



INFORMADOR TÉCNICO



Volumen 82 Número 1 Enero - Junio 2018 • ISSN 0122-056X • e-ISSN 2256 - 5035

SENNOVA

Sistema de Investigación,
Desarrollo Tecnológico e Innovación



ISSN 0122-056X

e-ISSN 2256 - 5035

DOI: <https://dx.doi.org/10.23850/issn.2256-5035>

Tarifa Postal Reducida No. 2018 - 179 4-72,

vence 31 de Dic. 2018

ASTIN
CENTRO NACIONAL DE ASISTENCIA
TÉCNICA A LA INDUSTRIA



INFORMADOR TÉCNICO

Informador Técnico
Título Abreviado: Inf. Téc.
ISSN 0122 - 056X
e-ISSN 2256 - 5035
Periodicidad: semestral
Enero - Junio 2018

Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA, Regional Valle
Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria - ASTIN

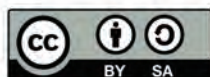
Calle 52 # 2Bis - 15
Teléfonos: 57 (2) 431 5800 ext. 22694
Email: revistaitastin@sena.edu.co
http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec
Cali, Valle del Cauca, Colombia



DOI: <https://doi.org/10.23850/issn.2256-5035>

<http://revistas.sena.edu.co>

Indexada en:



Equipo Editor

Director general

José Antonio Lizarazo Sarmiento, MSc.
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Director Regional Valle

Cesar Alveiro Trujillo Solarte, MSc.
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Coordinador Sennova

Emilio Eliecer Navia Zúñiga
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

**Subdirectora Centro Nacional de
Asistencia Técnica a la Industria –ASTIN
Directora Informador Técnico
Aura Elvira Narváez Agudelo, MSc.**
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Editora

Carolina Caicedo, PhD.
Investigadora
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Editor Asociado

Miguel Angel Solís Molina, PhD.
Coordinador del Servicio de Información y
Divulgación Tecnológica –SIDT
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Asistentes Editoriales

Andrés Felipe Torres, MSc. Investigador SENNOVA.
Jaime Alberto Gálvez, PhD. Investigador SENNOVA.
Lina Marcela Crespo, MSc. Investigador SENNOVA.
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Traductor

David Rojas Velásquez, MSc. Traducción Científica
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Coordinadora Editorial

Julia Emma Zúñiga Rivera, Esp.
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Diagramación Editorial

Elizabeth Enriquez Quintero
Diseñadora Gráfica
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Auxiliar de Edición

Ana María Cortés Rosero
Profesional en Comercio Exterior
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Impresión

Ingeniería Gráfica S.A.S
Tiraje: 40 ejemplares
Enero - Junio de 2018

Comité Editorial/Científico

Eric Campos Cantón

PhD. en Matemáticas Aplicada, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.
San Luis Potosí, S.L.P.,
México

Gilberto Bejarano Gaitán

PhD. en Ingeniería con énfasis en Materiales.
Docente investigador Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales. Universidad de Antioquia, Medellín,
Colombia

Henry A. Colorado Lopera

PhD. en Ingeniería de Materiales.
University of California, Los Ángeles,
EE.UU.

Héctor Fabio Zuluaga Corrales

PhD. en Química. Jefe Departamento de Química,
Universidad del Valle, Cali,
Colombia

José Luis Munuera Alemán

PhD. en Ciencias Económicas y Empresariales
Universidad de Murcia,
España

José Ignacio Huertas

PhD. en Ciencias, M.Sc. en Ingeniería Mecánica.
Director del CIMA, Instituto Tecnológico y Estudios Superiores de Monterrey,
México

Juan Muñoz Saldaña

PhD. Profesor Investigador, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional - Cinvestav - Unidad Querétaro -
México

Pedro José Arango Arango

PhD. en Ingeniería y Tecnología de Materiales.
Director Laboratorio de Física de Plasma, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales,
Colombia

Roberto Briones Gallardo

PhD. en Ciencias Fisicoquímicas del Medio Ambiente,
Universidad Autónoma de San Luis Potosí -
México

Ruby Mejía de Gutiérrez

PhD. en Ciencias Químicas, profesora titular,
Coordinadora del programa de posgrado de la Escuela de Ingeniería de Materiales. Directora Grupo de Materiales Compuestos, Universidad del Valle, Cali,
Colombia

Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA
ISSN: 0122-056X (impresa)
e-ISSN: 2256-5035 (on line)
DOI: <https://dx.doi.org/10.23850/issn.2256-5035>

Comité Evaluador Volumen 82n1

El INFORMADOR TÉCNICO agradece a los investigadores que actuaron como evaluadores:

Alejandro Moncayo-Lasso

Colombiano. PhD. Universidad Antonio Nariño,
Colombia.

Alfredo Maciel Cerda

Mexicano. PhD. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM),
México

Álvaro Guzmán Aponte

Colombiano. PhD. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito,
Colombia.

Ana María Aguirre Guerrero

Colombiana. PhD. Estancia posdoctoral Universidad del Valle,
Colombia.

Carlos Alberto Echeverry Gonzalez

Colombiano. PhD. Centro Internacional de Vacunas,
Colombia

Carlos Humberto Acevedo Peñaloza

Colombiano. PhD. Universidad Francisco de Paula Santander,
Colombia.

David Mauricio Giraldo Gómez

Colombiano. PhD. Universidad Nacional Autónoma de México
(UNAM), México.

Eduardo Ramírez Lasso

Colombiano MSc. en Ingeniería. Universidad Autónoma de Occidente,
Colombia.

Edwin Alberto Murillo Ruiz

Colombiano. PhD. Universidad Francisco de Paula Santander,
Colombia.

Iván David Patiño Arcila

Colombiano. PhD. Universidad Pontificia Bolivariana,
Colombia.

Jenny Alejandra Mera Córdoba

Colombiana. MSc. Institución Universitaria CESMAG,
Colombia.

Jhon Jairo Rios Acevedo

Colombiano. PhD. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA,
Colombia.

Jimmy Alexander Morales Morales

Colombiano. PhD. Universidad Santiago de Cali,
Colombia.

Johanna Mercedes Mejia Arcila

Colombiana. PhD. Consultora Independiente,
Colombia

Juan Manuel Montés Hincapié

Colombiano. PhD. Universidad de Medellín,
Colombia.

Julián Andrés Rengifo Herrera

Colombiano/Argentino. PhD. Consejo Nacional de Investigaciones
Científicas y Técnicas,
Argentina.

Luis Octavio González Salcedo

Colombiano. PhD. Universidad Nacional de Colombia,
Colombia.

Manuel Alejandro Mayorga Betancourt

Colombiano. PhD. Universidad ECCI,
Colombia.

Mónica Villaquirán

Colombiana. PhD. Universidad del Valle,
Colombia.

Pablo Octavio Loyola González

Argentino. Doctor en odontología. Universidad Nacional de Córdoba,
Argentina.

Patricio Fabián Oliva Mella

Chileno. MSc. Universidad del Desarrollo,
Chile.

Rocío Rueda Ortiz

Colombiana. PhD. Universidad Pedagógica Nacional,
Colombia.

Rodrigo Andrés Sarria Villa

Colombiano. PhD. Universidad del Cauca, Colombia

Sandra Margarita Villarreal Villa

Colombiana. MSc. Corporación Universidad de la Costa- CUC,
Colombia

Santiago Quintero Ramírez

Estadounidense/Colombiano. PhD. Universidad Pontificia Bolivariana,
Colombia.

Revista Informador Técnico

Misión: El Informador Técnico es una publicación semestral del Servicio Nacional de Aprendizaje, SENA - Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria (ASTIN), y publica artículos de alta calidad en las áreas de: Ingeniería de Materiales, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica e Informática, Ingeniería Ambiental, Biotecnología, Diseño Industrial, Gestión del Conocimiento, Innovación y Desarrollo Tecnológico, Prospectiva y Vigilancia Estratégica: Tecnológica y de Mercados, bajo la autoría de funcionarios del SENA e investigadores a nivel nacional e internacional.

Visión: Ser una revista que genere interés entre los investigadores de las áreas de conocimiento de la misma, para publicar artículos con calidad científica y visibilidad en las bases de datos y repositorios de alto reconocimiento en la comunidad científica.

Evaluación de artículos: La revista cuenta con un sistema de evaluación a ciegas por parte de académicos y/o expertos investigadores en el campo de estudio de la investigación, adscritos a instituciones diferentes a las de los autores. Todos los manuscritos recibidos serán leídos previamente por los editores y si cumplen con las directrices de la revista, se asignará su evaluación a los árbitros respectivos.

Redacción de manuscritos: El Informador Técnico sigue los lineamientos de Colciencias para la indexación de las publicaciones seriadas, dando preferencia a los artículos de investigación, reflexión y de revisión. Se puede consultar la **Guía abreviada para la presentación de artículos** o el documento instrucciones a los autores disponible en el sitio web http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/about/submissions#authorGuidelines

Recepción de documentos y correspondencia: Los artículos pueden ser enviados al correo electrónico: revistaitastin@sena.edu.co ó a través de la plataforma OJS. http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec

Distribución de la revista: Se realiza en formato impreso a los depósitos legales y a los autores; la versión electrónica se encuentra disponible en la página web: http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/about/editorialPolicies#custom-3 y podrá ser descargada, también podrá ser solicitada mediante correo electrónico.

Financiación de la revista: La financiación de la revista es responsabilidad del SENA-Centro ASTIN, y de SENNOVA.

Suscripción: Para suscribirse descargue el formato en la página web de la revista: http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec

Reproducción de artículos: Se autoriza la copia de artículos para fines académicos, citando la fuente respectiva.

Acceso en línea: http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec

Indexada: Publindex (Colciencias), DOAJ (Directory of Open Journal Access), EBSCO Fuente Académica Plus, ProQuest Metadex, Latindex, Actualidad Iberoamericana, REBIUN (Red de Bibliotecas Universitarias Españolas), Dialnet, Periódica, Road, Informe Académico, REDIB (Red Iberoamericana), Biblat.

Informador Técnico Journal

Mission: The technical informer Journal, semiannually published by The National learning service (SENA) National center of technical assistance to the industry (ASTIN), publishes high quality articles, authored by SENA associates and national and international researchers, in areas such as: Materials engineering, Chemical engineering, Mechanical Engineering, Electronic and computer engineering, Environmental engineering, biotechnology, industrial design, knowledge management, innovation and technological development, foresight and strategic surveillance: technology and markets.

Vision: Be a journal that will generate interest among researchers in the journal's areas of interest to publish their articles with scientific quality and visibility in large data repositories.

Article Evaluation: The journal counts with a blind evaluation system by experienced academics and / or researchers in the field of study assigned registered in different research institutions of from the author's. All manuscripts submitted will be read by the editors and if they meet the journal's guidelines, an evaluation will be assigned by the respective judges.

Manuscript drafting: The technical informer journal follows Colciencia's guidelines for indexing publications with serial, giving preference to the research, reflections and revision articles. You can check the abbreviated guide for submitting articles or the instruction document for authors, you can access the website http://sena.metarevistas.org/index.php/inf_tec/about/editorialPolicies#custom-0

Document reception and mail: The full papers can be send trough the follow e-mail address: revistaitastin@sena.edu.co or the full papers will be submitted through the OJS-platform: http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec

Distribution of the journal: It is done in printed format to the legal depositors and the authors; virtual, via email, it can be downloaded from the website http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/about/editorialPolicies#custom-3

Financing of the journal: The funding of the journal is responsibility of SENA - ASTIN center and SENNOVA.

Subscription: To subscribe download the format from the journal's website http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec

Articles reproduction: Photocopy of articles for academic purposes are authorized, citing the source.

Online access: http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec

Indexed: Publindex (Colciencias), DOAJ (Directory of Open Journal Access), EBSCO Fuente Académica Plus, ProQuest Metadex, Latindex, Actualidad Iberoamericana, REBIUN (Red de Bibliotecas Universitarias Españolas), Dialnet, Periódica, Road, Informe Académico, REDIB (Red Iberoamericana), Biblat.

Informador Técnico

ISSN 0122-056X e-ISSN 2256-5035

Guía abreviada para la presentación de los artículos

Tipos y características de los documentos

El Informador Técnico es de acceso abierto y publica semestralmente en español, portugués e inglés. La convocatoria es permanente y durante todo el año se están recibiendo artículos para las dos ediciones. Los artículos remitidos deben ser originales (en español o inglés) e inéditos, es decir que no han sido publicados con anterioridad o simultáneamente en otra revista o en línea.

Evaluación de los artículos

El artículo se recibe y revisa por el comité editor; si es avalado se envía a valoración por los árbitros, quienes podrán solicitar los ajustes necesarios para su publicación o descartar el documento. El resultado de la evaluación se informa a los autores, quienes deben atender las correcciones sugeridas por los evaluadores, en un término no mayor a las dos (2) semanas siguientes a su recibo.

Artículo de Investigación científica y tecnológica (tipo 1)

Relata la manera de delimitar la pregunta de la investigación, el camino para someterla a prueba (análisis estadístico del experimento, protocolos disciplinarios) y la confrontación de los datos generados con la literatura actual. El artículo debe contener título (original e inglés), resumen, abstract, palabras claves en español e inglés, introducción, metodología, resultados, conclusiones y referencias bibliográficas.

Artículo de Reflexión (tipo 2)

Documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales y revisión. El artículo debe contener título (original e inglés), resumen, abstract, palabras claves en español e inglés, introducción, reflexión, conclusiones y referencias bibliográficas.

Artículo de Revisión (tipo 3)

Es el resultado de una investigación terminada donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de

investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica superior a 50 referencias. El artículo debe contener título (original e inglés), resumen, abstract, palabras claves en español e inglés, introducción, metodología, resultados, conclusiones y referencias bibliográficas.

Preparación y formato del documento

- El autor recibe un ejemplar de la publicación. Los autores deben indicar si su artículo es producto o desarrollo de una investigación en curso o concluida.
- Las publicaciones para autores del SENA no superarán el 30% por número.
- En una nota a pie de página se debe incluir el nombre del proyecto, las fechas en que se inició y terminó, la entidad que lo financia y la entidad que lo ejecuta.
- Los artículos pueden contener veinte (20) páginas numeradas, sin incluir fotografías, gráficos o tablas, en papel tamaño carta. Deben presentarse a doble espacio, en fuente Arial y tamaño de letra 11 puntos.
- Los párrafos se justifican sin dejar espacio entre los consecutivos y sin partir las palabras, no dejar más de un espacio entre palabras después de coma, punto y coma, dos puntos, paréntesis y punto seguido. No incluir saltos de página o finales de sección.
- Las ecuaciones se levantan en el procesador incluido en Word, en la fuente Arial a 9 puntos. Los símbolos de las constantes, variables y funciones en letras latinas básicas o griegas, incluidos en las ecuaciones y deben ir en cursiva; los símbolos matemáticos y números no van en cursiva. Se deben

identificar los símbolos inmediatamente después de la ecuación.

- Las figuras deben ir nombradas, numeradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden; el título de la figura se debe escribir tipo oración y se digita como un párrafo normal fuera de la figura.
- Los números decimales se deben señalar con coma (,), y los millares y millones con un punto (.).
- Los gráficos, figuras y fotografías deben ser a color con una resolución mayor a 250 pixeles.
- Evite las notas de pie de página; en caso de ser necesarias deben contener solamente aclaraciones o complementos del trabajo que, sin afectar la continuidad del texto, aporten información adicional que el autor considere necesario incluir.

Las referencias bibliográficas se circunscriben al final del artículo ordenadas alfabéticamente y señalándolas dentro del documento. Realice las referencias bibliográficas teniendo en cuenta las Normas APA 2016 (sexta edición).

Los artículos se pueden enviar en archivo digital:

- Por correo electrónico a: revistaitastin@sena.edu.co;
- A través de la plataforma OJS http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec
- A la siguiente dirección:
Revista Informador Técnico
Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA)
Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria (ASTIN)
Complejo Salomia
Calle 52 No. 2 Bis -15
Cali – Colombia
Tel.: +57 (2) 431 5855 / 431 5800 ext. 22694

Abbreviate guide for submitting articles

Types and characteristics of the documents

The journal is free access and it published semiannually in Spanish, Portuguese and English, throughout the year articles are being received for both editions. The submitted articles must be original, in Spanish or English, not published previously or simultaneously on other journal or online.

Article evaluation

The article is received and reviewed by the editorial board, if its approved its sent for evaluation by the judges, who may request the necessary adjustments for it's publishing or discard the document. The result of the evaluation, its informed to the authors to attend the evaluators corrections in a period not exceeding the following 2 weeks from its reception.

Article of scientific and technological research (type 1)

It describes how to define the research question, the way to submit proof (statistical analysis of the experiment, disciplinary protocols) and confrontation of data generated with the current literature; The article should contain title (original and English), original summary , abstract , keywords in Spanish and English , introduction, methodology, results , conclusions and references.

Reflection article (type 2)

Document that presents the research results from an analytical, interpretative and critical perspective of the author, about a specific topic using original and review sources. The article should contain title (original and English), Original Summary, abstract, keywords Spanish and English, introduction, reflection, conclusions and references.

Review article (type 3)

It's the result of a completed research, where results from published or unpublished researches are analyzed, systematized, and integrated on a science or technology field in order to update the progress and development trends. Its characterized by presenting a careful bibliographic review above references. The article should contain title (original

and English), original summary, abstract, keywords in Spanish and English, introduction, methodology, results, conclusions and references.

Preparation and format of the document

- The author receives a copy of the publication. authors must indicate if the article is product or development of an ongoing or concluded research.
- The publications for SENA authors will not exceed 30% by number.
- In a page footnote should be included the name of the project, the beginning and ending date, the financing entity and the entity that executes it.
- Items may contain 20 numbered pages, not including photographs, graphics or tables, on letter size paper. They must be double-spaced and in Arial font 11 points size.
- The paragraphs are justified without leaving space between the consecutives and without separating words, do not leave more than one space between words after comma, semicolon, colon, parentheses and period followed. Do not include page breaks or section.
- The equations arise in the processor included in word, in Arial font 9 points size. The symbols of the constants, variables and functions, basic Greek or Latin letters, included in the equations must be italicized; mathematical symbols and numbers don't go italicized. The symbols must be identified immediately following the equation.
- Figures should be named consecutively numbered and referenced in the article, in strict order, the title of the figure should be written sentence case, it is typed as a normal paragraph outside the figure.
- Decimal numbers should be noted with a comma (,) and thousands and millions with a dot (.)
- The graphs, figures and photographs should be used in colors and higher than 250 pixels in resolution.
- Avoid footnotes; in case of necessary it should contain only clarifications or additions to the work without affecting the continuity of the text, providing additional information that the author deems necessary to include.
- References are limited to the end of the article ordered alphabetically and highlighting them within the document. Make the references, taking into account the APA Standards 2016 6th edition.

