio de sus estudios de posgrado trabajó en temas de óptica difractiva y óptica speckle. Luego en el doctorado abordó temas de Óptica Visual, sensores de frente de onda y medidas dinámicas. Actualmente colabora con el Grupo de investigación de la UdeA en temas de Encriptación Óptica y desarrolla la línea en Óptica Visual, trabajando en temas de medidas de calidad visual y presbicia. En compañía del profesor John Fredy Barrera, recibió el Premio a la Investigación Universidad de Antioquia, segunda categoría, en el 2014.

Conferencia plenaria (Medellín)

¿Cómo vemos el mundo?

Alejandro Mira-Agudelo

En 1875, el médico y físico alemán Hermann von Helmholtz expresaba con algo de humor que “no exagero en decir que si un óptico trata de venderme un instrumento (el ojo) que tenga todos esos defectos, estaría bastante justificado recriminarle en los términos más enérgicos su falta de cuidado y regresarle su instrumento”. A pesar de esta *reprimenda* proferida hace ya 130 años, hoy podemos decir que el ojo es un ejemplo paradigmático de un instrumento óptico relativamente simple pero maravilloso, que provee una excepcional funcionalidad. “Intentaremos explorar algunas de las características que poseen nuestros ojos que nos permiten contemplar el maravilloso mundo que nos rodea”, indica el Dr. Mira- Agudelo sobre su conferencia.



Alejandra Valencia

Desde Agosto del 2012, es profesora asistente del Departamento de Física de la Universidad de los Andes donde lidera el grupo de óptica cuántica experimental. Hizo sus estudios de pregrado en física en esta universidad y posteriormente, en el 2002, recibió su grado de Maestría en ciencias, y en el 2005, su título de doctora en física aplicada, ambos de la Universidad de Maryland en USA.

A partir de 2006, A. Valencia realizó trabajos de investigación post-doctoral en España e Italia enfocándose principalmente en el diseño de fuentes de pares de fotones enredados. Desde el 2010 hasta el 2012, Alejandra participó activamente en el desarrollo de actividades para llevar la fotónica, las ciencias de la luz,

a diversos públicos no especializados. En la actualidad, sus temas de interés son la generación, caracterización y uso de diversas fuentes de luz que van desde fuentes de fotones individuales hasta fuentes de luz de alta potencia.

Conferencia plenaria

Óptica cuántica experimental en la Universidad de los Andes

Alejandra Valencia

En los últimos años, la generación de la luz cuántica con correlaciones específicas ha sido un campo promisorio para el desarrollo de aplicaciones prácticas y el estudio de la física fundamental. Hoy en día, una de las fuentes más convenientes para generar pares de fotones correlacionados es el proceso óptico no lineal de conversión paramétrica espontánea (SPDC). La Dra. Valencia anuncia que “en esta charla, voy a describir el trabajo que estamos haciendo en la Universidad de los Andes para estudiar los diferentes grados de libertad de los fotones producidos por SPDC y su aplicabilidad más allá de sus usos habituales. En particular, el uso de pares de fotones SPDC para estudiar temas como la teoría de la medición y sistemas cuánticos abiertos”.



Boris A. Rodríguez

(*Instituto de Física, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia*) terminó la carrera de Física en la Universidad Nacional de Colombia luego de lo cual realizó sus estudios de maestría y doctorado bajo la dirección del profesor Augusto González en la Universidad Nacional y la Universidad de Antioquia en el área de Teoría Cuántica de Sistemas Finitos aplicada a sistemas de estado sólido. Desde su vinculación como profesor a la Universidad de Antioquia ha estado vinculado al Grupo de Física Atómica y Molecular. En la actualidad además de su interés en los Fundamentos de la Teoría Cuántica lidera el Grupo de “Fundamentos y Enseñanza de la Física y los Sistemas Dinámicos”.

Conferencia plenaria

Polarización de fotones individuales: la naturaleza cuántica de la luz

Boris A. Rodríguez

De la misma forma que las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo “nacen” relativistas, la polarización de la luz “nace” cuántica. El Dr. Rodríguez anuncia que “en esta charla presentaremos una discusión sobre los fundamentos de la teoría cuántica en donde se argumentará que la propiedad fundamental de los sistemas cuánticos es que sus propiedades no pueden definirse *a priori*.”

Cuantificaremos este resultado en la violación de una desigualdad elemental que satisfacen todos los sistemas clásicos. Usando como ejemplo especial la polarización de fotones individuales, mostraremos cómo los experimentos clásicos y cuánticos arrojan resultados aparentemente contradictorios. Finalmente describiremos un reciente experimento, realizado en conjunto con el Laboratorio de Óptica Cuántica de la Universidad de los Andes, en donde hemos puesto a prueba la desigualdad para fotones individuales.