Articles should be submitted in digital format:

- By email to: revistaitastin@sena.edu.co
- Using the OJS platform http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec
- By mail to the following address:
Revista Informador Técnico
Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA)
Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria (ASTIN)
Complejo Salomia
Calle 52 No. 2 Bis -15
Cali – Colombia
Phone: +57 (2) 4315855 / 4315800 ext. 22694

INFORMADOR TÉCNICO

Volumen 82 • Número 1 • Enero-Junio 2018 • ISSN 0122-056X • e-ISSN 2256-5035

TABLA DE CONTENIDO

EDITORIAL	9
ARTICULOS DE INVESTIGACIÓN	
Modelo para detección y simulación de fallas bajo la gestión de mantenimiento y proyectos.....	11
<i>Model for detection and simulation of failures under the approach of maintenance and project management</i> Javier Augusto Barros Leal, Julio César Martínez Espinosa	
Evaluación del potencial energético de la madera residual urbana mediante gasificación	26
<i>Evaluation of the energetic potential of urban wood waste through gasification</i> Lili Vega, Andrés Herrera	
Evaluación de un proceso no convencional de reciclaje de PET ámbar para la obtención de placas decorativas.....	41
<i>Evaluation of a non-conventional recycling process of amber Pet to obtain decorative plates</i> María Clara Ortiz Cortés, Jherson Eveiro Díaz Rosero	
Validación de un método analítico mediante espectrofotometría UV/VIS, para la cuantificación de formaldehído libre en textiles y aplicación en el análisis de prendas comercializadas en el mercado colombiano.....	50
<i>Validation of an analytical method by UV / VIS spectrophotometry for quantification of free formaldehyde in textiles and application in the analysis of clothes traded in the colombian market</i> Ana Cecilia Caro Zapata, Natalia Andrea Gómez Rave, Jhosep Aguiar Santa	
Resistencia química de concretos de activación alcalina ceniza volante/escoria: Sulfatos y ácidos	67
<i>Chemical resistance of alkali-activated fly ash/slag concrete: sulfates and acids</i> William Gustavo Valencia-Saavedra, Daniela Eugenia Angulo-Ramírez, Ruby Mejía de Gutiérrez	
Elaboración de un nuevo tipo de guías quirúrgicas para implantes dentales mediante impresión 3D.....	78
<i>Elaboration of a new type of surgical guidelines for dental implants through 3D printing</i> Jefferson Henao, Jhoan Sebastián Ramos, Carlos H. Valencia, Ivonne Adams, Carlos Alberto Rico, Juan Manuel Escandón, Daniela Echeverri-Cárdenas	
ARTICULOS DE REVISIÓN	
Bio-Energía: Trabajo muscular y respiración en la córnea.....	90
<i>Bio-Energy: muscular work and breathing in the cornea</i> Luis F. del Castillo, Juanibeth G. Ramírez-Calderón, Carolina Caicedo, Yenny Ávila-Torres, Diego F. Caicedo-Cano, Vicente Compañ	
Concepciones sobre el aprendizaje y su relación con las prácticas pedagógicas.....	108
<i>Conceptions about learning and their relation with the pedagogical practices</i> María Rocio Malagón Patiño	

Editorial

El Servicio Nacional de Aprendizaje SENA se encuentra elaborando el plan tecnológico y la prospectiva al 2030, definiendo el escenario apuesta en las variables tecnológica, investigación, pedagogía y didáctica, clima organizacional, infraestructura, financiación, ambiente y sociedad. En cuanto a la variable investigación se ha priorizado el proyecto de la indexación de la revista en índices internacionales como SciELO. Por ello, uno de los retos que se ha planteado para el año 2018 es lograr la periodicidad anticipada, incorporar la marcación en XML y la traducción de los números anteriores al inglés para mejorar la visibilidad de la revista.

Por otra parte, en este primer semestre del año el centro ASTIN a través del equipo de gestores y profesionales de la unidad de emprendimiento ha venido impulsando e intercambiando información con los instructores del proceso de formación profesional integral para desarrollar e implementar un semillero de emprendimiento para los aprendices, con el fin de generar habilidades y competencias que fortalezcan su espíritu emprendedor integrando los conocimientos adquiridos, que conlleven a la identificación, fortalecimiento y acompañamiento de ideas, negocios y/o unidades productivas. Estos procesos de investigación aplicada, desarrollo tecnológico y emprendimiento deben propender por la productividad y competitividad de las naciones. Como se logró evidenciar en el campeonato mundial VEX Robotics Competition In The Zone, que se realizó en Louisville, Kentucky (Estados Unidos), entre el 25 de abril y el 3 de mayo del presente año donde los aprendices del Semillero de Investigación – SIA, del Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria-ASTIN ocuparon el puesto 37 entre 200 participantes de universidades de todo el mundo. El robot SENA se destacó en la categoría de innovación, lo que le permitió a los aprendices alcanzar un nivel muy competitivo.

Por lo anterior, el Equipo Editor del Informador Técnico se complace en presentar el volumen 82(1), con el que se permite mostrar a su audiencia el compromiso de divulgar artículos científicos. Dentro de los artículos presentados se encontrarán con un estudio de implementación de un modelo para detección y simulación de fallas en sistemas productivos bajo el enfoque de la gestión de mantenimiento y proyectos. Este tipo de trabajos contribuyen al mejoramiento del desempeño del personal de mantenimiento, sin poner en riesgo la integridad del equipo, y disminuyendo costos por accidentes y largos tiempo de mantenimiento. Asimismo, se tratan temas de evaluación con alto compromiso para la conservación del medio ambiente. Los resultados de estos trabajos van en vía de la valorización y reutilización de residuos orgánicos como es el aprovechamiento de la biomasa (madera residual urbana) mediante el proceso de gasificación Power Pallet®, y el aprovechamiento de residuos de PET con los cuales se desarrollan placas decorativas. Este último estudio muestra las características termo-mecánicas de los productos resultantes. En otro trabajo experimental, se reporta la validación de un método analítico para la cuantificación de sustancias tóxicas como es el caso del formaldehído, este trabajo es de gran interés para la industria textil debido a que logra detecciones por debajo del límite permitido por la asociación internacional Oeko Tex. Adicionalmente, se presentan resultados de resistencia química de concretos de activación alcalina frente al ataque químico con ácidos; seguido de este estudio, el desarrollo de un nuevo tipo de guía que combina una determinación protésica y la incorporación de información tomográfica con técnicas de impresión 3D para obtener un dispositivo con buen ajuste y adecuada exactitud, pero a un menor precio. Por último, en la sección de trabajos de revisión se aborda la termodinámica y la cinética química en la cual se sustenta la descripción fisicoquímica de la respiración aeróbica y anaeróbica de los procesos fisiológicos tales como: Trabajo muscular y respiración en la córnea. Así como otro interesante trabajo de revisión que

enmarca el aprendizaje y su relación con las prácticas pedagógicas, la primera concepción sobre las realidades sociales y culturales que se viven al interior y exterior de la escuela y la segunda, está en las restricciones y condiciones que impone la institución escolar en estas relaciones.

En esta edición participaron las siguientes instituciones nacionales: Universidad Francisco José de Caldas, la Universidad Tecnológica de Pereira, la Universidad del Valle, la Universidad Santiago de Cali, el Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, el ESE Hospital Departamental Tomás Uribe Uribe, la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos “UAESP”, y por el Servicio Nacional de Aprendizaje SENA participaron: el Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria – ASTIN y el Centro Textil y de Gestión Industrial. Cabe resaltar que para esta edición colaboraron instituciones internacionales entre las que se encuentran: la Universidad Nacional Autónoma de México, la Universidad Internacional Iberoamericana, la Universidad Politécnica de Valencia.

El Informador Técnico, el Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, el Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria –ASTIN, y el Grupo de Investigación en Desarrollo de Materiales y Productos GIDEMP, extienden una cordial invitación a participar los días 13 y 14 de septiembre de 2018 al **IV Simposio de Materiales Poliméricos**; los resúmenes extensos de los trabajos de investigación que sean presentados en las sesiones de las ponencias magistrales, las comunicaciones orales y los posters, se publicarán como un suplemento de la revista.

Esperamos que este número fortalezca el trabajo en red con el fin de potenciar el desarrollo de proyectos de investigación aplicada. La revista Informador Técnico agradece a los protagonistas - autores - evaluadores de los trabajos aquí presentados, al Sistema Nacional de Bibliotecas SENA – SBS y al Sistema de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación – SENNOVA por su apoyo y confianza.

AURA ELVIRA NARVÁEZ AGUDELO
Subdirectora ASTIN
SENA Regional Valle
Directora de la revista

Modelo para detección y simulación de fallas bajo la gestión de mantenimiento y proyectos

Model for detection and simulation of failures under the approach of maintenance and project management

Javier Augusto Barros Leal^{1*}
Julio César Martínez Espinosa²

¹Colombiano, MsC. Universidad Internacional Iberoamericana. *Autor de correspondencia.
e-mail: jaubale07@hotmail.com.

²Mexicano, PhD. Universidad Internacional Iberoamericana.
e-mail: julio.martinez@unini.edu.mx.

Recibido: 06-02-2018 Aceptado: 20-02-2018

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un modelo basado en un dispositivo que contiene elementos de control digital e integra un sistema automático de detección y diagnóstico de fallas que puede ser usado como herramienta para la orientación de los operarios durante la presencia de una falla potencial. Este sistema se fundamenta en el control digital bajo la implementación de una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) y un software aplicativo programable. Con la realización de este estudio se hace un aporte al desarrollo del mantenimiento productivo total y su alcance va dirigido a contribuir significativamente en el mantenimiento autónomo.

Palabras clave: Mantenimiento autónomo; detección de fallas; simulación; DAQ.

Abstract

This report presents the design and implementation of a model based on a device that contains digital control elements and integrates an automatic system detection and failure system diagnosis that can be used as a guidance tool for operators during the presence of a potential failure. It is based on digital control on the implementation of a data acquisition card (DAQ) and a programmable software application, with the realization of this study it done contribution to the development of Total Productive Maintenance and scope is made, intended to contribute significantly in the Autonomous Maintenance.

Keywords: Autonomous maintenance; fail detection; simulation; DAQ.

Introducción

Una falla es una interrupción temporal o definitiva del sistema, que genera una perturbación dentro del desarrollo de un procedimiento o proceso industrial, (Vallejo 2016). El impacto generado por estos eventos, depende de su frecuencia de aparición y al tiempo de respuesta a su solución, un programa de mantenimiento bien definido y aplicado a un sistema productivo, puede disminuir el riesgo de falla (Montenegro, Velásquez y Pérez, 2016). Las perturbaciones que sufren los procesos desde los momentos previos a un evento de falla, provocan variaciones en los valores nominales de sus variables hasta el punto de ocasionar desde una falla menor hasta una suspensión de las actividades de la planta (conocido como parada de planta).

Ante esta circunstancia, surgen una serie de interrogantes dentro de la gran mayoría de los sistemas productivos a saber: ¿De qué forma se pueden disminuir los tiempos de parada y otros costos de mantenimiento?, ¿Cómo se podría aumentar la disponibilidad de los sistemas?, ¿De qué manera se puede capacitar al personal operativo sin comprometer la producción, elevar los costos de mantenimiento y poner en riesgos los equipos? . En todos los casos, se requiere de procedimientos que guíen las actividades a realizar y personal capacitado para su ejecución, dándose la acción conjunta de operarios y personal de mantenimiento, inspirada por el mantenimiento autónomo. La idea del mantenimiento autónomo es que cada operario sepa diagnosticar y prevenir las fallas eventuales de su equipo y de este modo prolongar la vida útil del mismo (Aguilar, 2013).

En este estudio se implementa un modelo para detección y simulación de fallas en sistemas productivos bajo el enfoque de la gestión de mantenimiento y proyectos, el cual permitirá capacitar al personal operativo y mejorar el desempeño del personal de mantenimiento bajo la figura de simulación de las fallas sin poner en riesgo la integridad del equipo y sin generar costos de mantenimiento. Además, propone una solución al inconveniente donde los tiempos fuera de servicio son grandes, debido a la demora para intervenir los equipos por razones diferentes a las técnicas.

El modelo consta de siete etapas (Ver Figura 1) desarrolladas de manera secuencial, las cuales se ejecutan en dos fases; una fase metodológica y una fase aplicativa. En la fase metodológica, se incluye la elaboración de un diagnóstico del estado actual del sistema productivo relacionado con el factor mantenimiento, la jerarquización e identificación de los equipos considerados críticos y la determinación de los modos de fallas en esos componentes.



Figura 1. Etapas del modelo

Fuente: Los autores

En la fase aplicativa se realiza el diseño de un prototipo compuesto de una tarjeta interfaz que opera en conjunto con un software aplicativo, que se usa para orientar a los operarios en la atención inicial de una falla, evitando así que ésta se prolongue y por ende, minimizar los efectos producidos por los eventos de falla inesperados que se presenten dentro de los procesos productivos que se llevan en las empresas de manufactura.

El modelo está dirigido a aquellos sistemas productivos que se ubican en lugares alejados y de difícil acceso que tienen problemas para solucionar fallas en sus equipos, donde se puede tomar muchas horas o incluso días para dar inicio a la atención de una falla. Este es el caso de la zona fronteriza colombo-venezolana, marco contextual donde se desarrolló ésta investigación, donde existen muchos inconvenientes para trasladarse de un lado al otro del eje fronterizo, lo que dificulta enormemente la solución de una anomalía presentada en uno de aquellos sistemas productivos que se ubican allí.

A pesar de que existen varios estudios característicos de la región, no se tienen antecedentes de estudios relacionados con el tema de las fallas en los sistemas productivos, considerando las situaciones coyunturales del intercambio comercial un elemento que dificulta llegar a ello, debido al alto nivel de informalidad existente.

El modelo se implementó en la empresa perteneciente a la industria del plástico de la zona fronteriza colombo-venezolana, en donde los problemas propios del intercambio comercial impiden la atención oportuna de las anomalías con personal externo, obligando a que el personal operativo se capacite en la solución y tratamiento de fallas de los equipos, para disminuir los costos de producción.

Materiales y Métodos

Etapa I. Diagnóstico inicial

Se identifican factores inherentes a las funciones desarrolladas dentro de un sistema productivo por parte del personal de producción y de mantenimiento, relacionadas con tiempos fuera de servicio, eventos de fallas, gestión del mantenimiento, detección de fallas, entre otros.

Para obtener información se aplicaron encuestas y entrevistas personalizadas; así mismo, los registros de bitácoras contribuyen en gran parte a la recolección de la información.

En la caracterización de la función mantenimiento en los sistemas productivos de la zona fronteriza colombo-venezolana, participaron alrededor de 20 empresas, que se clasificaron según su actividad como se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de los sistemas productivos participantes en el diagnóstico.

DESCRIPCIÓN	TOTAL
1. Actividad principal del sistema productivo	
a. Bienes y servicio	5
b. Salud	1
c. Industria cerámica	1
d. Electrificadora	2
e. Cementera	1
f. Plástico	6
g. Imprenta	1
h. Metalmecánica	3
2. Programas de mantenimiento en ejecución	
a. Ninguno	12
b. Alguno o parcial	5
c. Total o avanzado	3
3. Ejecución de actividades de mantenimiento	
a. Solo correctivo	12
b. Preventivo/correctivo	7
c. Otro (predictivo/proactivo)	1
4. Registros de eventos/fallas e información relevante	
a. No existe/no llevan	13
b. Posee alguna información	5
c. Posee información	2

Fuente: Los autores

La aplicación de un instrumento constituido por 22 preguntas con cuatro opciones de respuesta (Siempre, Casi siempre, A veces y Nula), fue aplicado a 121 personas integrantes de las áreas de operación y mantenimiento de empresas ubicadas en el marco contextual, como componente multidisciplinario de la población y en complemento a la cantidad de la muestra requerida.

La encuesta diseñada permitió evaluar cuatro variables de estudio definidas para orientar la investigación hacia la fase de simulación y que hacen relación con la gestión de mantenimiento, detección de fallas, simulación y gestión de proyectos.

Etapa II y III. Definición de criterios y selección del método de criticidad

El Análisis de criticidad es una metodología que permite establecer la jerarquía o prioridades de procesos, sistemas y equipos, creando una estructura que facilita la toma de decisiones acertadas y efectivas, direccionando el esfuerzo y los recursos en áreas donde sea más importante y/o necesario mejorar la confiabilidad operacional, basada en la realidad actual (Moubray, 2004; Riveros y Rosas, 2009). Para conocer el impacto que generan las fallas en los equipos se evalúan criterios operativos, técnicos, ambientales y otros. Adicionalmente, se utilizó un método cuantitativo para determinar el grado de criticidad que posee cada componente.

El análisis de varios métodos existentes y utilizados en investigaciones (Del Castillo, Brito-Ballina, y Fraga, 2009; Riveros y Rosas, 2009), facilitó la selección de uno de ellos que se asemejó a las condiciones de operación y del entorno donde se ubica el sistema productivo a estudiar.

Para la implementación de esta etapa del modelo, se utilizó el método expuesto por Huerta (2005), en razón a que este autor asume criterios que tienen concordancia con el contexto aplicativo donde se efectuó la investigación. Los criterios a evaluar, corresponden a: tiempos fuera de servicio, económico, tasa de fallas, seguridad, ambiente, tiempo de reparación, producción, costos de operación y mantenimiento.

Etapa IV y V. Análisis de criticidad y determinación de lista jerarquizada

El análisis de criticidad permite identificar y jerarquizar aquellos equipos dentro de una planta, con el propósito de establecer prioridades en la planificación del uso de los recursos y las acciones de mantenimiento asociadas a ellos (Díaz, Pérez, del Castillo y Brito 2012; Montes, 2013; Espinosa, Salinas y Leiva, 2010).

Su determinación corresponde a la ecuación 1.

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia de fallas} \times \text{Consecuencia de fallas} (1)$$

Donde:

$$\text{Consecuencia} = a + b$$

Donde:

a = costo reparación + impacto seguridad personal + impacto ambiental + impacto satisfacción cliente

b = impacto en la producción $\times$ Tiempo promedio para reparar MTTR

Los factores que hacen parte de la ecuación corresponden a:

Frecuencia de fallas: Número de veces que se repite un evento o falla dentro de un período de tiempo.

Impacto operacional: Efectos causados por las fallas en la producción.

Tiempo promedio para reparar: Posibilidad de efectuar cambio, reparaciones de forma rápida para continuar con la producción sin incurrir en pérdidas considerables de tiempo.

Costo del mantenimiento: Costos inherentes al factor mantenimiento, no incluye los costos de producción experimentados por la falla.

Impacto de seguridad: Consecuencias potenciales de las fallas sobre la salud y seguridad de las personas.

Impacto medio ambiente: Consecuencias potenciales de las fallas sobre el medio ambiente.

Impacto satisfacción del cliente: Entendida como los efectos que producen las fallas por pérdidas económicas en las demás áreas de la empresa y que ocasiona inconformidades a terceros.

Los equipos a tener en cuenta para las etapas siguientes al análisis de criticidad, corresponden a los que resulten clasificados como de alta y muy alta criticidad.

En relación con los valores de criticidad, se definen rangos de acuerdo con los niveles de frecuencia, en correspondencia con los valores promedios de los factores de consecuencia, expresados en la ecuación de criticidad.

En la Tabla 2 se muestran los valores definidos para la implementación del presente modelo.

Tabla 2. Niveles de frecuencia y consecuencia en ecuación de criticidad.

Nivel de frecuencia	Rango de consecuencia	Valor criticidad
1	Menor a 30	Baja criticidad
2	Entre 30 y 50	Baja criticidad
3	Entre 50 y 70	Media criticidad
4	Entre 70 y 90	Alta criticidad
5	Mayores de 90	Muy alta criticidad

Fuente: Los autores

La lista jerarquizada se determina de acuerdo con los niveles establecidos en la matriz de criticidad definida para los equipos, la cual se muestra en la Figura 2.

FRECUENCIA	5	BC	MC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
	4	BC	BC	MC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
	3	BC	BC	MC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
	2	BC	BC	BC	MC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
	1	BC	BC	BC	BC	BC	BC	MC	MC	AC	AC
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
		CONSECUENCIA									

Figura 2. Matriz de criticidad definida.

Fuente: Los autores

Los equipos a analizar mediante el método de criticidad se clasificaron en cuatro áreas teniendo en cuenta su ubicación en el proceso de producción de la empresa e identificando un total de 61 componentes que se relacionan en la Tabla 3.

Tabla 3. Relación de equipos para el análisis de criticidad.

UBICACIÓN	EQUIPO	CANTIDAD
Área de compresores	Unidad de aire comprimido	2
Área de mezclado	Mezcladoras industriales	2
Área de mezclado	Mezcladoras semi industriales	1
Área de extrusión	Máquinas de inyección bolsas	6
Área de extrusión	Máquinas de inyección potes	3
Área de extrusión	Máquinas de inyección vasos	3
Área de extrusión	Máquinas de extrusión	6
Área de empaque	Máquinas amarradoras	3
Área de empaque	Máquinas de corte	3
Área de empaque	Máquinas de empaque	3
Área de empaque	Máquinas de encolado	2
Área de empaque	Máquinas de sellado	6
Área de peletizado	Máquinas peletizadoras	2
Área de control y mando	Banco de transformadores	2
Área de control y mando	Subestación eléctrica	1
Área de control y mando	Tableros de control principal	4
Área de control y mando	Tableros de control secundario	12

Fuente: Los autores

La información requerida para los criterios definidos correspondió a registros obtenidos durante un periodo de cuatro meses, considerando las fallas y tiempos fuera de servicio.

Jerarquización. Los resultados finales de la criticidad de los equipos, conlleva a estructurar la lista jerarquizada del sistema productivo. Esto permitió conocer los componentes que requieren más atención y a los que se deben disponer y dirigir los mayores esfuerzos y recursos dentro de la cadena productiva de la organización.

Impacto de las fallas. Se cuantifican los tiempos fuera de servicio de los equipos críticos que se originan por los respectivos modos de falla o “Eventos”. Estos tiempos permitirán calcular las pérdidas reflejada de los equipos en cuanto a su capacidad de producción. Se recomienda establecer un tiempo de referencia entre tres a seis meses como mínimo para hacer la evaluación del impacto generado por las fallas.

Etapa VI. Análisis de modos y efecto de las fallas (AMEF)

Se identifican, analizan y evalúan las fallas potenciales de los equipos que resultan críticos, dándoles prioridad y una atención apropiada, según el impacto que se considere que puedan generar. Esta técnica orienta la elaboración de las consignas operativas y protocolos de atención de las fallas para su incorporación a la base de datos de la etapa de simulación proyectada.

Inicialmente se debe identificar las funciones, parámetros de funcionamiento, fallas funcionales y efectos generados en los equipos seleccionados como críticos desde su contexto operacional.

Los datos de las características operativas de los equipos a analizar y lo referente a eventos, fallas y demás datos necesarios, se tomarán de las especificaciones de placa, bitácoras, manuales de los fabricantes, catálogos técnicos e igualmente información entregada por el personal de la empresa.

Etapa VII. Etapa de simulación

Se incorporan las consignas operativas que se establezcan a partir de la fase anterior, a la base de datos del software aplicativo que interactúa con la interfaz física diseñada como complemento del proyecto.

Implementación del software y prototipo. Esta etapa, involucra cuatro elementos: planteamiento lógico-secuencial y selección de elementos, el diseño de la interface lógica-analógica, desarrollo de la herramienta computacional y elaboración de pruebas de los sistemas conjuntos.

Planteamiento Lógico-secuencial y selección de elementos. Se tuvo en cuenta el acoplamiento de señales al sistema proyectado en forma discreta (señales de 0 o 5 V de corriente continua), número de variables que intervienen en los procesos, protocolos de operación, elaboración de consignas operativas, simplificación de funciones y determinación de componentes. Los parámetros manejados en las distintas etapas del sistema, corresponden a señales de voltajes entre 1,5 y 5,5 voltios de corriente continua y señales de corriente entre 4 y 20 miliamperios de corriente continua.

Los componentes electrónicos que integran los circuitos de control de las variables del sistema, son de tecnología de lógica transistor-transistor o TTL (por sus siglas en inglés) alimentados a través de una fuente de 5,5 V en corriente continua a una capacidad de corriente de 2 amperios. El manejo de las señales en la etapa de entrada del simulador, corresponde a señales discretas que operan entre 1,2 y 5,5 V en corriente continua.

Diseño de la interface lógica- analógica. La interfaz diseñada para el manejo de datos de entrada/salida, se basa en una tarjeta para adquisición de datos bajo el sistema RaspBerry Pi 3 modelo B o computador de placa simple SBC (Single Base Computer en inglés) de bajo costo. Se incorporan dos circuitos: el módulo de entrada (señales análogas y discretas) y el módulo de salida. Interconectados a través de buses de datos de 8 Bits, con circuito integrado Buffer 8 line drivers de tecnología TTL referenciado como DM74LS244.

En la función detección, se manejan doce señales análogo-digital provenientes de elementos sensores de los equipos instalados en los procesos. Para la función de simulación de las fallas, se dispone de 12 conmutadores lógicos, una señal variable de voltaje y un circuito de control de nivel, cuya activación se asemeja a la enviada por los sensores acoplados a los equipos (Ver Figura 3).

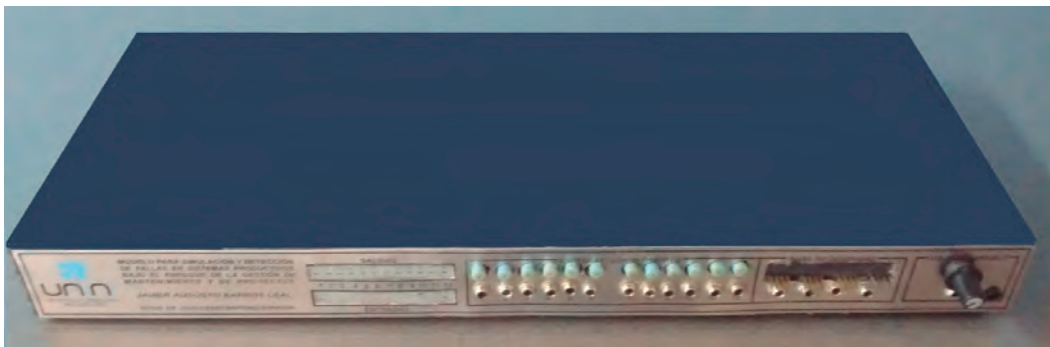


Figura 3. Dispositivo Interfaz del modelo
Fuente: Los autores

Determinación y desarrollo de la herramienta computacional. La aplicación usada para el procesamiento de los datos, señales y manejo de la información, se desarrolló con base en el sistema operativo *Raspbian* versión 4.1.

El programa aplicativo está en capacidad de ser programado para configurar una cantidad de procesos diferentes, limitados por la capacidad de memoria existente para la base de datos. Cada proceso maneja un gran número de tipos de fallas diferentes por equipo; con sus respectivos modos, causas y las acciones que debe efectuar el operario durante el tratamiento de una anomalía.

La destreza en la operación del software como función simulador, servirá para capacitar al personal en un menor tiempo sin poner en riesgos los equipos, lograr óptimos resultados en la solución de fallas de los mismos y su entendimiento traerá avances en el mantenimiento autónomo. En la Figura 4 se muestra la ventana inicial diseñada en el software aplicativo que hace parte del modelo propuesto.



Figura 4. Pantalla del software aplicativo
Fuente: Los autores

Elaboración de pruebas de los sistemas conjuntos. Desarrollados los sistemas en forma independiente, se elaboraron las tablas correspondientes al tratamiento de las fallas que se incorporarán en la base de datos del software aplicativo. Para llegar a esto, se tuvo en cuenta los resultados del diagnóstico y el análisis de modos y efectos de las fallas, cuya información genera un procedimiento para la atención de las mismas.

Los procedimientos se codifican en forma binaria para intercambiar información con los dispositivos externos de la interfaz, y así llevar a cabo la simulación de fallas.

Simulación, implementación del modelo definitivo. Se analizaron las variables operativas del proceso, para establecer los datos que se obtienen bajo condiciones de fallas y para determinar las tablas equivalentes a las mismas, para finalmente llevar a cabo la implementación del modelo planteado como objeto de la investigación.

Una característica importante y novedosa del proyecto en lo que respecta a la interface, es que puede ser accedido desde cualquier punto y lugar, a través de la plataforma de internet si se instala dentro de una red de computadores. Esto con el fin de hacer monitoreo y control en modo remoto.

Se desarrolló la aplicación web “Entrenador” (Barros, 2017), como una versión libre del software que hace parte del modelo y que solo funciona en modo simulación (cuando no se disponga de la interfaz), para ser utilizado por aquellos sistemas productivos interesados en emplear esta herramienta en la capacitación del personal de sus empresas, en solución y atención de fallas según las condiciones de sus procesos. Así mismo, se ha dispuesto dentro de esa aplicación un enlace a un sitio web, donde se puede descargar la versión completa del software aplicativo como parte estructural del aporte científico del proyecto y que va dirigido a todos aquellos sistemas productivos que deseen implementar el modelo en su versión completa.

Resultados

Etaapa 1. Diagnóstico inicial. La Figura 5 presenta los resultados de los aspectos que caracterizan la gestión del mantenimiento en los sistemas productivos evaluados.

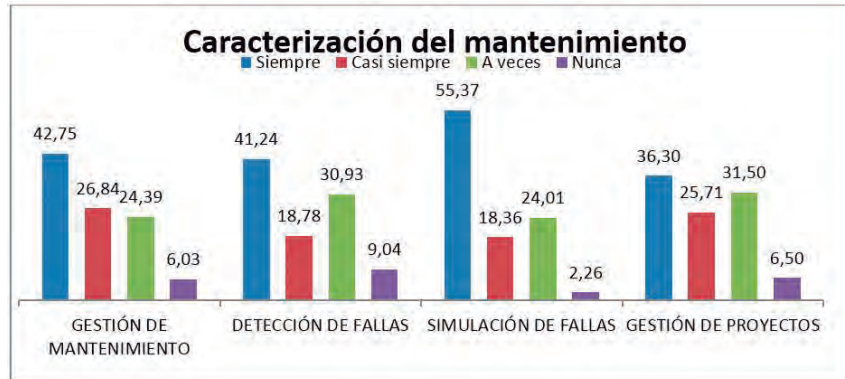


Figura 5. Resultados variables gestión de mantenimiento
Fuente: Los autores

Los resultados presentados, identifican que en un 69,59 % de los casos, se realiza una moderada gestión en las acciones de mantenimiento (siempre 42,75 % y casi siempre 26,84 %) predominando el uso de recursos, herramientas y elementos de trabajo y seguridad con una alta disposición de participación en programas de adiestramiento y trabajo en equipo.

Para la variable detección de fallas, en un 60,02 % de los casos (siempre 41,24 % y casi siempre 18,78 %), interviene el manejo de parámetros de variables características en los procesos, aunque en la mayoría de los casos, se controlan rangos permisibles de manera empírica por el poco nivel técnico en el control de los mismos, lo que provoca la presencia de un gran número de eventos de falla.

El 73,73 % del personal encuestado (siempre 55,37 % y casi siempre 18,36 %), en la variable simulación coincide en la necesidad de seguir protocolos de operación para desarrollar los procesos, entender para qué sirve cada maniobra que se realiza a las etapas de los mismos; sin embargo en la mayoría de los sistemas productivos, no se tiene documentada la operación y mantenibilidad de los equipos.

En lo que respecta a la variable gestión de proyectos, el 52,01 % de los casos (siempre 36,30 % y casi siempre 25,71 %) manifiesta en sus respuestas que se realizan acciones propias que hacen parte del alcance, los recursos y el manejo del tiempo en las acciones de operación y mantenimiento (características propias de la gestión de proyectos), como resultado de la relación que tienen las actividades desarrolladas de manera individual ya sea por procesos o equipos, que pueden ser concebidas como microproyectos y que sumadas entre sí, puedan integrar un proceso global de gestión a un proyecto macro.

La caracterización de la función mantenimiento evidencia que existe un margen de mejora. Los porcentajes globales de las variables de estudio aunque son moderados, no son los más óptimos en el momento de la evaluación.

Validación de la muestra. En la determinación de fiabilidad de la medición e instrumento de la investigación, se aplicó el método del Alfa de Cronbach y se constató su resultado mediante el Software SPSS, cuyo valor se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Escala: Fiabilidad de los datos e instrumento

RESUMEN DE PROCESAMIENTO DE CASOS			
		N	%
Casos	Válido	118	100,0
	Excluido*	0	0
Total		118	100,0
* La eliminación por lista se basa en todas las variables del procedimiento			
ESTADÍSTICAS DE FIABILIDAD			
Alfa de Cronbach		No. de elementos	
0,819		22	

Fuente: Los autores, con datos obtenidos de software SPSS (2017)

Se muestra una fiabilidad de los datos obtenidos al constatar el resultado con respecto a las recomendaciones siguientes para evaluar los coeficientes de alfa de Cronbach. Como criterio general se sugieren los siguientes valores: Coeficiente alfa >0,9 es excelente, >0,8 es Bueno, >0,7 es aceptable (George y Mallery, 2003; Frías-Navarro, 2011; Lamprea y Gómez, 2007).

En cuanto a la validez total se obtiene 0,9092 teniendo en cuenta tres aspectos fundamentales: validez del contenido del instrumento, validez de criterio y validez de constructo (Preguntas del cuestionario), en la sumatoria de los valores parciales de cada uno de ellos.

La variabilidad de los datos con respecto a las variables se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Variabilidad de los datos en relación con las variables de la investigación.

VARIABLE	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	PROMEDIO	COEFICIENTE DE VARIABILIDAD
Gestión de mantenimiento	12,2 %	0,78	16 %
Detección de fallas	6,6 %	0,88	7 %
Simulación de fallas	12 %	0,67	18 %
Gestión de proyectos	9 %	0,93	9 %

Fuente: Los autores

Análisis de criticidad. La Tabla 6 presenta el resultado en la evaluación de la criticidad en los niveles de alta y media criticidad.

Tabla 6. Resultados del análisis obtenido en los niveles de alta y media criticidad

REALIZADO EN AÑO:	Área de producción y mantenimiento 2017	
NIVEL CRITICIDAD	UNIDAD / EQUIPO	CRITICIDAD
Alta	Unidad de aire comprimido	123
Alta	Máquinas extrusoras 1	119,4
Alta	Unidad de aire comprimido	96,8
Alta	Máquinas extrusoras 2	84
Alta	Máquinas peletizadoras	72,8
Media	Mezcladoras industriales	68,1
Media	Máquinas de inyección vasos	65,4
Media	Máquinas de inyección potes	65,4
Media	Máquinas de inyección bolsas	65,4

Fuente: Los autores

La selección de los equipos que harán parte del análisis de modos y efectos de falla, corresponden a aquellos que resultaron como de media y alta criticidad para lo cual se escogen la unidad de aire comprimido y las máquinas extrusoras.

Impacto de las fallas. En la Tabla 7 se aprecia la relación mensual de las pérdidas por capacidad de producción de las máquinas extrusoras analizadas y en la Tabla 8 se detalla el caso de la unidad compresora.

Tabla 7. Tiempos fuera de servicio en extrusoras debido a eventos de fallas

PERIODO / MESES (2016-2017)	TIEMPO FUERA DE SERVICIO (2 Equipos)	PÉRDIDA DE PRODUCCIÓN (60 Kg / hora)	CANTIDAD DE BOLSAS aproximado (65 Kg = 1000)
NOVIEMBRE	84,2	5,052	77,723
DICIEMBRE	62,4	3,744	57,600
ENERO	34,6	2,076	31,938
FEBRERO	48,6	2,916	44,862

Fuente: Los autores

Tabla 8. Tiempos fuera de servicio en unidad compresora debido a eventos de fallas

PERIODO / MESES Años 2016-2017	Tiempo fuera de servicio	Pérdida de producción extrusoras (60 Kg / hora) * 4 unidades	Pérdida de producción equipo elaborar potes (35 kg / hora)* 2 unidades	Pérdida de producción equipo elaborar bolsas (40 kg / hora) * 2 unidades	Pérdida de producción equipo elaborar vasos (30 kg / hora) *2 unidades	Pérdida total de producción (Kg)
NOVIEMBRE	28,3	6,792	1,981	2,264	1,698	12,763
DICIEMBRE	19,8	4,752	1,386	1,584	1,188	8,930
ENERO	8,6	2,064	602	688	516	3,879
FEBRERO	14,5	3,480	1,015	1,160	870	6,540

Fuente: Los autores

Los datos solo detallan las pérdidas por producción; no incluyen los costos de reparación, materia prima por reproceso, energía adicional y otros aspectos que multiplican los costos de producción y que no se visualiza a primera mano lo que una falla incide en la rentabilidad de los sistemas productivos.

Análisis de modos y efectos de fallas. La Figura 6 muestra el resultado del análisis de modos y efectos de falla durante el funcionamiento de la etapa simulación en modo de detección-simulación.

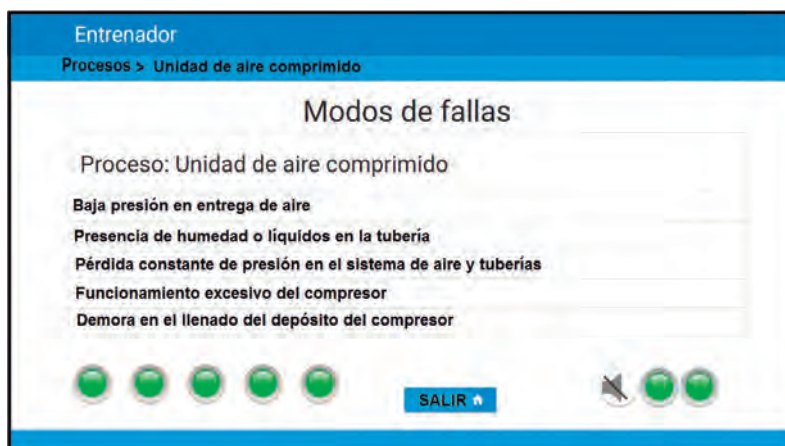


Figura 6. Modo de fallas en etapa de simulación

Fuente: Los autores

Avances en el mantenimiento autónomo. En la Tabla 9 se detallan los resultados de la reducción de fallas en los equipos que resultaron ser críticos, una vez se realizó la implementación del modelo en el sistema productivo estudiado.

Tabla 9. Valores de reducción de eventos de fallas en equipos críticos.

Tiempo/Equipo	Extrusoras		Unidad compresores	
Meses (2016-2017)	Tiempo fuera de servicio	Número de eventos	Tiempo fuera de servicio	Número de eventos
Noviembre	84,2	109	28,3	50
Diciembre	62,4	94	19,8	42
Enero	34,6	80	8,6	29
Febrero	48,6	90	14,5	36

Fuente: Los autores

Se hace notoria una reducción en la intervención a los equipos críticos y por lo tanto se da origen a una mejora en los costos por producción y en la rentabilidad del negocio del sistema productivo evaluado, a razón de necesitar menos los servicios de personal externo para prestar los servicios de mantenimiento a la empresa.

En ambos casos, se observa un valor pequeño en los tiempos fuera de servicio durante el intervalo de los meses de diciembre-enero, y un incremento de los mismos en el siguiente mes. Esto se debe a que en ese mes se laboró solo 18 días por efecto del periodo de vacaciones de año nuevo que la empresa no estuvo laborando.

El proceso de adaptación del personal operario en un mantenimiento autónomo, produce una disminución progresiva tanto en los tiempos fuera de servicio como en los eventos de falla en los equipos críticos. Esto da respuesta a la hipótesis inicial de la investigación, donde se planteaba que los avances en un mantenimiento autónomo mejoraban los tiempos fuera de servicio y los eventos de falla.

Las Figuras 7 y 8 permiten visualizar los resultados de reducción en los equipos críticos.

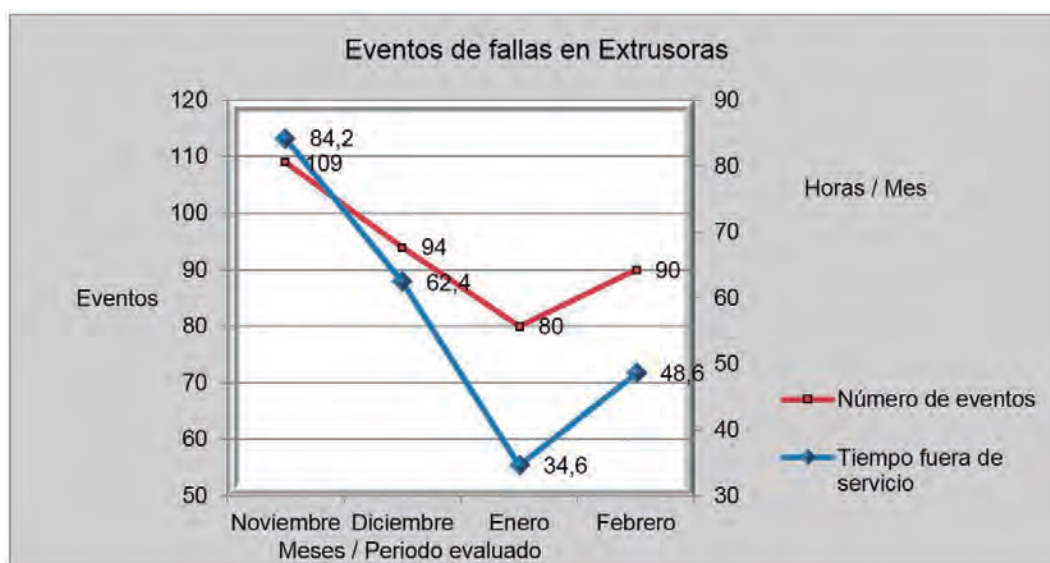


Figura 7. Resultados eventos de fallas en equipo extrusoras.