John Henry Reina

(Grupo de Tecnología, Información y Complejidad Cuántica *QuantIC*; Centro de Investigación e Innovación en Bioinformática y Fotónica *CIBioFi*, Universidad del Valle, Cali, Colombia) es Físico y Máster en Física Teórica de la Universidad del Valle. Cursó D. Phil. en el Laboratorio Clarendon y el Centro de Computación Cuántica de la Universidad de Oxford, Reino Unido, donde trabajó en la interfaz entre la física del estado sólido y la óptica cuántica basada en nanoestructuras para el procesamiento de información cuántica. Obtuvo su doctorado a comienzos de 2002, y luego aceptó una oferta de becas de investigación conjunta entre los Departamentos de Física y de Materiales en Oxford para trabajar tres años como un teórico en el macroproyecto colaborativo sobre “Nanoelectrónica en la Frontera Cuántica” para el avance de las tecnologías cuánticas de Oxford-Cambridge y el Reino Unido. Fue el encargado de

llevar a cabo la investigación sobre computación cuántica con moléculas artificiales y orgánicas, y de la modelación de fenómenos de decoherencia en tales nanosistemas. En 2005, regresó a Cali, Colombia, al Departamento de Física de la Universidad del Valle. Desde entonces. Se interesa en el entrelazamiento cuántico, la complejidad, la decoherencia y su conexión con la macroscopicidad.

El profesor Reina trabaja en el control cuántico de moléculas y fotones para el procesamiento de información cuántica. Su grupo se encuentra actualmente en el proceso de construcción de dos laboratorios para la realización de la investigación básica en la información cuántica y la espectroscopía molecular ultrarrápida.

Conferencia plenaria

Fotones para el mañana: desde los computadores cuánticos hasta la agricultura de precisión

John Henry Reina

Sobre su conferencia, el Dr. Reina indica: “en esta charla, empezaré revisando algunos conceptos básicos de la lógica matemática y discutiendo cómo la física cuántica (fotones, en particular) permite la realización de un cierto tipo de puertas lógicas que de lo contrario serían “imposibles” por medios matemáticos puramente “convencionales”. Un interferómetro de Mach- Zender se utiliza para introducir un conjunto universal de puertas cuánticas y el principio de funcionamiento de un computador cuántico. Se presentarán algunos de nuestros avances en el uso de complejos biomoleculares de recolección de luz, y conjuntos de moléculas orgánicas (multicromóforas) para la transferencia de energía a pequeña escala (dímeros y trímeros), y control cuántico de correlaciones, de entrelazamiento y de puertas lógicas. Por último, voy a introducir los métodos de espectroscopia óptica y el uso de dispositivos fotónicos para la teledetección, especialmente diseñados para identificar especies moleculares atmosféricas (contaminantes), y la aplicación en agricultura de precisión, un aspecto clave de la recientemente financiada estrategia (EDS) para la creación de un Centro de Investigación e Innovación en Bioinformática y Fotónica-CIBioFi, en la ciudad de Cali (Colombia).

Versión en inglés en el siguiente enlace:

<https://dl.dropboxusercontent.com/u/2911945/AbstractsAuthors-IYL2015ColConf.doc>

Fuente: Boletín electrónico de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Vol. 3 No. 17. 2 de junio de 2015

Agradecimientos - Acknowledgements

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Volumen 39, suplemento Año Internacional de la Luz 2015

El Editor Invitado y el Comité Editorial de la Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales expresa sincero agradecimiento a los revisores que participaron en la valoración crítica de los artículos presentados al suplemento Año Internacional de la Luz 2015, por su valiosa contribución, esfuerzo y tiempo dedicado.



INTERNATIONAL
YEAR OF LIGHT
2015

Alejandro Mira
Álvaro Morales Aramburo
Daniel Velásquez Prieto
Gerhard Fischer
Jorge García-Sucerquia
Jorge Mahecha
Juan Carlos Granada
Luis Castellanos

María Álvarez Castaño
Marcelo Trivi
Marlon Fulla
Miriam Tebaldi
Rafael Baquero Parra
Rodrigo Henao Henao
Rubén Antonio Vargas
Yobani Mejía

Perfil

Ana Mejía McMaster

1986 Maestra en Artes Plásticas, Universidad Nacional sede Medellín, 1991 Maestría en Pintura Tradicional China: montañas y agua, Beijing Central Institute of Fine Arts, China.

Su trabajo ha estado marcado por los diferentes países donde ha vivido, China, Canadá y Colombia. Su producción se ha desarrollado desde diferentes medios como la pintura, la fotografía, la instalación y las intervenciones para sitio específico en espacio público.

Artista activa en el medio, ganadora de varios premios como la V Beca de Creación de Medellín, el 1er concurso para Intervenir Puentes Peatonales, Medellín y las Residencias Artísticas Internacionales en el Centro Banff, Canadá, San-Art en la ciudad de Ho Chi Minh, Vietnam y SAARI en la fundación Konen, Finlandia.