Fuente: Los autores

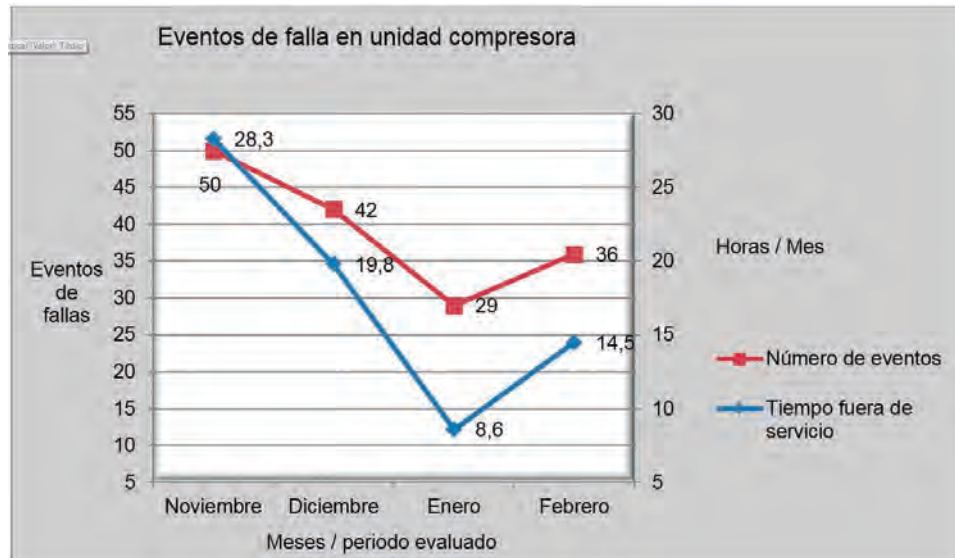


Figura 8. Resultados eventos de fallas en equipo extrusoras.
Fuente: Los autores

Conclusiones

Los procedimientos empleados para la determinación de los equipos críticos del sistema productivo bajo estudio, contribuyeron a detectar falencias en el proceso en cuanto a operación de los equipos en horarios donde se presentaban variaciones de voltajes, hecho que ocasionaba constantes bloqueos y traía como consecuencia pérdidas considerables de tiempo y gastos innecesarios que afectaban la rentabilidad de la empresa. Además, permitió proponer acciones correctivas para la obtención de mejores resultados en la producción.

Los resultados que se persiguen con la implementación del modelo en avances de un mantenimiento autónomo, establecen acciones que involucran una gestión con base en la calidad, el riesgo, los recursos, las comunicaciones y los costos entre otros, aspectos que parten de los elementos de la gestión de proyectos.

Se pudo mostrar a las personas integrantes de la empresa, cómo se asocian las fallas de los equipos con la rentabilidad del negocio, como parte del proceso de sensibilización hacia la confiabilidad operacional. En tal sentido, la necesidad de iniciar un programa de capacitación del personal en las etapas del proceso fue percibida con claridad, al igual que los beneficios asociados al mantenimiento autónomo.

La utilización de herramientas computacionales para la capacitación del personal y para el manejo de información incide positivamente en la gestión de mantenimiento, mejora la consulta y el manejo de los registros e información de los equipos por los usuarios. La información registrada permitió reducir los efectos de la rotación de personal y la pérdida de experiencia que esto provoca.

Este estudio es el punto de partida para desarrollar una cultura de mantenimiento en la empresa, dado que es necesario implantar actividades de distinta índole, tales como inspecciones, lubricaciones y acciones correctivas de pequeña índole, para garantizar un mejoramiento efectivo en los equipos de producción, prevenir o minimizar fallas, evitar reparaciones costosas y las pérdidas de producción por paradas no programadas.

La detección de aspectos secundarios que afectaban el funcionamiento de los equipos, y que no habían sido identificados, generó planes de mejora, programación de puesta en marcha de equipos que disminuyeron los tiempos de suspensión de la operación de la planta alrededor de un 45 %, ampliando la capacidad de producción de la planta, generando mayores oportunidades de trabajo al personal y aumentando la rentabilidad de la empresa objeto del estudio.

Referencias

- Aguilar, J. y Monasterio, L. (2013). *Propuesta de un plan de mejoras que permita reducir los tiempos de paradas no planificadas en la línea de envasado n° 10 en la empresa Cerecería Polar C.A., San Joaquín*. (Tesis de pregrado). Universidad José Antonio Páez, Fac. de ingeniería. San Diego, Venezuela. 115 pp. Recuperado de: <https://bibliovirtualujap.files.wordpress.com/2013/05/teg-aguiar-monasterio.pdf>
- Barros, J. A. (2017). Entrenador (Versión 1) "Software". Recuperado de: <http://jaubale07.pythonanywhere.com/>
- Del Castillo Serpa, A. M., Brito-Ballina, M. L. y Fraga Guerra, E. (2009). Análisis de criticidad personalizados. *Ingeniería Mecánica*. 12(3), 1-12. Recuperado de: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/view/72/395>.
- Díaz, Pérez, del Castillo y Brito (2012). Propuesta de un modelo para el análisis de criticidad en plantas de productos biológicos. *Ingeniería Mecánica*. 15(1), 34-43. ISSN 1815-5944. Recuperado de: <http://scielo.sld.cu/pdf/im/v15n1/im04112.pdf>
- Espinosa, F. F., Salinas, G. E., y Leiva, P. P. (2010). Jerarquización del reemplazo de equipos productivos de acuerdo a su nivel de cumplimiento de los objetivos de la empresa Inf. tecnol. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*. 22(4), 97-106. ISSN 0718-0764. Recuperado de: <https://scielo.conicyt.cl/cgi-bin/wxis.exe/iah/?IsisScript=iah/iah.xis&base=article%5Edlibrary&format=iso.pft&lang=e&nextAction=lnk&indexSearch=AU&exprSearch=SALINAS,+GONZALO+E>
- Frías-Navarro, D. (2011). Alfa de Cronbach y consistencia interna de los ítems de un instrumento de medida. España, Universidad de Valencia. Recuperado de: www.uv.es/~friasnav/AlfaCronbach.pdf
- George, D. y Mallery, P. (2003). *SPSS for Windows step by step: A simple guide and reference*. 11.0 update. (4th ed.). Boston: Allyn & Bacon.
- Huerta Mendoza, R. (2005). "El Análisis de Criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional". *Club de Mantenimiento*. p 12. Recuperado de: http://www.mantenimientoplanificado.com/Articulos%20gesti%C3%B3n%20mantenimiento_archivos/de%20confiabilidad/ANALISIS%20DE%20CRITICIDAD.pdf
- Lamprea, J.A., y Gómez Restrepo, C. (2007). Validez en la evaluación de escalas. *Revista Colombiana de Psiquiatría*, 36 (2), 340-348.
- Montenegro Martínez, S.R., Velásquez Meza, R. I., y Pérez Gutiérrez, J. M. (2016). *Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para el área de secado mecánico en Exportadora ATLANTIC SA, Beneficio seco de Condega en el II Semestre 2016*. (Tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua. 148 pp. Recuperado de: <http://repositorio.unan.edu.ni/6868/1/17872.pdf>
- Montes, J. D. (2013). *Diseño de un plan de mantenimiento para la flota articulada de integra S.A. usando algunas herramientas del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)*. (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira, Fac. Ingeniería Mecánica. Pereira, Colombia, 132pp.
- Moubray, J. (2004). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. ISBN 095 39603-2-3. Gran Bretaña: Aladon Ltda.
- Riveros, M. L. y Rosas, E. G (2009). *Diseño de un sistema de mantenimiento con base en análisis de criticidad y análisis de modos y efectos de falla en la planta de coque de fabricación primaria en la empresa Acerías Paz del Río S.A.* (Tesis de maestría). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Recuperado de: <http://www.uptc.edu.co>.

Vallejo, C. (2016). *Diseñar un plan de mantenimiento a una rebobinadora de papel de la compañía Papeles Nacionales S.A. bajo los lineamientos de mantenimiento preventivo y predictivo*. (Tesis de pregrado) Universidad Tecnológica de Pereira, Fac. Ingeniería Mecánica. Pereira, Colombia. 54 pp. Recuperado de: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/7459>

Línea de atención al cliente:
(57 - 1) 472 2000 en Bogotá
01 8000 111 210 a nivel Nacional
.....
www.4-72.com.co

El servicio de **envíos**
de Colombia





Evaluación del potencial energético de la madera residual urbana mediante gasificación¹

Evaluation of the energetic potential of urban wood waste through gasification

Lili Vega²
Andrés Herrera³

¹Convenio Interadministrativo 001 - 899 suscrito entre la UAESP y el JBB, fecha de inicio julio 1 de 2015, fecha de finalización 31 de diciembre de 2016.

²Colombiana. Candidata a MSc. Ingeniería Mecánica. Contratista. Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, Colombia. E-mail: lvegac@unal.edu.co

³Colombiano. Candidato a MSc. Cuencas Hidrográficas. Contratista. Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos UAESP, Bogotá, Colombia. E-mail: anheag@gmail.com

Recibido: 24- 07 - 2017 Aceptado: 03-05-2018

Resumen

Se evaluó el potencial energético de la madera residual urbana (MRU) del Distrito Capital, proveniente de mobiliario, carretas, guacales y estibas, mediante el proceso de gasificación en la generación de energía eléctrica empleando el sistema Power Pallet® del Jardín Botánico de Bogotá. La MRU se clasificó en dos categorías provenientes de un tablero de fibra de densidad media o aglomerado de madera (MDF- por sus siglas en inglés) y sin aglomerado, analizando las características fisicoquímicas de los dos tipos de biomasa, el desempeño del sistema, las variables operacionales como temperatura, potencia, biomasa consumida, desempeño energético, y se realizó un análisis económico de la producción de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de este tipo de residuo. De acuerdo con la evaluación técnica, se concluye que la tecnología Power Pallet® no es la más adecuada para el aprovechamiento de la MRU, debido a las restricciones del tamaño de partícula y a la limpieza del gas de síntesis. De acuerdo con la cantidad estimada promedio anual de madera residual urbana de 144.667 toneladas, la potencia máxima que podría instalar el Distrito sería alrededor de los 20 kW eléctricos. Aunque este potencial es bajo comparado con otros tipos de biomasa, es una alternativa que permitirá la valorización y reutilización de la MRU.

Palabras clave: Residuos sólidos urbanos; energías renovables; seguridad energética, aglomerado de madera; valoración energética de residuos.

Abstract

This article evaluates the energetic potential of the urban residual wood (MRU for its initials in Spanish) of the Capital District, that comes from furniture, wagons, wooden crates and stowages, through the process of gasification in the generation of electric energy using the Power Pallet® system of the Botanical Garden of Bogota. Therefore, the MRU was classified into two categories with wood agglomerate MDF and without agglomerate, analyzing the physical-chemical characteristics of the two types of biomass, the system performance, operational variables such as temperature, power, etc. An economic analysis of the Production of electric energy was made by the use of this type of waste. According to the technical evaluation it is concluded that the power pallet technology is not the most suitable for the exploitation of MRU, due to the restrictions of the particle size and the synthesis gas cleaning. According to the estimated amount of annual urban residual wood of 144,667 tons for the city, the maximum power that the District could install will be around 20 kW. Although this potential is low compared to other types of biomass, it is an alternative that allows the recovery and reuse of the MRU.

Keywords: Urban solid waste; renewable energy; energetic security; wood agglomerate; waste energy assessment.

Cómo citar: Vega, L., y Herrera, A. (2018). Evaluación del potencial energético de la madera residual urbana mediante gasificación. *Informador Técnico* 82(1), 26-40. doi: <http://doi.org/10.23850/22565035.888>

Introducción

Todo material en estado sólido, líquido o gaseoso, ya sea aislado o mezclado con otros, resultante de un proceso de extracción de la Naturaleza, transformación, fabricación o consumo humano, que su poseedor decide abandonar es considerado como un residuo (Jaramillo y Zapata, 2008). Aquellos residuos que se generan en los espacios urbanizados, como consecuencia de las actividades de consumo y gestión de actividades domésticas (viviendas), servicios (hostelería, hospitales, oficinas, mercados, entre otros.) y algunas industrias se clasifican como Residuos Sólidos Urbanos (RSU) (Jaramillo y Zapata, 2008). Los RSU contienen una fracción significativa de papel, desechos alimenticios, madera y recortes de poda, algodón y cuero, metales y vidrios, como también derivados del petróleo como plásticos, gomas y telas sintéticas (Moratorio, Rocco, y Castelli, 2012).

En Colombia se producen alrededor de 25.000 toneladas de residuos sólidos al día, de los que se recuperan y reintegran en el ciclo productivo el 13%, siendo recuperados y comercializados un 7% (Fernández, Martínez, y López, 2015). A nivel nacional la disposición final se realiza en sitios autorizados como las celdas de contingencia, las plantas de aprovechamiento y los rellenos sanitarios; y sitios no autorizados por las autoridades ambientales como las celdas transitorias, la quema, los botaderos y los cuerpos de agua (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2015).

De acuerdo con el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, el Distrito Capital produce aproximadamente 6.429 toneladas de residuos sólidos diariamente, lo que se traduce en 2.346.826 toneladas anuales, de las cuales un 60% son de carácter aprovechable, es decir con potencial de reciclaje, reúso y otros tipos de utilidad (Fernández *et al.*, 2015). De estos residuos el 27% corresponde a alimentos, seguido por los residuos de plástico y papel con un 19,15%, y el 0,49% corresponde a madera (UAESP, 2011).

Bajo el marco del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), se plantean múltiples alternativas para el manejo de los RSU, desde la separación en la fuente (orgánico, reciclaje e inservible), la transformación (compostaje, valorización energética de residuos) y la disposición final. El Programa de Aprovechamiento, desarrollado en el PGIRS plantea la cuantificación y caracterización de los residuos para determinar el potencial de aprovechamiento (Ministro de Vivienda Ciudad y Territorio, 2015). Siguiendo esta directriz, para el caso de la madera residual se reporta en el mercado actual alternativas como la fabricación de tablero aglomerado, mediante la separación, transporte y limpieza de la madera a costos eficientes de producción (Primadera S.A.S, 2017), fabricación de pellets para combustión en estufas, calderas, entre otros. (Aruna, Laarman, Araman, Coulter, y Cubbage, 1997), suelos de madera, elementos de carpintería para proyectos de restauración (Bratkovich, Bowyer, Lindburg, y Fernholz, 2009), entre otros.

El Jardín Botánico de Bogotá (JBB) y la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP) bajo el Convenio interadministrativo 889-JBB-001-UAESP suscrito en el año 2015, aunaron esfuerzos con el fin de establecer la viabilidad técnica de la gasificación de madera residual urbana (MRU) para la producción de energía eléctrica, como una opción para la transformación de este tipo de residuos. Aunque esta opción no es la solución definitiva, se articulan sus esfuerzos para la recuperación de los RSU proporcionando beneficios adicionales como la reducción de impactos ambientales de la producción de nuevos productos, la reutilización, la creación de empleo, y, en muchos casos, la reducción de costes existentes, evitando los costes de compra / eliminación. Potenciando la posibilidad de cerrar los ciclos de vida de los RSU y de generar un valor agregado, que se ve reflejado en la producción de energía eléctrica.

La gasificación, es un proceso termoquímico en el que se dan un conjunto de reacciones químicas en un ambiente pobre en oxígeno, dando como resultado la transformación de un sólido en una serie de gases que pueden ser empleados en la combustión. En este proceso la celulosa se transforma en hidrocarburos más ligeros, en monóxido de carbono e hidrógeno. El rendimiento del proceso de gasificación varía dependiendo de la tecnología, el combustible y el agente gasificante que se utilice, en el rango de 70-80%. Mediante gasificación se pueden alcanzar rendimientos eléctricos de hasta un 30-32% mediante el uso de moto-generadores accionados por *syngas* (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDAE, 2007). El proceso se da en 3 etapas: una de calentamiento hasta 100 °C, que permite el secado de la biomasa por evaporación del agua contenida en la misma. Una etapa llamada pirólisis, en la que se rompen las moléculas grandes dando lugar a otras moléculas de cadena más corta, que a la temperatura del reactor, están en fase gaseosa.

Y, finalmente, una etapa de oxidación de la fracción más pesada (carbonosa) de la biomasa al entrar en contacto con el agente gasificante (aire, oxígeno, o vapor de agua) (IDAE, 2007; Pujoldevall Sánchez de Toledo, 2015). De acuerdo con el método de contacto que emplean entre las fases sólida (biomasa) y gaseosa (agente oxidante), los gasificadores se clasifican en Gasificadores de lecho fijo, lecho fluidizado y de arrastre. De acuerdo con la línea de bioenergía, un tamaño entre 1 - 1,5 MW es práctico para los gasificadores de corriente descendente y cuando se trata de corriente ascendente hay plantas de un tamaño de 4 - 6 MWt (Held, 2012).

Materiales y métodos

La evaluación del potencial energético se realizó mediante la preparación, caracterización fisicoquímica y la generación de energía eléctrica mediante la gasificación de la MRU. El proceso de gasificación y generación de energía eléctrica se llevó a cabo en el sistema Power Pallet® PP20, ubicado en el Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis. A continuación, se detallan los materiales, equipos y métodos empleados.

Sistema Power Pallet® PP20

El sistema está compuesto por un reactor serie GEK TOTTI, un sistema de automatización y un motor acoplado a un generador (Figura 1).

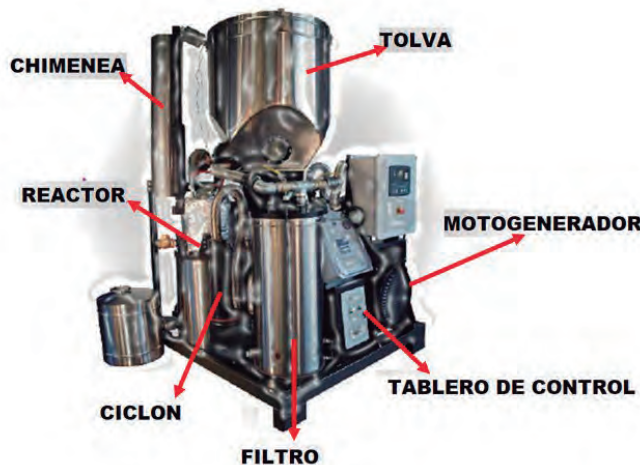


Figura 1. Componentes del Sistema Power Pallet® PP20.

Fuente: adaptado de (All Power Labs, 2014)

El sistema se puede dividir en dos componentes: el de transformación termoquímica, con aire como agente gasificante y el de generación de energía eléctrica mediante un motor a gas. Con una potencia nominal continua de 15 kW a 50 Hz y 18 kW a 60 Hz, un consumo nominal de 1,2 kg/kWh. De acuerdo con el manual de operación, la biomasa empleada debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Tamaño de partícula entre $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{8}$ ".
- Contenido de carbono fijo alrededor de 20% o más en peso.
- Contenido de cenizas menor al 5%.
- Contenido de humedad entre el 10% -30%, medido sobre una base de masa seca.
- Temperatura de restricción (en el hogar) entre 800°–1000°C.
- Temperatura de reducción (en la parte superior de la canasta) entre 700°–800°C.

Preparación y clasificación granulométrica de la madera residual urbana - MRU

La madera procedente de los residuos de poda empleados en el Jardín Botánico proviene de una mezcla no determinada de especies presentes en la ciudad de Bogotá, entre las cuales se han logrado identificar: el Pino (*Pinus*), Eucalipto (*Eucalyptus*), Cerezo (*Prunus serótina*), Urapa (*Cytharexylon subflavescens*), Guayacán (*Lafoensia acuminata*), Sauce (*Salix ps.*), Acacia morada (*Acacia baileyana*), Caucho (*Ficus soatensis*), Cedro (*Cedrela montana*) (OpEPA, 2016; García, 1968).

La MRU proveniente de mobiliario urbano, carretas, estibas y guacales fue proporcionada por la UAESP. Se emplearon tanto maderas naturales obtenidas directamente de los troncos de los árboles y maderas artificiales obtenidas a partir de restos de madera natural (cortezas, virutas, ramas, etc.) como tableros de aglomerado, tableros de contrachapado y tableros de fibras. Para las pruebas de gasificación se realizó la siguiente clasificación de la MRU (Figura 2).

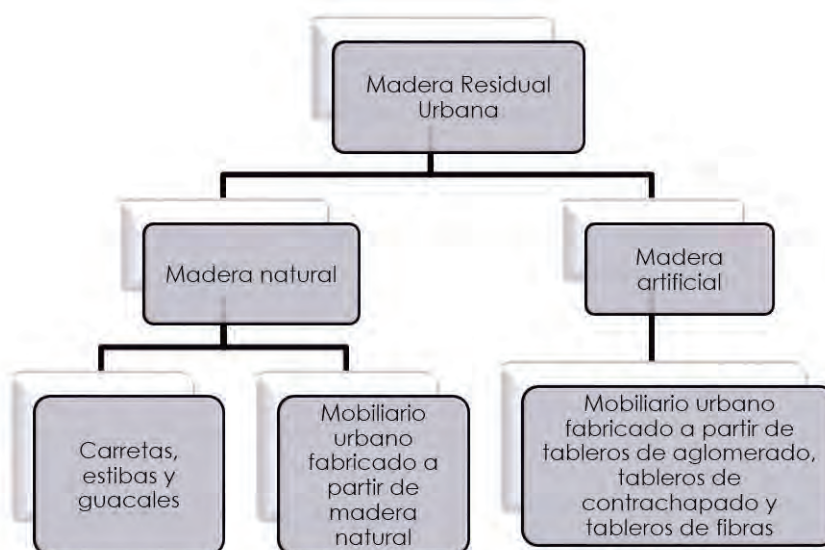


Figura 2. Clasificación de la MRU para realización de pruebas físico-químicas

Fuente: Los autores.

La preparación de los residuos de poda del Jardín se realizó de acuerdo con el protocolo de operación, como se muestra en la Figura 3. La preparación de la MRU se inició con el retiro de todas las puntillas, tornillos y plásticos, para realizar la reducción y la clasificación granulométrica según a las especificaciones del sistema.

Caracterización fisicoquímica



Figura 3. Acondicionamiento de la biomasa para proceso de gasificación

Fuente: Los autores.

Se llevaron a cabo las siguientes pruebas de acuerdo con estándares internacionales:

- Método estándar para el análisis de contenido de Humedad: Norma ASTM E871.
- Método de prueba estándar para la determinación del contenido de cenizas: Norma ASTM D 3174.
- Método para medir el pH de astillas de madera, basado en la norma T-435 om-02.
- Análisis elemental: ASTM D5373, ASTM D4239.
- Análisis próximo: ASTM E872-72, ASTM E870-82, ASTM D2016-74, ASTM D102-84.
- Poder Calorífico: ASTM D240.
- Análisis termogravimétrico TGA, ASTM E1131.
- Cromatografía de gases o análisis de composición de gases: ASTM E1131.

La caracterización fisicoquímica como el análisis próximo y último se llevó a cabo para las 4 muestras de MRU y para los residuos del JBB. En el caso de la composición del gas de síntesis y del poder calorífico del mismo se realizaron para la gasificación de MRU con y sin MDF, y los residuos del JBB.

Pruebas de generación de energía

Una vez preparadas las dos muestras de MRU, se procedió a realizar las pruebas de generación de energía eléctrica mediante gasificación en el sistema Power Pallet® PP20, de acuerdo con el Protocolo de Operación (All Power Labs, 2014). Se llevaron a cabo tres pruebas con su respectiva réplica, realizando el registro de las siguientes variables como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Operacionalización de variables

Variables Independientes (Factores)	Indicadores/ dimensiones características	Técnicas e instrumentos de medición
Tipo de biomasa	Procedencia MRU con y sin MDF, Residuos de poda	Observación visual
Contenido de humedad	% en peso	Norma ASTM E871
Porcentaje de aprovechamiento	% en peso	kg biomasa apta/kg biomasa total
Cantidad de biomasa consumida	kg de MRU	Balanza digital
Variables dependientes (Respuestas)		
Temperatura de restricción (Trst)	800°–1000°C	Sistema Power Pallet®, termocupla tipo k
Temperatura de reducción (Tred)	700°–800°C	Sistema Power Pallet®, termocupla tipo k
Potencia generada	0-18 kW	Sistema Power Pallet®
Energía eléctrica producida	kWh	Contador de electricidad

Fuente: Los autores.

Evaluación del potencial energético de la MRU

La evaluación del potencial energético de la MRU, se realizó mediante la comparación de la línea base del sistema empleando residuos de poda, la cual se realizó con base en el porcentaje de aprovechamiento de la biomasa debido a la clasificación granulométrica, el consumo de biomasa por hora de operación, la rampa de calentamiento, la potencia generada. Adicionalmente, se determinó el potencial energético de la MRU de la ciudad de Bogotá.

Resultados y discusión

Porcentaje de aprovechamiento

De acuerdo con la reducción y clasificación granulométrica, se determinó el porcentaje de aprovechamiento de la MRU, el cual se muestra en la Tabla 2. Se observa que 39,1 kg (60%) y 46,4 kg (47%) de la biomasa se queda en la primera clasificación granulométrica ($>1/2''$), para la MRU-natural y MRU-artificial respectivamente, valores muy por encima al presentado para los residuos de poda con un 20%. Lo anterior se ve representado en un bajo porcentaje de aprovechamiento para las muestras de MRU, con 24% y 25%.

Tabla 2. Determinación del porcentaje de aprovechamiento de la MRU y la línea base (Residuos de poda)

Clasificación granulométrica/ Tipo de biomasa	Residuos de poda: Línea base	MRU-natural	MRU-artificial
Peso inicial de biomasa (kg)	42,5	39,1	46,4
Cantidad de biomasa $>1/2''$ (kg)	8,6	23,3	22
Cantidad de biomasa $<1/2''$ (kg)	34,2	15,8	24,4
Cantidad de biomasa $>3/8''$ (kg)	20,4	9,6	11,8
Cantidad de biomasa $<3/8''$ (kg)	13,8	6,3	12,6
% Aprovechamiento	48%	24%	25%

Fuente: Los autores.

Caracterización fisicoquímica

Al determinar la composición de la MRU (ver Tabla 3) y de la mezcla del JBB se observó que son ricos en oxígeno y carbono. Importante, resaltar que el contenido de azufre es cero para todas las biomásas, lo que nos permite afirmar que no habrá formación de óxidos de azufre (SOx) causantes de la corrosión, lluvia ácida y sulfatos transportados en material particulado respirable (IDAE y ESCAN, 2008). La MRU presenta una alta proporción de oxígeno de 49% y 45% en carbono, lo cual puede ser causante de la reducción del Poder Calorífico Inferior - PCI, debido a la baja energía química contenida en los enlaces tipo carbono-oxígeno y carbono-hidrógeno. La presencia de nitrógeno en la muestra de MRU con MDF, aunque baja puede contribuir a la formación de Óxidos de Nitrógeno (NOx) que favorecen la formación de la lluvia ácida.

Tabla 3. Análisis elemental

Muestra	Nitrógeno	Carbono	Hidrogeno	Azufre	Oxígeno*
Mobiliario	0,00	47,1539	5,7270	0,00	47,1191
Carretas	0,00	45,4835	5,5772	0,00	48,9393
Estibas	0,00	45,1833	5,6876	0,00	49,1292
JBB	0,00	43,6711	5,0551	0,00	51,2738
MRU- con MDF	1,2324	43,7743	5,3036	0,00	49,6897

*Los valores son calculados

Fuente: Los autores.

En la Tabla 4, se puede observar el resultado del análisis próximo. El contenido de humedad menor al 10% está de acuerdo con los requerimientos establecidos por el fabricante del equipo de gasificación. Este bajo contenido de humedad se verá reflejado en una etapa de secado más corta. El contenido de cenizas incide en la energía disponible de la biomasa y a su vez afecta los costos de procesamiento y transformación de la energía de la misma (IDAE y ESCAN, 2008). Un porcentaje menor al 5%, es favorable, por lo anteriormente expuesto y no habrá formación de escoria (Bratkovich *et al.*, 2009). En cuanto al porcentaje de materia volátil (80%) y carbono fijo (19%), este será beneficioso para la gasificación si se presentan valores altos ya que se ve reflejado en una alta energía calórica contenida en el gas de síntesis, representando la facilidad con la cual la biomasa puede ser quemada, gasificada u oxidada (IDAE, 2007). El contenido de materia volátil fue mayor al 10% recomendado, por lo tanto, para este tipo de biomasa es más aconsejable emplearla en gasificadores de lecho móvil en corriente paralela (Rocha, Vesga, y Pinto, 2011; Fonseca González, 2003).

Tabla 4. Análisis próximo de las biomosas

Muestra	Humedad % (m/m)	Materia volátil % (base seca)	Carbono fijo % (m/m) (base seca)	Cenizas % (m/m) (base seca)	pH
Mobiliario	7,623	79,924	19,746	0,330	4,48
Carretas	8,174	82,163	17,728	0,109	4,36
Estibas	8,943	82,371	17,143	0,486	4,47
JBB	9,050	75,072	20,422	4,506	6,21
MRU- con MDF	7,617	78,911	20,041	1,048	4,36

Fuente: Los autores.

El pH resultó moderadamente ácido para todas las muestras evaluadas, lo que puede afectar su utilización, debido a que en contacto con metales puede corroer (IDAE, 2007).

El poder calorífico de la MRU evaluada resultó alrededor de 17225 kJ/kg y 18430 kJ/kg, como se muestra en la Tabla 5, valores que corresponden a la MRU con MDF y a la madera proveniente de Mobiliario, respectivamente.

Tabla 5. Poder Calorífico de las diferentes muestras

Muestra	Poder calorífico superior (kJ/kg)
Mobiliario	18430
Carretas	17500
Estibas	17565
JBB	16065
MRU- con MDF	17225

Fuente: Los autores.

Los valores obtenidos son cercanos a las biomosas empleadas para gasificación como el bagazo de caña húmedo y cascotes de la almendra, como se muestra en la Figura 4.

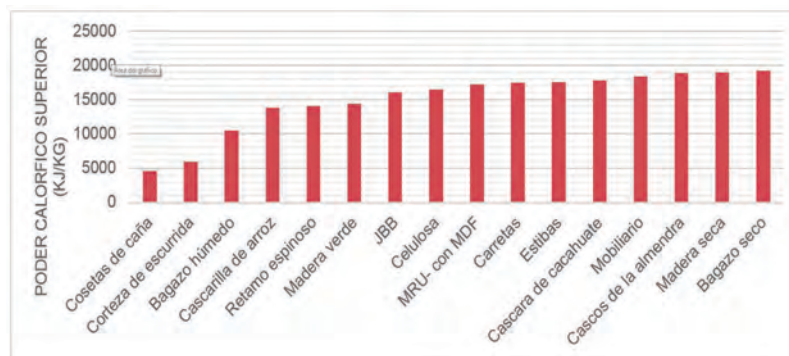


Figura 4. Poder calorífico superior de diferentes biomosas y las estudiadas.

Fuente: Adaptado de Serrato y Lesmes (2016).

A partir de las curvas de pérdida de peso (TGA) y de las correspondientes a su derivada respecto al tiempo (DTG) se determinó el rango de temperaturas en la cual la pérdida de masa fue máxima.

En la curva TGA para la muestra de Mobiliario (Figura 5) se observa que la temperatura de degradación térmica se ubica entre 230°C y 390°C. La curva DTG muestra que la resistencia a la oxidación es decreciente entre 230°C y 400°C, donde tiene lugar la mayor pérdida de peso con un porcentaje de 64,12%.

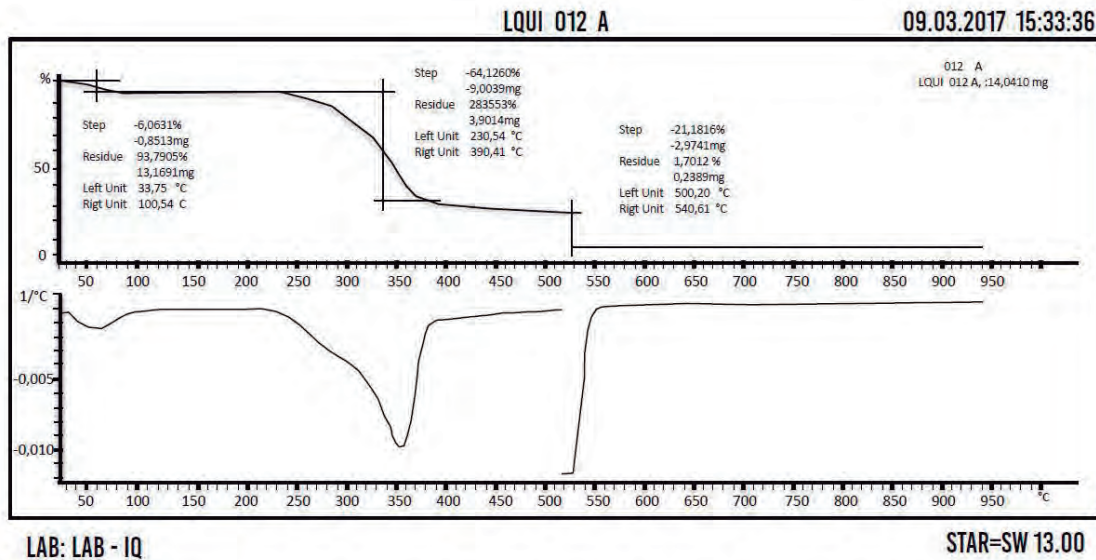


Figura 5. Curva TGA y DTG para la muestra de mobiliario
Fuente: Los autores

Para la muestra de la MRU proveniente de carretas, la curva TGA (Figura 6) se puede observar que la temperatura de degradación térmica se ubica entre 230°C y 390°C, esta curva es muy similar a la obtenida en la muestra de mobiliario. Este rango de temperatura presenta la mayor pérdida de peso con un porcentaje de 68,1%.

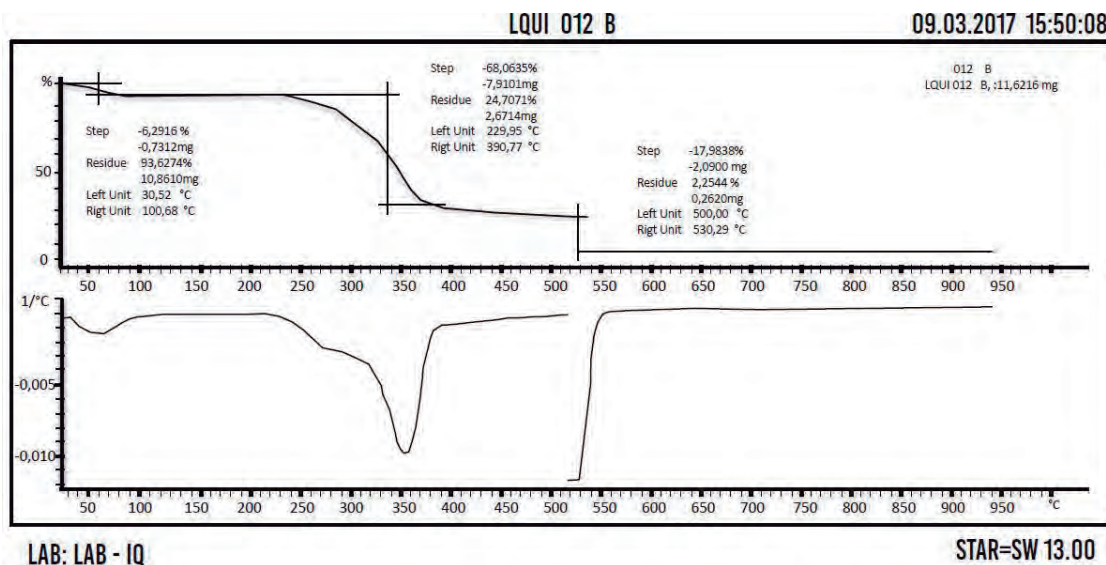


Figura 6. Curva TGA y DTG para la muestra de carretas
Fuente: Los autores

En la curva TGA para la muestra de Estibas (Figura 7) se observa que la temperatura de degradación térmica se ubica entre 230°C y 390°C. La pérdida de peso comienza alrededor de 230°C y finaliza luego de superar los 350°C, muy similar a las anteriores muestras. Este rango de temperatura presenta la mayor pérdida de peso con un porcentaje de 68,1%.

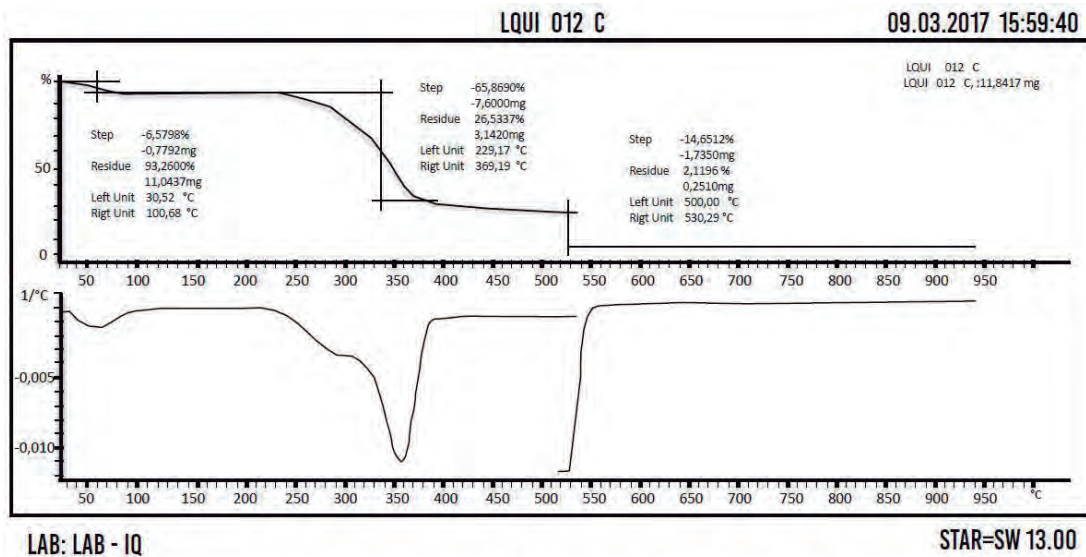


Figura 7. Curva TGA y DTG para la muestra de Estibas
Fuente: Los autores

Para la muestra de la mezcla de maderas del JBB, la curva TGA (Figura 8) se puede observar que la temperatura de degradación térmica se ubica entre 210°C y 390°C, esta curva es muy similar a la obtenida en las muestras anteriores debido al origen de todas las biomásas madera. Este rango de temperatura presenta la mayor pérdida de peso con un porcentaje de 61,87%.

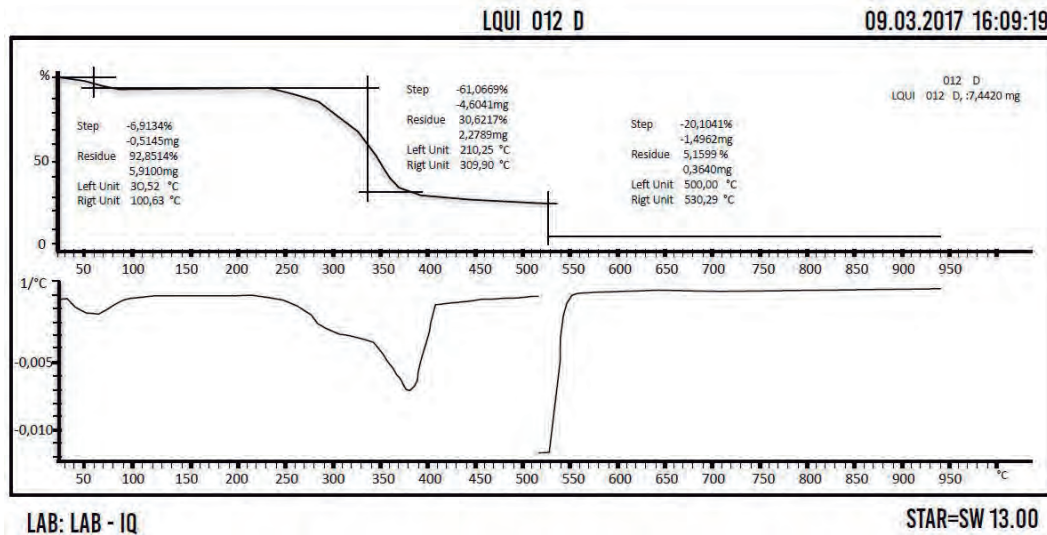


Figura 8. Curva TGA y DTG para la muestra de JBB
Fuente: Los autores

En la curva TGA para la muestra de Estibas (Figura 9) se observa que la temperatura de degradación térmica se ubica entre 234°C y 390°C, muy similar a las anteriores muestras. Este rango de temperatura presenta la mayor pérdida de peso con un porcentaje de 62%.

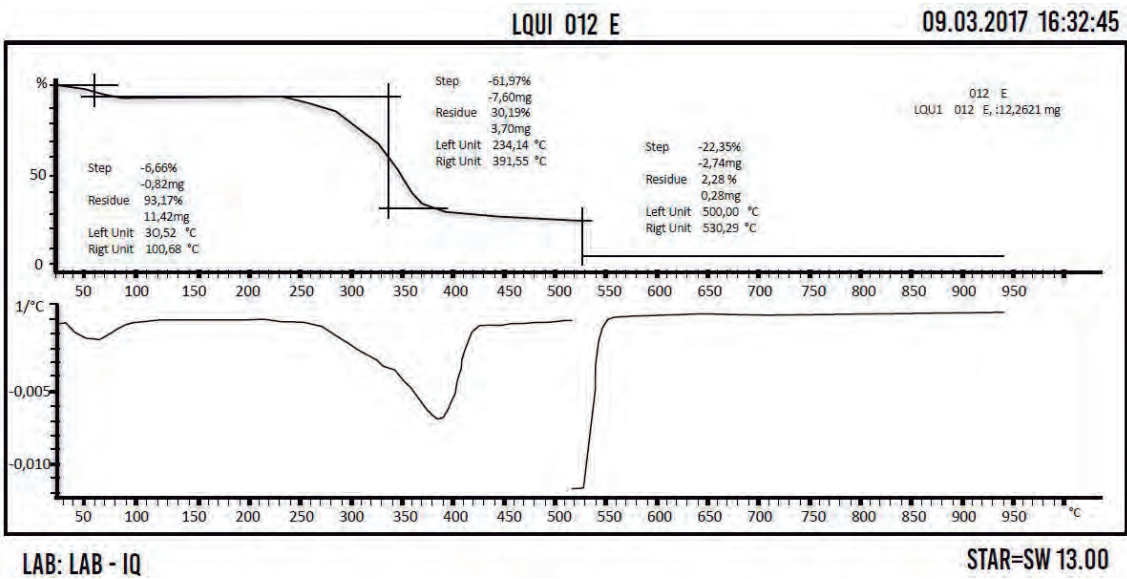


Figura 9. Curva TGA y DTG para la muestra de MRU con MDF
Fuente: Los autores

En la Figura 10 podemos observar la variación de la concentración del gas de síntesis durante el periodo de calentamiento del sistema (tomas 1 y 2) y durante la generación de energía eléctrica (tomas 3 y 4).