Ha expuesto nacional e internacionalmente en países como: Estados Unidos, Canadá, Argentina, China y Vietnam.

Ha sido docente en diferentes universidades y jurado en concursos nacionales.

Actualmente docente de la Facultad de Artes de la Universidad de Antioquia.

Autora de las instalaciones en las fotografías de la portada y de las páginas 19, 66 y 92.

Exposición Ana Mejía McMaster en los siguientes enlaces:

<http://www.ciudadcubica.com/AMMTour>

<http://www.ciudadcubica.com/aMariaExpColombo2/>

Enfoque y alcance

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN) es una publicación periódica trimestral, multidisciplinaria, que tiene como objetivo dar a conocer artículos inéditos de investigación de alta calidad.

La Revista publica artículos científicos en las áreas de ciencias físicas (física, físico-química, materiales y matemáticas); ciencias naturales (biología, botánica, zoología, ecología, bioquímica, química); ciencias de la tierra (geología, medio ambiente); ciencias humanas (filosofía, sicología, antropología, sociología); ciencias biomédicas y ciencias químicas, está reseñada en varios índices nacionales e internacionales tales como Actualidad Iberoamericana, Agris, CIRS (International Center for Scientific Research), Current Mathematical Publications, EBSCO, Dialnet, Historia Mathematica, Index Kewensis, Latindex, Mathematical Reviews, MathSciNet (on line data base), PERIODICA, SciELO, Online Computer Library Center – OCLC, Zentralblatt für Mathematik, Zoological Record, RLG. Nacionalmente se encuentra reseñada en la base de datos Publindex de Colciencias.

La página web de la Revista (www.raccefyn.co) permite el acceso libre y abierto a los artículos con el fin de contribuir a la visibilidad, al acceso y a la difusión de la producción científica.

El primer número se publicó en diciembre de 1936, año de creación oficial de la Academia, bajo la dirección del doctor Jorge Álvarez Lleras y hasta el momento se han editado 37 volúmenes.

Criterios para publicar

Indicaciones a los autores

Los autores deben tener en cuenta las siguientes indicaciones:

1. Los trabajos presentados deberán ser originales en inglés o español y de alto nivel sobre aspectos relacionadas con las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Todos los trabajos aceptados quedan como propiedad permanente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de manera que la misma podrá publicarlos en formato físico y electrónico, incluyendo internet (Ver transferencia de derechos de autor).
2. El autor de la correspondencia debe aceptar mediante comunicación escrita firmada que el manuscrito es un trabajo original y no ha sido publicado por ningún medio, ni está siendo evaluado por otra publicación impresa o electrónica y que ha sido aceptado por todos los autores para su publicación en la Revista y que los derechos de

autor no han sido cedidos a nadie con anterioridad (Ver formato declaración originalidad, conflicto de intereses y sesión de derechos de autor en la página web de la Revista: <http://www.raccefyn.co>).

3. La participación de los autores en el trabajo debe ser suficiente como para aceptar públicamente la responsabilidad de los aportes de cada uno. El orden de los autores en la publicación deberá ser una decisión compartida de los coautores, que deben ser capaces de explicar el orden en el que aparecen sus nombres.
4. De acuerdo con el ICMJE, todos los colaboradores que no cumplen los criterios de autoría o hayan realizado contribuciones menores deben aparecer en la sección de agradecimientos, pero no ser citados como autores. Las ayudas económicas y materiales deben aparecer en los agradecimientos.
5. La terminología física, química y bioquímica, debe seguir las normas del Comité de Nomenclatura de la Unión Internacional de la Química Pura y Aplicada (IUPAC). Deben usarse las abreviaturas internacionales convencionales y las unidades del Sistema Internacional (SI). Los nombres científicos se deben escribir con la forma recomendada por “International Code of Botanical Nomenclature”

Envío y presentación del manuscrito

Los artículos deben enviarse a través de <http://www.raccefyn.co>

El manuscrito, incluyendo además de la página del título, el resúmenes, las referencias, las tablas y sus títulos, las leyendas de figuras, deben estar escritos en procesador de palabras Word a doble espacio, usando la fuente Arial de tamaño 12, sin justificar el texto. No olvide usar la numeración en todo el manuscrito.

Los manuscritos deben incluir la siguiente información:

1. Una página en Word con los nombres y apellidos (nombre completo y apellido, si desea poner el segundo apellido, debe ir separado por un guion) de todos los autores (sin cargos, ni grado académico), filiaciones y correos electrónicos.
2. Título completo del manuscrito en español e inglés.
3. Título corto
4. Resumen en español y en inglés que no supere 250 palabras.
5. Palabras clave en español y en inglés que no superen en número a seis.

6. Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico y dirección electrónica.
7. Direcciones electrónicas de todos los coautores.
8. Texto, referencias y tablas en un mismo archivo junto con las leyendas de las figuras.
9. Figuras en formato jpg o tiff.