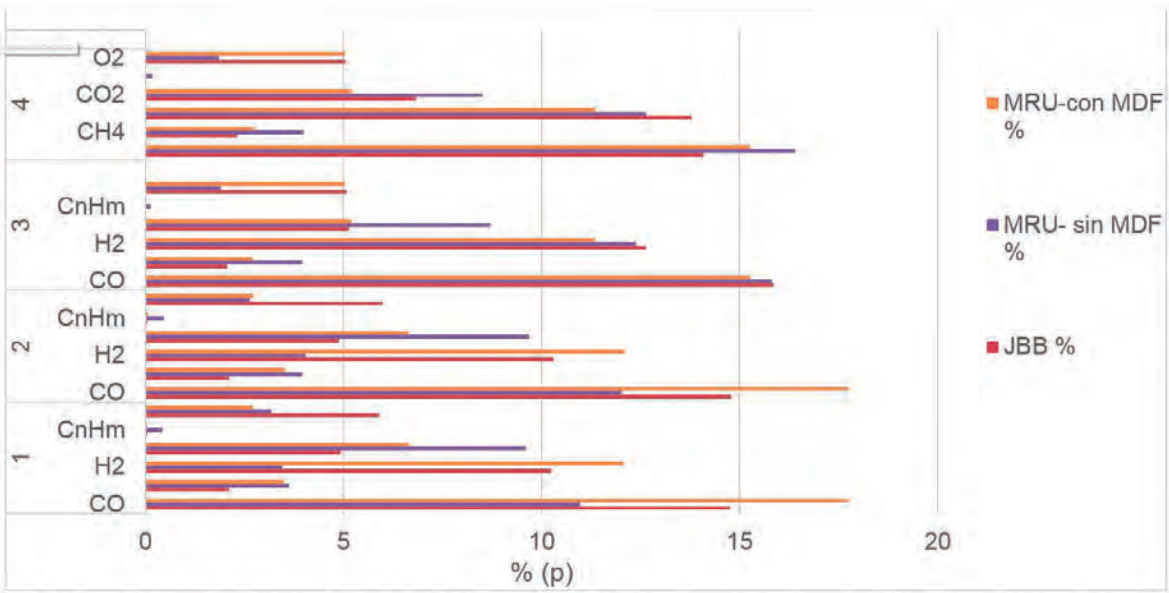


Figura 10. Variación de la concentración del gas de síntesis
Fuente: Los autores

La generación de metano fue similar para los tres tipos de biomasa, alrededor del 3%, siendo mayor para la MRU sin MDF con un promedio de 3,88%. La composición de H_2 está alrededor del 9,8%, siendo mayor para la muestra del JBB. Para el CO la composición fue alrededor del 15%, siendo mayor para la MRU con MDF con 16,5% y de CO_2 para MRU sin MDF con un 9%.

El Poder Calorífico Inferior (PCI) del gas de síntesis muestra valores inferiores al de la biomasa empleada en la generación del gas de síntesis, lo que concuerda con lo reportado por la literatura. El PCI menor obtenido fue para la mezcla del JBB, 936,5 kcal/m³, seguida por la MRU- sin MDF fue de 1003,75 kcal/m³, y con un mayor PCI la MRU-con MDF, 1069,5 kcal/m³.

Rampa de calentamiento

En la Figura 11 se observa que con respecto a línea base establecida, la MRU-natural superó la temperatura de restricción teniendo un pico de 895°C y la temperatura de reducción con un pico 584°C. Por otra parte, la MRU-artificial estuvo en el proceso de calentamiento por encima de las temperaturas de la línea base y luego se mantuvo por debajo de la misma. Adicionalmente se observa que, debido a la presencia de aditivos como resinas sintéticas, agua y parafinas no permitieron que esta alcanzara temperaturas superiores a los 800°C.

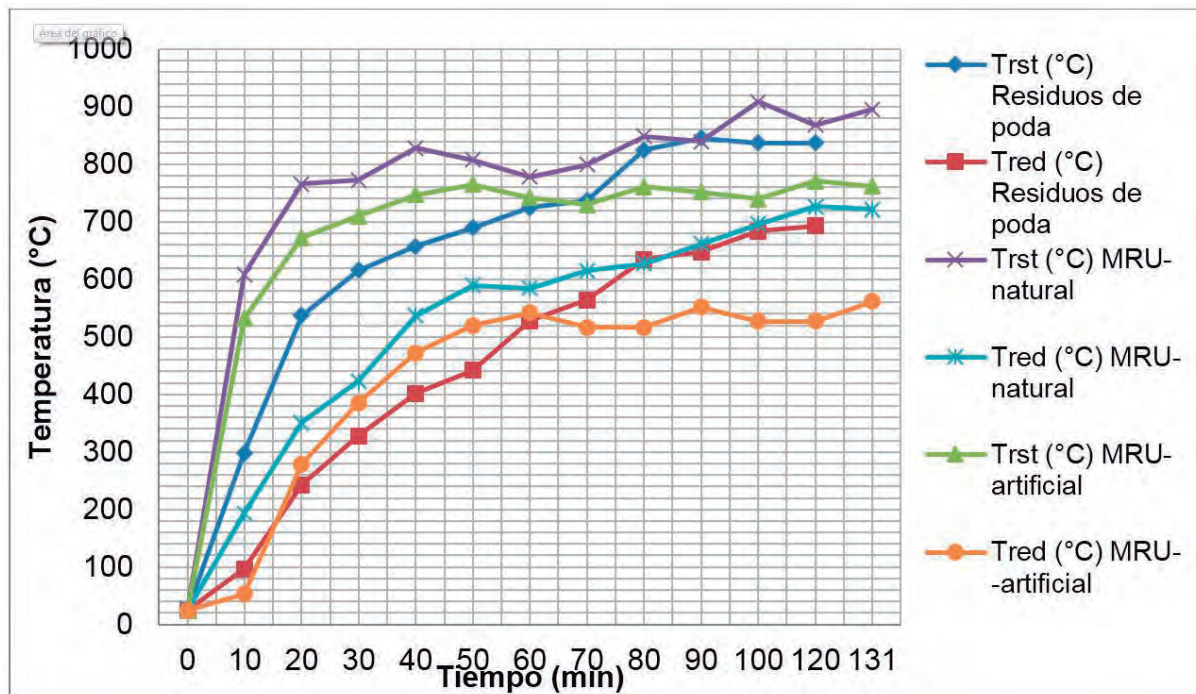


Figura 11. Línea base de operacional de residuos de poda y la curva de operación Madera residual urbana (MRU) natural y artificial. Donde Tred corresponde a la Temperatura de la zona reducción y Trst a la temperatura de la zona del hogar.

Fuente: Los autores

Potencia generada

A continuación, se muestra el promedio de potencia generada en las pruebas con MRU-natural y los residuos de poda (ver Figura 11). En las pruebas con MRU-natural, la biomasa se compactó en la tolva formando una burbuja de aire, lo que provocó que la alimentación de biomasa se afectara. Se activó alarma por sobrepasar la temperatura máxima (1055°C), lo cual provocó el apagado de emergencia del equipo. En las pruebas de MRU-artificial no se pudo generar energía eléctrica debido a que durante las pruebas se produjo mucho alquitrán, y el filtro se saturó en menos de 30 minutos, por lo que los gobernadores se ensuciaron y no funcionaron adecuadamente.

Biomasa consumida por kWh generado

Se determinó el consumo de biomasa por kWh generado, como se muestra en la Tabla 6, siendo el consumo mayor por los residuos de poda con 0,33 kg/kWh y para el MRU-natural de 0,12 kg/kWh, valores que se encuentran por debajo de los 1,2 kg/kWh establecidos por el fabricante.

Tabla 6. Consumo de biomasa por kWh generado

Tipo de biomasa	Biomasa consumida (kg)	Energía producida (kWh)	Kg/kWh
MRU-natural	29,84	244	0,12
MRU-artificial	34,95	-	-
Residuos de poda	63,54	193	0,33

Fuente. Los autores

Desempeño energético

El desempeño energético global del sistema de generación resultó mayor para la MRU-natural con un 60%, con respecto a un 56% con los residuos de poda (Figura 12).

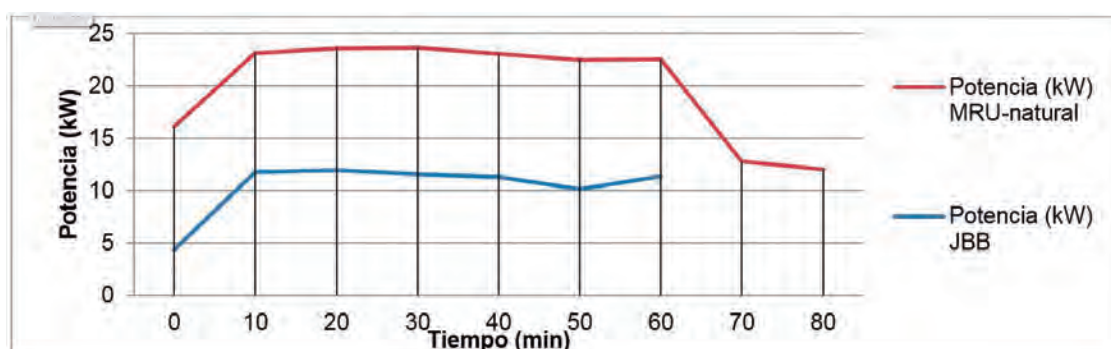


Figura 12. Promedio de potencia generada

Fuente. Los autores

Aspectos económicos

Adicionalmente se determinó el costo de generación del kWh con los residuos de poda y la MRU, en la Tabla 7 se muestran los costos de generación empleando diferentes combustibles. De acuerdo con lo establecido por el fabricante observamos que los costos de generación determinados para los residuos de poda y la MRU se encuentran dentro del rango establecido.

Tabla 7. Comparación de precios de generación

Combustible	Costo de generación (USD\$)
Diésel*	\$0,35 - \$0,70/kWh
Gasolina*	\$0,50 - \$1,00/kWh
Biomasa*	\$0,10 - \$0,30/kWh
MRU	\$0,10 - \$0,20/kWh
Residuos de poda	\$0,10 - \$0,20/kWh

Fuente: Adaptado de (All Power Labs, 2014)

Potencial energético de la MRU de la ciudad de Bogotá

Según un estudio de la UAESP, para el año 2016 la ciudad de acuerdo con los operadores de aseo en promedio el 6% (138.100 t/año = 378 t/día) de los residuos sólidos urbanos corresponde a la madera. Con el fin de tener un estimado de la cantidad de madera residual urbana disponible para el proceso de gasificación, se identificó un estimado de producción per cápita de 0,8 kg/día para el año 2013, lo que equivale a 0,29 t/año, y teniendo en cuenta crecimiento poblacional para el Distrito de Bogotá hasta el 2027 (alcaldía Mayor de Bogotá, 2014), se determinó el volumen de residuos. Con un poder calorífico promedio de 19000 kJ/kg (Viloria, 2013) para madera seca, teniendo en cuenta que la central tendrá un régimen de funcionamiento de 8.000 horas/año y el rendimiento entre la energía química contenida en la biomasa y la energía eléctrica obtenida en este tipo de centrales suele ser del 25% (Toval, 2014), y que el porcentaje de desperdicio de biomasa del 20%, tenemos que la Energía/año disponible se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Determinación de la energía disponible por año de acuerdo con el crecimiento poblacional

Año	Población	% incremento	Ton RSU/año	Ton MRU/año	MJ	Energía disponible por año (MWh)	Potencia (kW)
2013	7.674.971	1,36%	2.225.741	133.544	570.903	1,59E+02	19,82
2014	7.777.815	1,34%	2.255.566	135.334	578.553	1,61E+02	20,09
2015	7.879.705	1,31%	2.285.114	137.107	586.132	1,63E+02	20,35
2016	7.980.565	1,28%	2.314.364	138.862	593.634	1,65E+02	20,61
2017	8.081.120	1,26%	2.343.525	140.611	601.114	1,67E+02	20,87
2018	8.181.326	1,24%	2.372.584	142.355	608.568	1,69E+02	21,13
2019	8.281.138	1,22%	2.401.530	144.092	615.992	1,71E+02	21,39
2020	8.380.512	1,20%	2.430.348	145.821	623.384	1,73E+02	21,65
2021	8.409.005	0,34%	2.438.612	146.317	625.504	1,74E+02	21,72
2022	8.488.891	0,95%	2.461.778	147.707	631.446	1,75E+02	21,93
2023	8.566.989	0,92%	2.484.427	149.066	637.255	1,77E+02	22,13
2024	8.643.235	0,89%	2.506.538	150.392	642.927	1,79E+02	22,32
2025	8.717.567	0,86%	2.528.094	151.686	648.456	1,80E+02	22,52
2026	8.789.922	0,83%	2.549.078	152.945	653.838	1,82E+02	22,70
2027	8.860.242	0,80%	2.569.470	154.168	659.069	1,83E+02	22,88

Fuente: Los autores

Conclusiones

La caracterización fisicoquímica de la MRU proveniente de madera natural y artificial permite concluir que:

- Al presentar un contenido de humedad menor al 10% existe un riesgo de alcanzar temperaturas excesivamente altas en la chimenea beneficiando la formación de escorias y la fusión de la ceniza, un contenido de cenizas menor al 5%, es favorable ya que no tendrá formación de escoria.
- Un pH moderadamente ácido puede afectar su utilización, debido a que en contacto con metales puede corroer.
- Con un porcentaje de aprovechamiento tan bajo, alrededor de 25%, se recomienda evaluar otra tecnología que permita una mayor flexibilidad en cuanto al tamaño de partícula.
- El contenido de materia volátil fue mayor al 10% recomendado, por lo tanto, para este tipo de biomasa es más aconsejable emplearla en gasificadores de lecho móvil en corriente paralela.
- La presencia de nitrógeno en la muestra de MRU con MDF, (madera artificial) aunque baja puede contribuir a la formación de óxidos de nitrógeno (NOx) que favorecen la formación de la lluvia ácida.

Por otra parte, en la generación de energía se observó que la MRU- natural muestra una rampa de calentamiento más rápida que la presentada por los residuos de poda y la MRU-artificial, lo cual se debe al bajo contenido de ceniza y se verá reflejado en una mayor temperatura de operación, y una mayor calidad de gas.

El consumo de biomasa por kWh generado fue de 0,33 kg/kWh, lo que muestra que la MRU se descompone más fácilmente que los residuos de poda, con un valor de 0,12 kg/kWh.

La potencia generada estuvo alrededor de los 12 kW, valor muy cercano al generado por los residuos de poda, llegando a un pico de 12,8 kW. La MRU artificial presenta una alta generación de alquitranes, lo que puede ser propiciado por las temperaturas en la zona de restricción produciendo una conversión parcial de los alquitranes y aumentando la concentración de alquitranes pesados. En consecuencia, se produjo la saturación rápida del medio filtrante y por lo tanto la afectación al funcionamiento del gobernador del motor.

De acuerdo con la evaluación técnica, se concluye que la tecnología Power Pallet® PP20 no es la más adecuada para el aprovechamiento de la MRU, debido a las restricciones del tamaño de partícula y a la limpieza del gas de síntesis. Dentro de los aspectos tecnológicos se resalta que este tipo de tecnología se encuentra en el TRL 8, el cual es un sistema completo y certificado a través de pruebas y demostraciones. Sin embargo, en las condiciones geográficas y climáticas, adicionales al tipo de biomasa empleada y a la operación continua se requiere realizar una evaluación exhaustiva de su influencia y evaluar otras tecnologías a una mayor escala.

De acuerdo con la cantidad estimada promedio anual de madera residual urbana de 144.667 toneladas, la energía disponible será de 1,72E+02 MWh por año, por lo tanto, la potencia máxima que podría instalar el Distrito sería de 20 kWe. Aunque este potencial es bajo comparado con otros tipos de biomasa, es una alternativa viable ambientalmente que permitirá la valorización y reutilización de la MRU.

Referencias

- Alcadía Mayor de Bogotá. (2014). *Demografía, población y diversidad*. Bogota, Colombia. Recuperado de: http://www.sdp.gov.co/portal/page/portal/PortalSDP/Noticias2014/SDP_realiza_lanzamiento_de_su_coleccion_de_libros_Bogota_Hum/02.DEMOGRAFIA.pdf
- All Power Labs. (2014). *Power pallet operation manual*. Recuperado de: <http://www.allpowerlabs.com/products/20kw-power-pallets>
- Aruna, P.B., Laarman, J. G., Araman, P., Coulter, E., y Cubbage, F. (1997). Used pallets as a source of pellet fuel: Current industry status. *Forest Products Journal*, 47(9), 51–56.
- Bratkovich, S., Bowyer, J., Lindburg, A., y Fernholz, K. (2009). *Reclaiming lumber products from waste wood*. Minneapolis. Recuperado de http://www.dovetailinc.org/report_pdfs/2009/dovetailreclaim0109.pdf
- Fernández, K., Martínez, D., y López, M. (2015). *Revisión y análisis de las asociaciones de recicladores en Bogotá diseñando una estrategia de negocio para la valorización y reutilización de residuos sólidos*. (Tesis de pregrado). Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia. Recuperado de: <http://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/10445/1010204773-2015.pdf?sequence=10>
- Fonseca González, N.E (2003). *Estado del arte del uso del gas de gasificación termoquímica de biomasa (GG), en motores de combustión interna alternativos*. (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. Recuperado de: <http://oa.upm.es/10905/>
- García Barriga, H. (1968). Árboles de la Sabana de Bogotá. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 13(50), 273–277.