Estructura del manuscrito

Introducción: se debe mostrar el marco teórico en el cual se inscribe el tema de la investigación, propósito del artículo y justificación del estudio, indicando además la delimitación de la pregunta problema.

Materiales y métodos: se describirán los sujetos de observación o experimentación, aparatos o dispositivos y la metodología empleada en el estudio.

Análisis estadístico: señalar los métodos estadísticos utilizados y cómo se han analizado los datos.

Resultados: deben presentarse en secuencia lógica, con las tablas y figuras acompañadas de una explicación y análisis de las mismas.

Discusión: debe hacerse énfasis en los aspectos nuevos e importantes del estudio, contrastando los resultados con la información pertinente disponible en la literatura actualizada y relacionar las conclusiones con los objetivos propuestos. Se deben incluir las implicaciones y limitaciones de los hallazgos y comparar las observaciones relevantes con las de otros estudios.

Los resultados y la discusión pueden presentarse también en forma combinada. En cuyo caso la sección se denominará Resultados y Discusión.

Conclusiones: Resumen de la investigación y su estado actual. Aquí se pueden plantear objetivos futuros a seguir en la línea de investigación.

Citación: todas las referencias bibliográficas se insertarán en el texto y deberán llevar siempre el apellido del autor o autores y el año de publicación entre paréntesis. Si el apellido del autor o autores forma parte de la estructura formal de la frase, sólo se pondrá entre paréntesis la fecha; por ejemplo: Pérez y Ribas (1996). Si son tres, cuatro o cinco autores se pondrán los apellidos de todos los autores la primera vez que se referencian en el texto, y después sólo se pondrá el apellido del primer autor seguido de *et al.* Si son seis o más autores sólo se pondrá el apellido del primero añadiendo "*et al.*", desde la primera vez que se referencian. Si existieran varias referencias de un autor en un mismo año se consignarán con las letras a, b, c, etc., después del año.

Cita directa o textual

Si la cita textual tiene menos de 40 palabras se presenta entre comillas dentro del texto y al final se incluye entre paréntesis el apellido, año de publicación y la página de donde se extrajo.

Ejemplo:

El objetivo de los estudios explicativos es "responder a las causas de los eventos físicos o sociales" (Hernández, Fernández y Baptista, 1991, p.66).

Si la cita comprende más de 40 palabras se ubica en un bloque independiente del texto, sin comillas y dejando una sangría al lado izquierdo.

Ejemplo:

Las revistas científicas son sistemas contextuales de comunicación, de difusión académico investigativa y fortalecimiento de competencias científicas (escritura, investigación, evaluación, edición), en los cuales la comunidad académica comparte creencias, orientaciones y el compromiso de contribuir, utilizar y hacer avanzar el conocimiento de forma colaborativa y cooperativa. (Mesa & Sánchez, 2010, p.4).

Parafraseo o resumen

Se debe mencionar al autor y la fecha.

Ejemplo:

Según Sánchez (1991), el cemento es uno de los materiales más populares e indispensables en la construcción actual.

Existen dos tipos de aprendizaje: la recepción pasiva de conocimientos y el redescubrimiento de la realidad (Piaget, 1980).

Si se cita un documento escrito entre tres y cinco autores, deben escribirse los apellidos de todos la primera vez que se citen y después incluir el apellido del primer autor seguido de "*et al.*" (sin cursiva y con punto después del "al.").

Si se cita un documento escrito por seis o más autores, se presenta la primera cita con el apellido del primer autor seguido de "*et al.*". En la lista de referencias escriba las iniciales y apellidos de los primeros seis autores y para los restantes utilice "*et al.*"

Lista de referencia

Es el listado alfabético (según el primer apellido de los autores citados en negrilla) de las fuentes consultadas y citadas durante la redacción de un trabajo. La lista de referencias es obligatoria. Se deben citar de la siguiente manera:

Libros

Autor. Año. Título completo. Edición. Editorial, lugar de publicación, página

Ejemplo:

Ramírez J. E., S.J. 1975. Historia de los terremotos en Colombia. Segunda edición. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, 250 pp.

Revista seriada

Autor, A.A., B.B. Año. Título del artículo. Título de la revista publicación seriada, volumen (número entre paréntesis), páginas del artículo.

Ejemplo:

Ríos, L., Riva, F., Canaquire, L. 2008. Reporte situacional del tráfico ilegal de fauna silvestre en la Rev. Acad. Colomb. Cienc. 38(147):218-22.

Artículo de revista electrónica

Ejemplo:

Sarabia A., Cifuentes H., Dimate M. 2006. Estudio macrosísmico del sismo ocurrido el 12 de julio de 1785. Ingeominas. Bogotá. Fecha de consulta. Disponible en: <http://aplicaciones1.ingeominas.gov.co/sicat/html/Metadato.aspx?CID=239714>

Artículo de periódico impreso:

Ejemplo:

Duque, J. G. 7 de junio de 2012. Antioquia reasume competencia para decidir futuro del túnel. El Colombiano, pp. 10.