- Held, J. (2012). *Gasification - Status and technology* ; Rapport SGC 240, (June), 48. Recuperado de: <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC240.pdf>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2007). *"Biomasa: Gasificación."* Madrid. Recuperado de: <http://www.idae.es/publicaciones/biomasa-gasificacion>
- IDAE, y ESCAN, S. A. (2008). *Biomasa: Industria*. Madrid. Retrieved from http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10980_Biomasa_industria_A2008_A_402485e2.pdf
- Jaramillo Henao, G., y Zapata Márquez, L. M. (2008). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia*. (Tesis de Especialización). Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Recuperado de: <http://tesis.udea.edu.co/handle/10495/45>
- Ministerio de Vivienda Ciudad y territorio. (2015). *Guía para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los PGIRS*. Bogota, Colombia. Recuperado de: [http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/PGIRS/PGIRS de Segunda Generación/Guía para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los PGIRS.pdf](http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/PGIRS/PGIRS%20de%20Segunda%20Generación/Guía%20para%20la%20formulación,%20implementación,%20evaluación,%20seguimiento,%20control%20y%20actualización%20de%20los%20PGIRS.pdf)
- Moratorio, D., Rocco, I., y Castelli, M. (2012). Conversión de residuos sólidos urbanos en energía. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica Y Técnica*, 10, 115–126. Recuperado de: http://www.um.edu.uy/docs/10_conversion_de_residuos_solidos_urbanos-en_energia.pdf
- OpEPA. (2016). *Árboles de Bogotá y sus arbustos*. Retrieved April 15, 2017, from http://www.opepa.org/index.php?option=com_content&task=category§ionid=10&id=82&Itemid=30
- Primadera S.A.S. (2017). *Madera urbana, el renacer de la madera*. Recuperado de: <http://www.primadera.com/maderaurbana>
- Pujoldevall Sánchez de Toledo, O. (2015). *Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa*. (Tesis de licenciatura). Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Recuperado de: <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/25234/TFG.pdf?sequence=1>
- Rocha O, J., Vesga, N., y Pinto, S. (2011). *Evaluación exergética del proceso de extracción de aceite de palma africana*. Universidad Industrial de Snatander.
- Serrato Monroy, C. C., y Lesmes Cepeda, V. (2016). *Metodología para el Cálculo de Energía Extraída a Partir de Biomasa en el Departamento de Cundinamarca*. (Teses de pregrado). Universidad Distrital Francisco José De Caldas, Bogotá Colombia.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2015). *Disposición Final de Residuos Sólidos Informe Nacional Elaborado 2015*. Bogota, Colombia. Recuperado de: <http://www.superservicios.gov.co/content/download/10760/88380>
- Toval Martinez, I. (2014). *Estudio de viabilidad, dimensionamiento e instalación eléctrica en una planta de Cogeneración a partir de gasificación de biomasa de 2 MW*. Universidad Politecnica de Cartagena. Recuperado de: <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/4003/pfc5721.pdf?sequence=1>
- UAESP. (2011). *Caracterización de los residuos sólidos institucionales, pequeños productores generados en la ciudad de Bogotá D.C*. Bogota D.C. Recuperado de http://www.uaesp.gov.co/uaesp_jo/images/documentos/Caracterizacion/institucionales_02-29-2012.pdf
- Viloria, J. R. (2013). *Energías renovables. Lo que hay que saber* (2a edición). Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A. Recuperado de: <https://books.google.com/books?id=yKh2AgAAQBAJ&pgis=1>

Evaluación de un proceso no convencional de reciclaje de PET ámbar para la obtención de placas decorativas

Evaluation of a non-conventional recycling process of amber PET to obtain decorative plates

María Clara Ortiz Cortés^{1*}
Jherson Eveiro Díaz Rosero²

¹Colombiana Ingeniera de Materiales, Universidad del Valle. Cali, Colombia.
E-mail: maclor27@gmail.com

²Colombiano PhD. Ingeniería, Universidad del Valle. Cali, Colombia.
E-mail: jhersondiaz@hotmail.com

Recibido: 04- 09 - 2017 Aceptado: 02-05-2018

Resumen

Este trabajo estudia la obtención de placas decorativas a partir de PET reciclado, teniendo en cuenta el efecto de la temperatura y el tiempo en un tipo de procesamiento alternativo de PET reciclado en la resistencia a la flexión, optimizando estos parámetros para la elaboración de placas para el posible reemplazo de cerámicas decorativas. Para ello el PET ámbar reciclado se lavó y cortó en cuadrados de aprox. 1 cm² de largo. Posteriormente se determinó el ensayo a la flexión en una máquina universal Tinius Olsen H50KS bajo la norma ASTM D790 en placas de PET ámbar, verde y transparente obtenidas a 320°C, 330°C y 340°C en 20, 30 y 40 minutos. Así se estudiaron las propiedades térmicas de las materias primas mediante termo gravimetría y calorimetría diferencial de barrido, a una velocidad de calentamiento 10 °C/min, en aire, y un rango de temperatura de 30 °C a 500 °C. Adicionalmente se realizaron mezclas de PET Ámbar (PA) con PET transparente (PT) y PET verde (PV) en la siguiente proporción 70%PA-30%PT, 70%PA-30%PV, y 70%PA-15%PT-15%PV permitiendo mejorar las propiedades mecánicas y lograr diferentes tonalidades en la placa. Los resultados indicaron que la temperatura y el tiempo óptimos para fundir las placas son: 320°C y 40 minutos respectivamente, que permitiera alcanzar una resistencia a la flexión de 71 MPa. Bajo estas mismas condiciones de temperatura y tiempo, las mezclas que incorporan PET transparente y PET verde presentaron una disminución significativa en la resistencia a flexión. Se concluye que las placas obtenidas a partir de PET ámbar reciclado son adecuadas para uso decorativo, ya que según los ensayos mecánicos estas alcanzaron 71 MPa para el ensayo de flexión.

Palabras clave: PET ámbar; reciclaje; plástico; residuos; materiales.

Abstract

This article studies the obtaining of decorative plates from recycled PET, taking in account the effect of temperature and time in a type of alternative processing of recycled PET in the resistance to bending, optimizing these parameters for the production of plates for the possible replacement of decorative ceramics. For that purpose, the recycled amber PET was washed and cut into squares of approx. 1 cm² long. Subsequently, the bending test was determined in a Tinius Olsen H50KS

universal machine under the ASTM D790 standard in amber, green and transparent PET plates, obtained at 320°C, 330°C and 340°C in 20, 30, 40 minutes. The thermal properties of the raw materials were studied thermogravimetry and differential scanning calorimetry, at a heating rate of 10 ° C / min, in air, and in a temperature range of 30 ° C to 500 ° C. Additionally, mixtures of Amber PET (PA) with transparent PET (PT) and green PET (PV) were made in the following proportion: 70% PA-30% PT, 70% PA-30% PV, and 70% PA-15% PT -15% PV to improve the mechanical properties and achieve different tonalities in the plate. The results suggest that the temperature and the optimal time to melt the plates were 320 ° C and 40 minutes respectively, reaching a flexural strength of 71 MPa. Under these same conditions of temperature and time, the mixtures with transparent PET and green PET present a significant decrease in the resistance to flexion. It concluded that the plates obtained from recycled PET are suitable for decorative use, since according to the mechanical tests these reached 71 MPa for the bending test.

Keywords: Amber PET; recycling; plastic; waste; materials.

Introducción

En la actualidad es difícil prescindir de los plásticos, no sólo por su utilidad sino también por la importancia económica que tienen. Esto se refleja en los índices de crecimiento de esta industria que, desde principios del siglo pasado, supera a casi todas las actividades industriales. En Colombia, la industria del plástico se ha caracterizado por ser, en condiciones normales, la actividad manufacturera más dinámica de las últimas tres décadas, con un crecimiento promedio anual del 7% (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004).

Los plásticos se utilizan para envasar, conservar y distribuir alimentos y bebidas que pueden llegar a la población en forma segura, higiénica y práctica. En la actualidad uno de los materiales más usados por el hombre como materia prima para la fabricación de envases es el PET (polietileno tereftalato), el cual debido a las características que posee lo hacen indicado para este tipo de uso. El PET es un material 100 % reciclable, lo cual es una ventaja; pero debido al gran volumen de residuos generados en el planeta, los residuos poliméricos permanecen mucho tiempo en la naturaleza ya que necesitan un tiempo elevado para descomponerse y los rellenos sanitarios ya no dan abasto, además algunos de estos residuos se contaminan debido a la proliferación de bacterias. El reciclaje del PET se hace de forma mecánica (Awaja y Pavel, 2005), convirtiendo los residuos nuevamente en materia prima para la fabricación de diferentes productos. Sin embargo debido a su baja densidad dificulta el almacenamiento y genera bajas remuneraciones en precio por lo que no se hace atractivo para los recicladores (da Rosa, Michelin y Campomanes, 2011).

El PET es un polímero que se obtiene de la combinación de ácido tereftálico y etilenglicol (Awaja y Pavel, 2005), ambos obtenidos a partir del petróleo, por lo cual se presenta un gran impacto ambiental para la obtención del mismo y además es el material más utilizado actualmente por la industria para la fabricación de envases; el consumo global del PET se calcula en 12 millones de toneladas al año con un crecimiento anual de 6% (Ortega, 2012).

Por otro lado Ramírez (2011) en su investigación plantea una propuesta de uso del Polietileno Tereftalato –PET– reciclado como material de refuerzo para la fabricación de elementos de construcción y así contribuir a minimizar el impacto que generan los desechos plásticos industriales, domésticos y de consumo en el medio ambiente. La mayoría de los envases de plásticos usados en la industria están compuestos de materiales poliméricos no desechables, que generan un alto nivel de contaminación después de su uso. Por este motivo, existe la necesidad de intentar reciclar con eficacia aquellos materiales de desecho contaminantes, y así detener o intentar limitar el proceso de contaminación que generan (Ramírez, 2011).

Ya que el PET es reciclable, los envases que son recuperados se transforman de forma mecánica, pero el problema central para el reciclaje del PET es la recolección debido a las reducidas tasas de retorno y el bajo incentivo que no luce muy atractivo para los recolectores; así como la separación de otros componentes ya que puede llegar a confundirse con otros tipos de plástico, sin embargo existen algunos métodos de separación pero estos generan que se eleven los costos (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorio, 2004). Respecto al almacenamiento, éste puede producir riesgo para la salud, ya que se presentan envases contaminados con alimentos y bebidas (Careaga, 1993). A todo lo anterior se suma el

hecho de que algunos sectores de mercado presentan resistencia hacia el uso de materiales reciclados en algunos productos (Valderrama, y Chavarro, 2014).

Debido a las grandes cifras de consumo de PET y al problema de reciclaje del mismo, esta investigación tiene como objetivo aprovechar los residuos de PET que se están acumulando en los vertederos, logrando obtener placas decorativas y así darle otro uso a este material. Para esto se realizaron diferentes técnicas de caracterización térmica y ensayos mecánicos. Con lo anterior se busca establecer una técnica que conlleve a la disminución de este material en los rellenos sanitarios, y así contribuir a la conservación del medio ambiente (ONU, 1992).

Metodología

Materiales

Para la realización de este estudio se utilizaron botellas de PET ámbar, verde y transparente pos consumo, las cuales fueron previamente lavadas y cortadas en hojuelas de aproximadamente 1 cm² (Figura 1). El material se recolectó de centros de acopio de reciclaje. Para la elaboración de las placas, se utilizaron 60 gramos de PET ámbar con el fin de obtener dimensiones de 10 cm de ancho, 10 cm de largo y 0,5 cm de espesor, equivalente a un volumen de 50 cm³.



Figura 1. PET en hojuelas.
Fuente: Los autores.

Métodos

Con el fin de optimizar la temperatura y el tiempo de residencia en el horno, se evaluaron las siguientes temperaturas: 320 °C, 330 °C, 340 °C, con base en la caracterización térmica realizada a los materiales mediante la técnica de TGA/DSC (Figura 2). Para cada temperatura se utilizaron tres tiempos de sostenimiento diferentes: 20, 30, 40 minutos, tiempos definidos después de realizar varias corridas en el horno, y la variable de respuesta fue la resistencia a la flexión. Se determinó optimizar los factores tiempo y temperatura para el PET ÁMBAR ya que este es el material objeto del presente estudio. Posteriormente, teniendo los parámetros óptimos, se elaboraron mezclas de PET Ámbar (PA) con PET transparente (PT) y PET verde (PV), realizando dos mezclas binarias y una ternaria 70%PA-30%PT, 70%PA-30%PV, y 70%PA-15%PT-15%PV con el fin de cambiar la tonalidad de las placas y evaluar el efecto en la resistencia a la flexión.

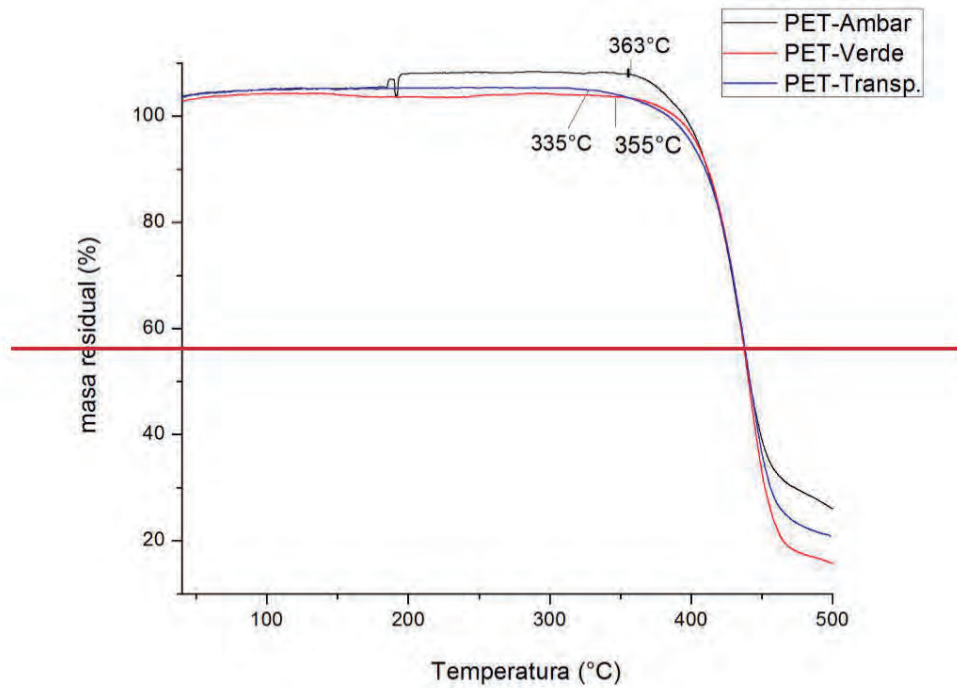


Figura 2. Curvas de TGA para PET ámbar, PET verde y PET transparente.
Fuente: Los autores

Para darle forma a la placa, se fundió el PET en un molde de acero de geometría cuadrada y dimensiones 10 cm X 10 cm (Figura 3). El molde necesitó un calentamiento previo aproximadamente 15 minutos a la temperatura de trabajo para garantizar que la temperatura del horno y el molde fuera la misma al momento de introducir el material. Posteriormente se retiró el molde con el material del horno, y se esperaron 30 segundos para evitar que se deformara la placa durante su enfriamiento en agua. Se escogió agua como método óptimo de enfriamiento ya que un enfriamiento rápido evita la cristalización del material (Mano, 2003). Se utilizó papel antiadherente con teflón para desmoldar fácilmente las placas.



Figura 3. Molde.
Fuente: Los autores.

La caracterización térmica de los materiales antes de procesarlos se realizó mediante la técnica de análisis térmico gravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés) y calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés) en un equipo Mettler Toledo bajo las siguientes condiciones: velocidad de calentamiento 10 °C/min, en aire, y en un rango de temperatura entre 30 °C y 500 °C. El ensayo de resistencia a la flexión se realizó con base en la norma ASTM D790 (American Society for Testing and Materials, ASTM, 2011) mediante el uso de la máquina universal Tinius Olsen H50KS que se encuentra en el laboratorio de ensayos de la Universidad del Valle. Para este ensayo se cortaron probetas rectangulares a partir de las placas, con las dimensiones basadas en las especificaciones de la norma mencionada anteriormente.

Resultados y análisis

• Análisis Termo Gravimétrico (TGA)

La Figura 2 muestra las curvas de porcentaje de masa residual en función de la temperatura para los tres tipos de PET. Se observa que el porcentaje de pérdida de masa para los materiales es aproximadamente el 80% coincidiendo con lo reportado por Arrazola *et al.*, 2013.

Esta pérdida de masa comienza a 335, 355 y 363 °C para PET transparente, PET verde y PET ámbar respectivamente, lo cual se atribuye al inicio de la degradación térmica (Th) de estos materiales. La degradación térmica de los materiales estudiados en la presente investigación es menor a la de un PET virgen, la cual se encuentra alrededor de 380°C (Arrazola *et al.*, 2013), debido a que estos fueron procesados anteriormente y a su contenido de cargas y aditivos. Según la curva de TGA (Figura 3), la temperatura de procesamiento para los tres tipos de PET utilizados en este estudio no debe exceder los 335°C. En el caso de realizar mezclas entre estos y de utilizarse individualmente se debe tener en cuenta no exceder la temperatura de degradación para cada uno de ellos.

• Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Generalmente, el PET presenta una temperatura de transición vítrea (Tg) alrededor de 79°C (Mano, 2003) sin embargo en las curvas de DSC de la figura 4, este pico endotérmico característico no se observa con claridad debido a que los polímeros con gran porcentaje de cristalinidad no exhiben claramente la temperatura de transición vítrea. En la figura 4 se observa un pico endotérmico correspondiente a la temperatura de fusión (Tm) a 251°C para los tres tipos de PET, coincidiendo con el rango de fusión (240-260°C) de PET encontrado por Araque, 2008; Callister, 1996.

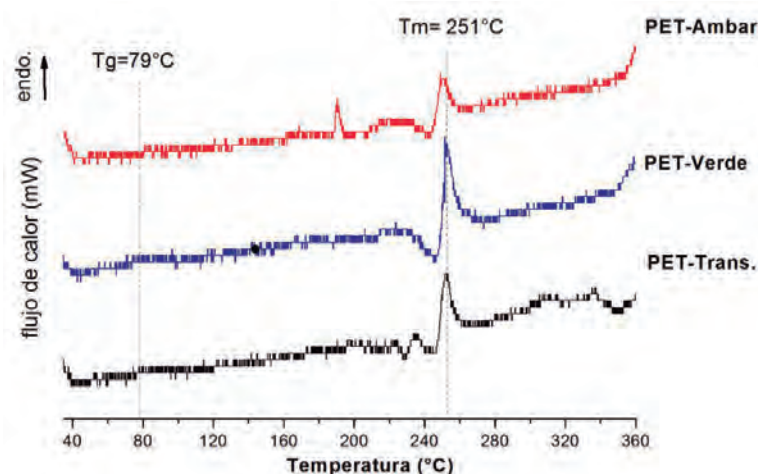


Figura 4. Calorimetría diferencial de barrido para diferentes tipos de PET.
Fuente: Los autores.

• Resistencia a la flexión

El ensayo de flexión fue realizado a las probetas de PET ámbar obtenidas de la placa fundida, ya que en primera instancia se requiere hallar una muestra óptima para posteriormente realizar las mezclas entre los diferentes tipos de PET. En la Figura 5 se evidencia que las probetas que fueron sometidas a diferentes temperaturas por un tiempo de 20 minutos mostraron resistencias menores a 35 MPa, por lo que fueron descartadas ya que alcanzaron resistencias bajas en comparación con las otras probetas. Además, aquellas probetas que fueron tratadas a 320°C y 340°C por 30 min mostraron resistencias más bajas, razón por la cual también fueron descartadas.

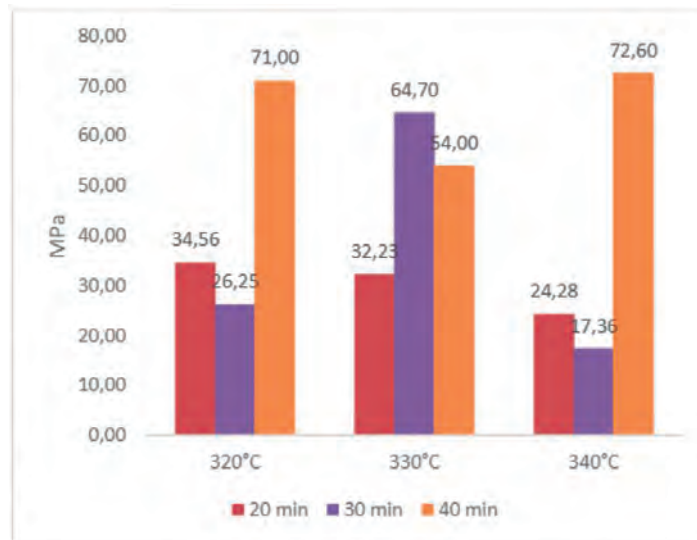


Figura 5. Resultados ensayos de flexión para PET ámbar.

Fuente: Los autores.

La muestra que presentó la mayor resistencia (72,60 MPa) fue la tratada a 340°C por 40 min, sin embargo se decidió tomar como muestra óptima, aquella que se trató a 320°C por 40 min, debido a que requiere menor consumo energético obteniendo resistencias (71 MPa) similares a la máxima. A pesar de que el material obtenido en la presente investigación ya ha sido procesado dos veces, las resistencias de éste se acercan al límite inferior del rango establecido para el PET virgen (80-110 MPa) (Núñez, Roca, y Jorba, 2013).

La Figura 6 b) muestra la curva esfuerzo vs deformación del ensayo a flexión para la muestra de PET ámbar a 320°C y 40 min, en la cual se observa un comportamiento duro y resistente según la gráfica obtenida (Billmeyer, 1975). Además en la Figura 6 a) se aprecia que la probeta no falla de manera catastrófica.

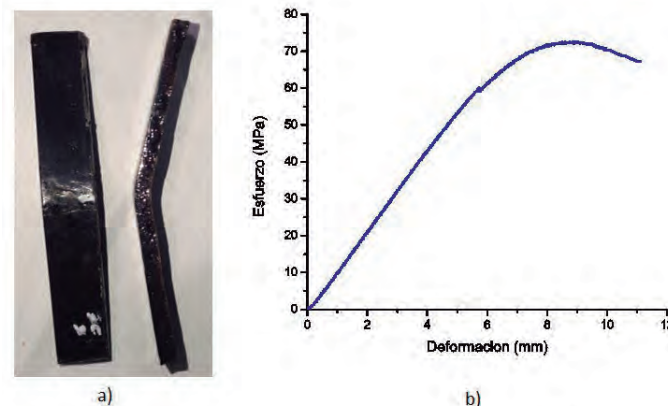


Figura 6. Resultados ensayos de flexión para PET ámbar.