Tesis

Ejemplo:

Gómez Capera A.A. 1998. *Atenuación de la intensidad sísmica para el territorio colombiano*. Tesis de grado en Física, Facultad de Ciencias, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Congresos y simposios

Ejemplo:

Sánchez Upegui, A. A. Octubre 2010. *Aplicación de la lingüística textual en los criterios de evaluación de artículos académicos e investigativos*. En Simposio Nacional de Pedagogía y Currículo. Red Colombiana de Pedagogía, Medellín

Trabajos inéditos o publicaciones informales

Si el trabajo está disponible en un sitio web institucional o personal agregue el nombre de la institución y URL.

Ejemplo:

Jaramillo, G. 2012. El patrimonio arquitectónico. Manuscrito inédito. Departamento de Artes, Universidad Latinoamericana. Disponible en: <http://..>

Materiales legales

En cuanto a las citas en el texto se proporcionan los mismos datos de cualquier referencia, autor, año y en lo posible

número de página, si no hay un autor identificado, se anotan las primeras palabras del título y la fecha.

Ejemplo:

Colombia. Ministerio de Educación Nacional. Ley 23 de 1982 sobre derechos de autor.

Tablas y figuras

Las tablas y cuadros se denominan tablas y llevan numeración arábiga de acuerdo con el orden de aparición. El título correspondiente se coloca en la parte superior de la tabla y las notas en la inferior. Los símbolos para unidades deben aparecer en el encabezamiento de las columnas. Si es necesario exponer alguna información, utilice las letras minúsculas del alfabeto según orden de aparición en la respectiva tabla: a, b, c, d, e, etc.

Las fotografías, gráficos, dibujos y esquemas se denominan figuras, se enumeran según el orden de aparición y sus leyendas se escriben en hoja separada. Si se trata de micro fotografías debe indicarse el aumento utilizado. Las personas, o sus nombres, no deben ser identificables en las fotografías de lo contrario se requiere permiso escrito para su publicación.

Cuando las tablas y figuras hayan sido tomadas de revistas o libros, sean impresos o electrónicos, se debe especificar la fuente y adjuntar autorización de la respectiva publicación para su reproducción.

Agradecimientos

Podrán ser expresados a personas o entidades que hayan ayudado a la realización del trabajo. Se mencionarán las personas y el tipo de ayuda aportada, así como las entidades, instituciones o fundaciones que hayan financiado o suministrado materiales. En caso de proyectos de investigación financiados será suficiente con mencionar el código de registro y la entidad, institución o fundación que lo apoya económicamente.

Proceso de revisión por pares

Se recibirán solo los artículos que cumplan con todos los requisitos que se mencionan en las indicaciones a los autores. Los artículos serán evaluados en primera instancia por el Editor y el Comité Editorial de la Revista.

Cada manuscrito será enviado a dos especialistas en el tema, que evaluarán y enviarán sus recomendaciones. Este proceso de revisión tendrá una duración de 20 días.

El editor informará a cada uno de los autores el avance de su trabajo en el proceso de evaluación.

Los pares académicos adoptan tres opciones: a) aceptación sin modificaciones; b) aceptación con correcciones; c) no aceptación. En caso de desacuerdo de los pares, el original será enviado a una tercera evaluación.

En cualquiera de las opciones, el autor será informado y deberá realizar las modificaciones correspondientes en el manuscrito y enviarlo en las cuatro semanas siguientes. Además deberá enviar un documento en el que responda a todas las observaciones hechas por los evaluadores.

Cuando el autor demore más de 30 días en responder a las sugerencias de los evaluadores, el artículo no será considerado para publicación en el siguiente número de la revista. En caso de sobrepasar dicho plazo, se entenderá que los autores retiran el trabajo en su forma actual y, si se remite de nuevo, el Comité Editorial de la Revista podrá considerar que se trata de un nuevo trabajo.

Los trabajos aceptados son propiedad de la Revista ACCEFYN y podrán ser reproducidos total o parcialmente por la Revista.

La Revista no se hace responsable de los contenidos científicos ni de las implicaciones legales de los artículos publicados.

Corrección de estilo y publicación del manuscrito

Aceptados los artículos estos se enviarán a corrección ortotipográfica. Se usará la herramienta de control de cambios de Word, en la cual quedará registro de cada una de las sugerencias realizadas y los comentarios o dudas para que el autor o autores aprueben y contesten.

La versión corregida deberá ser enviada nuevamente para su aprobación definitiva en un plazo mínimo de 48 horas. El manuscrito deberá ir con una carta al editor, informando cuales correcciones fueron procesadas. El editor le informará al autor la fecha y el número del volumen en que será publicado.

Rectificaciones y correcciones de errores

Las rectificaciones sobre la información suministrada por parte de los autores, se harán en el número inmediatamente posterior al anuncio de las mismas y serán responsabilidad de los mismos autores. La Revista se encargará de publicar una nota aclaratoria a manera de erratas. En el caso que sean necesarias mejoras y corrección de errores ortotipográficos, de manejo visual de la información o imprecisiones involuntarias, el (los) autor(es) podrán comunicarse al correo de la Revista para que puedan realizarse en las versiones electrónicas de la Revista.

Falsificaciones de artículos

Si en el proceso editorial se encuentra falsificación, omisión de datos, duplicidad del artículo o plagio, se devolverá el original al autor con la debida notificación a su institución patrocinadora, centro de investigación o universidad.

Conflicto de intereses

Si los autores o coautores, editores o revisores (evaluadores) tienen algún conflicto de interés que pueda de alguna manera

influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación, éste debe ser declarado.

Los conflictos de interés más evidentes son los llamados conflictos financieros, resultado de relaciones entre empleador-empleado, financiaciones y patentes, así como también honorarios, consultorías, investigación pagada por compañías que dependen de los resultados investigativos, etc.

También existen los conflictos personales resultado de amistades o animadversiones, competencias académicas y pasiones en el campo intelectual o moral (por ej. parientes en una compañía que se beneficiaría de los resultados que se van a publicar, el uso de los resultados publicados para promoción inmediata basada en el artículo publicado, creencias religiosas que estén en conflicto directo con la investigación que se va a publicar, etc.

Transferencia de derechos de autor

En caso de que el artículo enviado sea aprobado para publicación, el autor principal en nombre propio y en el de los coautores o el autor principal y los coautores deben ceder los derechos de autor del artículo mencionado a la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), excepto en los siguientes casos:

a) Los autores y coautores retienen el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, presentaciones orales y distribuir a algunos colegas impresos de su propio trabajo publicado, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN. También pueden publicarse el título del trabajo, resumen, tablas y figuras del trabajo en los correspondientes sitios web de autores o de sus empleadores, también dando el crédito a la revista de ACCEFYN.

b) Si el trabajo ha sido realizado por contrato, el empleador del autor tiene el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, reproducir o distribuir en formato impreso el trabajo publicado, de una manera segura y para el uso exclusivo de sus empleados.

c) Si a la revista de ACCEFYN se le solicitara permiso individual por terceras personas para usar, imprimir o publicar específicamente artículos ya publicados, deberá obtenerse el permiso expreso del autor y coautores del trabajo y/o del empleador con excepción del uso en salones de clase, bibliotecas o reimpresos en un trabajo colectivo.

d) La revista ACCEFYN se reserva el posible uso en la portada de la revista, de figuras sometidas a revisión junto con los manuscritos.

e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN).

| To our readers and authors

Criteria for publication

Information for Authors

The authors must adhere to the following requirements:

1. The works submitted must be original, in English or Spanish, and of high quality in an area related to the Exact, Physical or Natural Sciences. All works accepted will remain permanent property of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences so that such work can be published in hard copy or in electronic format, including web posting. (See transference of authors' rights).
2. The author submitting the work must confirm via written and signed communication that the manuscript represents original work and that it has not been published in any form, and that it is not under review by any other publisher for publication in hard copy or in electronic format and that publication in the Revista has been agreed by all authors, and the authors' rights have not been previously granted to a third party. (See form for declaration of originality, conflicts of interest, and authors' rights).
3. The participation of the authors in the submitted work must be materially sufficient so as to share in the public responsibility of its contents. The order of appearance of the each of the authors of the publication must reflect a decision shared by all the co-authors, each of whom must be prepared to justify the order in which his name appears.
4. In accordance with the ICMJE (www.raccefyn.co), all collaborators who do not comply with the criteria for authorship, or who have realized minor contributions must be included in the Acknowledgement Section, and must not be cited as authors. The Acknowledgement Section must also include reference to any financial and economic assistance.
5. The terminology must adhere to the International Code for Botanical Nomenclature. The physical, chemical or biochemical terminology norms of the Nomenclature Committee of International Union for Pure and Applied Chemistry (IUPAC). The abbreviations must follow the international conventions as well as the units must conform to the International System (SI). The scientific names must be written in the format recommended by the "International Code of Botanical Nomenclature".

Submission and Presentation of manuscript

The manuscripts should be submitted using the website of the Academy: <http://www.accefyn.co>

The manuscript, including the title page, the abstract, tables with titles, graphics with descriptive legends, must be prepared in Microsoft WORD processor in double space. Use Areal font size 12 without justification. Do not forget to number the entire manuscript.

The manuscripts must contain the following information:

1. A page in Microsoft Word with the names and surnames (complete name , first and second family name separated by a hyphen) of all the authors (without positions, and without academic degrees), academic affiliations and email addresses.
2. Complete manuscript title in Spanish and English.
3. Short Title
4. Abstract in Spanish and English using 250 or less words
5. Key words in Spanish and English not containing more than 6 words.
6. Name of the author responsible for all correspondence, including his complete address, telephone number and email address.
7. Electronic addresses of all the co-authors.
8. Text, bibliographical references and tables in the same file together with the legends for all the figures.
9. Figures must be in jpg or tiff format.

Manuscript Structure

Introduction: there must be a clear description of the theoretical framework of the theme of the investigation, purpose of the article and justification of the study, indicating the limitation of the problem question.

Materials and methods: a description of the object of observation or experimentation, instruments or devices and the methodology employed in the study.

Statistical analysis: indicate the statistical methods used and the data analysis employed.

Results: these must be presented in a logical sequence, with the accompanying tables and figures with their respective explanations and analysis.

Discussion: emphasis must be given to those aspects of the study which are new and important, contrasting the results with the relevant information available in the recent literature and relate the conclusions with the proposed objectives. Mention must be made of the implications and limitations of the results found and a comparison of the relevant observations with that of other studies.

The results and the discussion may also be presented in a combined form.

Conclusion: an up to date survey of the investigation. Mention can be made here of future objectives of the same line of investigation.

Bibliography: these citations must be verifiable, enumerated and referred to in the body of the article enclosing each number with square brackets. When a citation is made, indicate in the text the author, the year and page in the following way:

Direct or textual quotation

If the textual citation has under 40 words it should be given in between quotation marks within the text and at the end it should include in parenthesis the surname, the year of publication and the page from which it was extracted.

Example:

The objective of the explicative studies is “to respond to the causes of the physical or social events” (Hernández, Fernández and Baptista, 1991, p.66)

If the citation goes over 40 or more words it must be placed in a separate block independent of the text, without quotation marks allowing for bleeding on the left margin.

Example:

The scientific journals are contextual system of communication, of academic or investigative diffusion and strengthening of scientific competence (writing, investigation, evaluation, editing), in which the academic community shares beliefs, orientation and the commitment to contribute, use and advance the formal knowledge of collaboration and cooperation. (Mesa & Sánchez, 2010, p.4)

Paraphrase or summary

Mention must be made of the author and the date.

Example:

According to Sánchez (1991), cement is one of the most popular and indispensable materials in today’s construction.

There exist two types of learning: the passive reception of knowledge and the rediscovery of reality (Piaget, 1980)

If a cited document has between three or five authors, the surnames of all the authors must be given the first time they are cited and afterwards include the surname of the first author followed by “et al.” (not in italics and with a period after the “al.”).

If a cited document has six or more authors, place the first citation with the surname of the first author followed by “et al.” In the bibliographical list write the initials and surnames of the first six authors and for the rest use “ et al.”

Bibliographical list

It is the list, in alphabetical order (according to the first surname of the cited authors, which should be in bold) of the sources consulted and cited in the text of the article. It is mandatory to include the bibliographical list. It should be cited in the following way:

Books

Author. Year of publication. Title of the book. Edition. Publisher, place of publication, page(s).

Example:

Ramírez J. E., S.J. 1975. Historia de los terremotos en Colombia. Segunda edición. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, 250 pp.

Article from periodical journal

Author, A.A., Author, B.B. Year. Title of the article. Title of the journal, volume (number in parenthesis), pages.

Example:

Ríos, L., Riva, F., Canaquire, L. 2008. Reporte situacional del tráfico ilegal de fauna silvestre en la en la región nororiental del Perú. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 38(147):218-22.

On line periodical article

Example:

Sarabia A., Cifuentes H., Dimate M. 2006. Estudio macrosísmico del sismo ocurrido el 12 de julio de 1785. Ingeominas. Bogotá. Date of query: (day, month, year). Available at: <http://aplicaciones1.ingeominas.gov.co/sicat/html/Metadato.aspx?CID=239714>

Newspaper article

Example:

Duque, J. G. 7 de junio de 2012. Antioquia reasume competencia para decidir futuro del túnel. El Colombiano, pp. 10.

Thesis

Example:

Gómez Capera A.A. 1998. *Atenuación de la intensidad sísmica para el territorio colombiano*. Tesis de grado en Física, Facultad de Ciencias, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Congresses and symposia

Example:

Sánchez Upegui, A. A. Octubre 2010. *Aplicación de la lingüística textual en los criterios de evaluación de artículos académicos e investigativos*. In: Simposio Nacional de Pedagogía y Currículo. Red Colombiana de Pedagogía, Medellín

Unpublished manuscript or informal publications

If the work is available at an institutional or personal web site, please add the name and URL of the institution.

Example:

Jaramillo, G. 2012. El patrimonio arquitectónico. Manuscrito inédito. Departamento de Artes, Universidad Latinoamericana. Recuperado de <http://...>

Legal documents

Regarding the citations in the text, the same data included in all other references should be provided (author, year, and if available, the same page number). If there is no identifiable author, the first words of the title should be noted, as well as the date.

Example:

Colombia. Ministerio de Educación Nacional. Ley 23 de 1982 sobre derechos de autor.

Tables and graphics

The tables and frames are called tables and carry an arabic numeration in accordance with the order in which they appear. The corresponding title is placed on the upper part of the table and notes are placed in the lower part. Symbols for unit measures must appear in the column headings.

If it is necessary to display some information, use lower case letters from the alphabet according to the appearance of the table: a, b, c, d, e, etc.

Photographs, graphics, pictures or sketches are named figures, are enumerated in order of appearance, and their legends must be written in a separate page. With respect to microfiches, indicate the size of the augmentation used. People or their names should not be identifiable in photographs, unless written permission for their publication has been obtained.

When tables and figures have been taken from magazines or books, published in hard copy or electronically, specify the source and include the authorization for its reproduction from the respective publication.

Acknowledgments

These can be expressed to persons or entities who have aided in the realization of the work. Mention is made of persons and their type of aid provided, as well as to entities or institutions which have provided financial and material assistance. In case of investigative projects with financial support it suffices to mention the registry code and the entity, institution or foundation which provided the economic support.

The peer-review process

Only articles which comply with the requirements mentioned in the information for authors will be accepted. The articles

will be given their first evaluation by the Editor and the Editorial Committee of the Revista.

Each manuscript will be sent to two experts on the topic who will provide recommendations after review and evaluation. This process of revision will have a duration of 30 days.

The editor will inform each of the authors of the status of the process of evaluation of their work.

The academic peers will adopt one of three options: a) acceptance without modifications; b) acceptance with corrections; c) Deny acceptance. In case of disagreement among the peers, the original manuscript will be sent out for a third evaluation.

Under any of the three options, the author will be informed and must follow the corresponding modifications of the manuscript and return it within the following four weeks. In addition, the author(s) must provide a written document with answers to all the peers observations.

If the author takes more than 30 days to respond to the suggestions from the reviewers, the article will not be considered for publication in the next issue of the Revista. In case the response from the author takes longer than the allocated time, it is understood that the authors will retrieve the work in its present form and, if a new submission is made, the Editorial Committee of the Revista may treat it as a new work.

The works accepted for publication become property of the Revista ACCEFYN and may be reproduced in their entirety or partially by the Revista.

The Revista does not assume responsibility for the scientific content, nor for the legal implications of any of the published articles.

Publication of the manuscript

Once the article has been accepted, it will undergo a style and format revision which will bring it to its definitive version. The authors will receive the galley proofs in PDF format for the correction of errors before its printing. The corrected version must be returned for final approval within a period of 48 hours. The manuscript must be accompanied with a letter to the editor informing him of the corrections that were carried out. The editor will inform the author of the date and volume number in which the publication will appear.

Conflicts of interest

If the authors or co-authors, the editors or reviewers (evaluators) have some conflict of interest which may in any way influence the transparency and objectivity of the peer review process and publication, it must be so declared.

The most obvious conflicts of interest are those referred to as financial conflicts, which result between, employer-employee, investments and patents, as well as honoraria, consulting, paid investigation by companies which depend on the investigative results, etc.

There also exist personal conflicts arising from friendships, animosity, academic competencies and passions in the moral or intellectual field (for example relatives in a company which will benefit from the results to be published, the use of the results for immediate promotion based on the published article, religious beliefs which are in direct conflict with the investigation that will be published, etc).

Transfer of author rights

In case the article is approved for publication, the main author in representation of himself and his co-authors or the main author and his co-authors must cede the author rights of the corresponding article to the Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCFYN), except in the following cases:

a) The authors and co-authors will retain the right to revise, adapt, prepare derived works, oral presentations and distribution to some colleagues of reprints of their

own published work, as long as the corresponding credit is given to the Revista of ACCEFYN. It is also permissible to publish the title of the work, summary, tables and figures of the work in the corresponding web sites of the authors or their employers, also giving credit to the Revista of ACCEFYN.

b) If the work has been realized under contract, the author's employer has the right to revise, adapt, prepare derivative works, reproduce or distribute in hard copy the published work, in a secure manner and for the exclusive use of his employees.

c) If the Revista of ACCEFYN were approached for permission by a third party for using, printing or publishing specifically articles already published, the Revista of ACCEFYN must obtain the express permission of the author and co-authors of the work and/or of the employer with the exception of use in classrooms, libraries, or reprinted in a collective work.

d) The Revista of ACCEFYN reserves the possible use in its front cover of figures submitted with the manuscripts.

e) No other right, other than the author's right, can be claimed by the Revista of ACCEFYN.