Fuente: Los autores.

Según los resultados que obtuvo Ramírez (2011) en su investigación, la matriz de resina poliéster y adición de PET exhibe un comportamiento de falla frágil, lo cual indica que el material obtenido en la presente investigación puede ser aplicado como una opción de matriz para la elaboración de materiales compuestos.

Ramírez (2011), además estudió la resistencia a la flexión para PET reciclado transparente fundido en horno a condiciones similares y obtuvo resistencias máximas de 9,9 MPa. Además de investigar la resistencia a la flexión de un material compuesto donde se utiliza el PET molido como carga y resina poliéster como matriz, obteniendo resistencias máximas a la flexión de 13 y 14 MPa, lo anterior indica que el material obtenido en la presente investigación puede ser aplicado como una opción de carga para la elaboración de materiales compuestos.

• Mezclas de PET

Se realizaron mezclas con incorporación de PET transparente (PT) y PET verde (PV) con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas y lograr diferentes tonalidades en la placa, como se observa en la Figura 7.



Figura 7. Muestras de las mezclas de PET: a) PA-PV, b) PA-PV-PT, c) PA-PT.

Fuente: Los autores.

En la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la flexión para la muestra óptima (100% PA) y para las distintas mezclas binarias y ternarias. Se obtuvo a partir de los resultados de resistencia a la flexión (Figura 5) que la muestra óptima presenta mayor resistencia (71 MPa), seguido por la mezcla elaborada con PA-PV la cual presentó una resistencia de 31,03 MPa, en este mismo orden, la mezcla elaborada con PA-PT presenta menor resistencia (17,09 MPa); Este comportamiento se atribuye a que el PT y el PV presentan temperaturas de degradación (335 y 355 °C) cercanas a la de procesamiento 320°C. Por el contrario, el buen desempeño de la muestra PA ocurre debido a que la temperatura de degradación (363°C) es más alta con respecto a las de PT y PV, como se mencionó en el análisis termo gravimétrico (Figura 3), lo que ayuda a evitar que este se degrade.

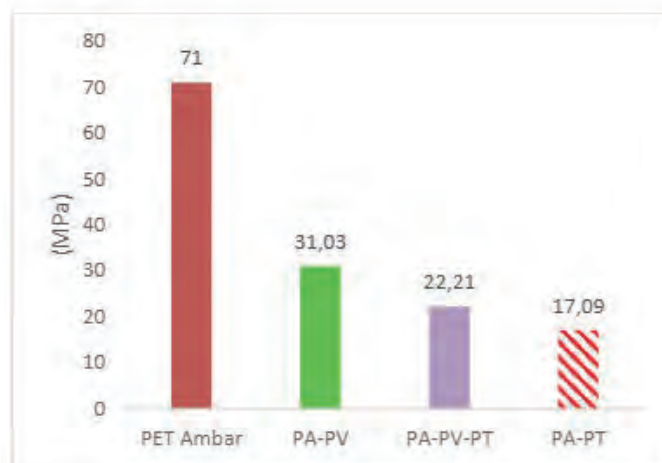


Figura 8. Resistencia a la flexión para mezclas de PET.

Fuente: Los autores.

Conclusiones

El proceso realizado con PET ámbar reciclado es un proceso no convencional ya que no corresponde a los procesos de reciclaje mecánico tradicional. Se optimizaron variables como temperatura y tiempo 320°C, y 40 minutos; empleando un enfriamiento en agua. Estos resultados muestran que este proceso es una buena opción para disminuir el impacto ambiental ya que se necesita gran volumen de PET para la elaboración de cada placa.

Basados en los resultados de los análisis térmicos de los diferentes tipos de PET, se encontró que al adicionar PT y PV se presenta disminución en la resistencia a la flexión debido a que la temperatura de degradación de los mismos está cercana a la temperatura de trabajo (320 °C); sin embargo, las mezclas que se desarrollaron con PET de otra pigmentación, permitieron modificar tonalidades de las placas.

Agradecimientos

Los autores agradecen al centro ASTIN-SENA y a la línea de Biotecnología y Nanotecnología de TECNOPARQUE nodo Cali por poner a su disposición la infraestructura para el desarrollo del presente estudio.

Referencias

- Araque, N. (2008). *Estudio y caracterización de la degradación hidrolítica y compostaje de PET virgen y reciclado*. (Tesis de pregrado). Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Colombia.
- Arrazola, A., Gomez, W., Morales, M., Plata, D., Ramos, J., Osorio, S., ... Meza, E. (2013). Análisis de la degradación térmica mezclas de politereftalato de etileno reciclado (R-PET/PET) proveniente de botellas de bebidas carbonatadas de consumo popular en la ciudad de Cartagena. *Revista Colombiana de Materiales*, 5, 93–99.
- ASTM. (2011). *Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials*, Annual Book of ASTM Standards 1–11. doi: <https://doi.org/10.1520/D0790-10>
- Awaja, F., y Pavel, D. (2005). Recycling of PET. *European Polymer Journal*, 41, 1453–1477. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005>
- Billmeyer, F. W. (1975). *Ciencia de los polímeros*. Barcelona, España: Reverté.

- Callister W. (1996). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Barcelona, España: Reverté.
- Careaga, J. (1993). *Manejo y reciclaje de los residuos de envases y embalajes*. México D.F, México: Instituto Nacional de Ecología.
- Da Rosa, Anie.; Michelin, Carlos.; Campomanes, R. (2011). Reciclaje de PET : evaluación de la eficiencia de separación del contaminante PVC. *ECIPERU*, 8(1), 12.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1998). *Normas técnicas colombianas (NTC) contenidas en las NSR-98: Ley 400 de 1997, Decreto 33 de 1998*. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- Mano, J. F. (2003). Propiedades Térmicas de los Polímeros en Enseñanza de la Ciencia de Materiales e Ingeniería - Estudios DSC sobre POLI (Tereftalato de Etileno). *Journal of Materials Education*, 25(4-6), 155–170.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2004). *Principales procesos básicos de transformación de la industria plástica y manejo, aprovechamiento y disposición de residuos plásticos post-consumo*. Recuperado de [http:// www.documentacion.ideam.gov.co](http://www.documentacion.ideam.gov.co).
- Núñez, C., Roca, A., y Jorba, J. (2013). *Comportamiento mecánico de los materiales. Volumen II. Ensayos mecánicos. Ensayos no destructivos*. Barcelona, España: Edicions de la Universitat de Barcelona.
- ONU. (1992). *Declaracion De Rio sobre el medio ambiente y el desarrollo*. Recuperado de [http:// www.onu.org](http://www.onu.org).
- Ortega, M. (2012). El reciclaje de PET está en su mejor momento. *Tecnología del plástico*, 26(4), 12–16.
- Ramirez, D. S. (2011). *Propuesta de un material compuesto con base al PET reciclado con aplicaciones en construccion* (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Valderrama, F., M., y Chavarro, L. E. (2014). *Estudio dinamico del impacto ambiental asociado al reciclaje y reutilizacion de envases PET en el Valle del Cauca*. Universidad del Valle (tesis). Universidad del Valle, Cali, Colombia.



Validación de un método analítico mediante espectrofotometría UV/VIS, para la cuantificación de formaldehído libre en textiles y aplicación en el análisis de prendas comercializadas en el mercado colombiano¹

Validation of an analytical method by UV / VIS spectrophotometry for quantification of free formaldehyde in textiles and application in the analysis of clothes traded in the colombian market

Ana Cecilia Caro Zapata²
Natalia Andrea Gómez Rave³
Jhosep Aguiar Santa⁴

¹El proyecto financiado por el SENA-SENNOVA en la línea de Innovación, fecha de inicio 4 de enero de 2015, fecha de finalización 30 de diciembre de 2015.

²Colombiana. M.Sc. Ciencias Químicas. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro Textil y de Gestión Industrial. Grupo de Investigación aplicada a la industria textil y química. (GIAITEQ). E-mail: acarosena@sena.edu.co

³Colombiana. Tecnóloga química aplicada a la industria. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro Textil y de Gestión Industrial. Grupo de Investigación aplicada a la industria textil y química. (GIAITEQ). E-mail: nagomez49@misena.edu.co

⁴Colombiano. Tecnólogo Químico Textil. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro Textil y de Gestión Industrial. Grupo de Investigación aplicada a la industria textil y química. (GIAITEQ). E-mail: jhosepsanta@gmail.com

Resumen

Recibido: 23- 09 - 2016 Aceptado: 03-05-2018

El formaldehído ha sido reportado como cancerígeno por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC), también se ha reportado que niveles bajos de formaldehído pueden producir irritación en la piel, los ojos, la nariz. El formaldehído, se emplea como componente en resinas, en tejidos de algodón como producto de acabado antiarruga y antiencogimiento. En el mercado textil colombiano, este tipo de sustancias tóxicas no son controladas. En este trabajo se validó un método analítico mediante espectrofotometría Ultravioleta/Visible para la detección y cuantificación de formaldehído libre en productos textiles, para lo cual se adaptó un método analítico, tomando como referencia la norma ISO 14184-1:2011 y se obtuvieron los siguientes resultados: un coeficiente de correlación de 0,99991 que indica que el método es lineal, también se observó que el método analítico tiene la capacidad de recuperar el 99,34 % $\pm$ 0,941 % del contenido de formaldehído en telas de algodón, además el coeficiente de variación de 0,354983% indica la reproducibilidad del método, cuyos límites de detección y cuantificación fueron de 0,4073 mg/L y 1,358 mg/L de formaldehído libre respectivamente. En los ensayos sobre muestras comercializadas en el mercado colombiano, se cuantificó formaldehído en 46 de las 62 muestras analizadas.

Palabras clave: Textiles; contaminantes; alergias; espectrofotometría Ultravioleta/Visible; formaldehído libre; OEKO-TEX® Standard 100.

Cómo citar: Caro Zapata, A. C., Gómez Rave, N. A., y Aguiar Santa, J. (2018). Validación de un método analítico mediante espectrofotometría UV/VIS, para la cuantificación de formaldehído libre en textiles y aplicación en el análisis de prendas comercializadas en el mercado colombiano. *Informador Técnico* 82(1), 50-66. doi: <http://doi.org/10.23850/22565035.938>

Abstract

Formaldehyde has been reported as a carcinogen by the International Agency for Research on Cancer (IARC) has also been reported that low levels of formaldehyde can cause irritation to skin, eyes, nose. Formaldehyde is used as a component in resins, on cotton fabrics as wrinkle resistance and shape retention. In the Colombian textile market, this type of toxic substances are not controlled. In this research article an analytical method was validated by UV spectrophotometry Visible for detection and quantification of free formaldehyde in cotton, for which an analytical method was adopted, referenced ISO 14184-1: 2011 and the results were: the correlation coefficient of 0,99991 indicates that the method is linear, it was also observed that the analytical method has the capacity to recover $99,34\% \pm 0,941\%$ of the formaldehyde content in cotton textiles, the coefficient of variation of 0.354983% indicates the reproducibility of the method, whose limits of detection and quantification were 0,4073 mg / L and 1,358 mg / L of free formaldehyde respectively. In the tests on samples commercialized in the Colombian market, formaldehyde was quantified in 46 of the 62 samples analyzed.

Keywords: Textiles; pollutants; allergies; spectrophotometry UV / Vis; free formaldehyde; OEKO-TEX® Standard 100.

Introducción

El formaldehído es un gas incoloro a condiciones normales de presión y temperatura, soluble en agua, comercializado con el nombre de formol en soluciones acuosas de concentración alrededor del 40 %. El formaldehído es empleado como conservante en una gran cantidad de productos cosméticos y domésticos debido a su amplio espectro de acción antimicrobiana, además de tener otra gran cantidad de aplicaciones industriales.

Según la Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (ATSDR) de los Estados Unidos, niveles bajos de formaldehído pueden producir irritación a la piel, los ojos, la nariz y la garganta (ATSDR, 1999). Por otra parte en el 2004 fue clasificada por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) dentro del grupo 1 de sustancias químicas, lo cual lo cataloga como carcinogénico en humanos (Kawakami, Maruo, Nakagawa, y Saito, 2015). En Colombia el formaldehído se encuentra dentro de los 33 agentes reconocidos como cancerígenos (Araque, Casas, y Herrera, 2013).

El formaldehído es una causa común de dermatitis alérgica de contacto. La frecuencia de la sensibilidad a este alérgeno en los Estados Unidos (aproximadamente 8 % -9 %) es más alto que en Europa, donde los estudios de resultados de pruebas de parche han informado una frecuencia entre 2 % y 3 %. En España, la frecuencia es 1,61 % (García-Gavín *et al.*, 2011; Scheman *et al.*, 2008). No obstante, se ha observado una tendencia hacia una disminución en la frecuencia de la sensibilidad al formaldehído desde 1980, esto se debe en parte al reemplazo de formaldehído con liberadores de formaldehído en cosméticos, artículos de tocador y la introducción de resinas para acabados textiles que liberan bajas cantidades de formaldehído. Los liberadores de formaldehído son sustancias que liberan formaldehído a medida que se descomponen o que pueden contener cantidades traza de formaldehído remanente después de la síntesis de estas sustancias. (Latorre, Silvestre, y Monteagudo, 2011).

Las resinas liberadoras de formaldehído se emplean ampliamente en la industria textil, principalmente en prendas de algodón, viscosa, lino y sus mezclas con fibras sintéticas, ya que las fibras celulósicas tienden a arrugarse después del lavado, debido a la hinchazón de las fibras por la absorción de humedad. La incorporación de un acabado polimérico en los poros de las fibras impide que las moléculas de agua se absorban sobre la fibra. Por otra parte hay otras resinas que generan una reacción de reticulación multifuncional entre la resina y los grupos hidroxilo de las moléculas de celulosa, lo cual finalmente dificultará la hinchazón de la fibra y por ende su plegamiento (Frosch, Menné, y Lepoittevin, 2006).

La desventaja de estas resinas antiarrugas es que tienden a liberar formaldehído, debido a una degradación posterior de la resina durante almacenamiento, durante el uso debido al sudor y por lavado ácido o con cloro (Peng, Yang, y Wang, 2012; Yao, Wang, Ye, y Yang, 2013). Dichas resinas también son una causa común de dermatitis de contacto, ya que afectan principalmente las áreas de la piel en contacto con el textil como el interior de los muslos, cuello y áreas propensas a una mayor sudoración como la axilas, la ingle, pliegues del codo y detrás de las rodillas (De Groot y Maibach, 2010; Cohen, Hatch, Maibach, y Pratt, 2001). Estudios realizados en Estados Unidos e Israel han identificado pacientes que presentan reacciones alérgicas al contacto con las prendas debido a la exposición a estas resinas liberadoras, ya sea debido al formaldehído

liberado o por el contacto con la resina. En un estudio en Israel (Lazarov, 2004), 40 de 644 individuos testeados (6,2 %) reaccionaron a una o más de seis resinas textiles a base de formaldehído probadas. En un estudio anterior, los autores encontraron una incidencia del 5,9% entre 286 pacientes, también en Israel (Lazarov, Trattner, Abraham, y David, 2002). Las tasas de prevalencia de la sensibilidad debida a las resinas liberadoras de formaldehído en Norte América en la década de 1990 oscilaron entre 5,0% a 7,2% (Marks *et al.*, 2000; Marks *et al.*, 2003). Desde 2001, las tasas han sido estables en un nivel un poco más del 2% (Zug *et al.*, 2009; Warshaw *et al.*, 2008; Pratt *et al.*, 2004).

Las primeras resinas a base de formaldehído empleadas para acabados textiles liberaban grandes cantidades de esta sustancia, causando así dermatitis alérgica al contacto con las prendas. Se reportaron entre los años de 1950 y 1960 niveles de 5000 a 12 000 ppm (0,5–1,2%) de formaldehído en prendas de rayón y algodón fabricadas en Europa y concentraciones de 750 ppm (0,075 %) de formaldehído en prendas fabricadas en Estados Unidos en la misma época (De Groot y Maibach, 2010). Con el tiempo se han ido desarrollando resinas que liberan una menor cantidad de formaldehído, pero con el mismo efecto sobre la fibra. La resina más comúnmente utilizada se basa en dimetilol dihidroxietilurea modificada, que libera menos de 50 ppm de formaldehído (Schindler, y Hauser, 2004; Frosch *et al.*, 2006).

El límite de formaldehído libre en prendas que producirá dermatitis clínica es desconocido. En algunos experimentos (Fisher, Kanof y Biondi, 1962), se sugiere que la dermatitis por contacto con las prendas se producirá solo cuando los textiles contengan más de 750 ppm de formaldehído libre, pero estos niveles han sido discutidos, ya que en estudios con sustancias liberadoras de formaldehído en cosméticos las concentraciones que pueden llegar a causar dermatitis son <200 ppm (De Groot y Maibach, 2010).

El contenido de formaldehído y otras sustancias nocivas en diferentes productos textiles ha estado regulado desde hace más de veinte años en la Unión Europea, Japón y Estados Unidos, lo cual ha permitido controlar el uso de sustancias nocivas, como el formaldehído en los procesos textiles. La asociación internacional Oeko Tex, agrupa representantes de 14 institutos de investigación textil en el mundo, ha fijado como límites máximos de concentración permitidos de formaldehído < 300 mg/kg en prendas que no tienen contacto con la piel, < 75 mg/kg en prendas en contacto con la piel y < 16 mg/kg en indumentaria para bebé (OEKO TEX, 2016). En Colombia el contenido de formaldehído en prendas no está regulado, ya que no se cuenta con una conciencia sobre su efecto en la salud y pocos laboratorios a nivel nacional ofrecen los servicios para la cuantificación de dicha sustancia en productos textiles.

En el año 2007 en la Unión Europea se realizó un estudio en el cual se cuantificó el formaldehído presente en muestras comercializadas en este mercado y se encontró que el 10% de todas las muestras (23 muestras de 221) liberaron más de 30 mg / kg de formaldehído. El valor más alto fue de 162,5 mg / kg. El 11% de las muestras destinadas al contacto directo con la piel (20 de las 183 muestras, incluyendo fundas de almohada y fundas de cojines de sofá) superaron el límite de 30 mg / kg establecido por la Decisión 2002/371 / CE de la Comisión (etiqueta ecológica). Alrededor del 3% de las muestras también superaron el límite de 75 mg / kg fijado por el Oeko-Tex 100 para artículos en contacto con la piel. 5 de 46 (11%) prendas de vestir para bebés menores de dos años mostraron una liberación de formaldehído superior a 20 mg / kg (OEKO TEX, 2016; Piccinini, Senaldi, y Summa, 2007).

La cuantificación de formaldehído libre en textiles puede llevarse a cabo a través de varios métodos analíticos. El método del ácido cromotrópico es un método semicuantitativo que se basa en una reacción química entre el ácido cromotrópico y el formaldehído libre que da como resultado la formación de un color púrpura, el problema es que otros aldehídos y cetonas también pueden reaccionar con el ácido, dando lugar a una decoloración amarilla que puede interferir con el test (Gryllaki-Berger, Mugny, Perrenoud, Pannather, y Frenk, 1992). También se puede cuantificar indirectamente por cromatografía líquida de alta eficiencia HPLC con detección ultravioleta. Alrededor de este método se han publicado varias modificaciones en diferentes matrices, pero en todas se debe hacer una derivatización con dinitrofenilhidrazina u otros agentes cromóforos (Gryllaki-Berger *et al.*, 1992; Wahed, Razzaq, Dharmapuri, y Corrales, 2016; de Freitas Rezende, de Souza Santos Cheibub, Pereira Netto y de Carvalho Marques, 2017). En el método de acetilacetona, el formaldehído reacciona con acetilacetona en presencia de amonio para producir 3,5-diacetil-1,4-dihidrolutidina (DDL), el cual absorbe luz a una longitud de onda de 412 nm y se puede cuantificar espectrofotométricamente (Fregert, Dahlquist, y Gruvberger, 1984). Este método es el sugerido en varias normas internacionales ISO 14184-1:2011, JIS-L1041 (International Organization for Standardization, 2011; Standard, 2011), ya que proporciona una operación simple, con alta sensibilidad y reproducibilidad (Kawakami *et al.*, 2015).

En el presente trabajo se validó un método analítico mediante espectrofotometría ultravioleta/visible para la detección y cuantificación de formaldehído libre en prendas comercializadas en el mercado colombiano, tomando como referencia la norma ISO 14184-1:2011, la cual indica que se debe realizar una extracción del formaldehído libre en la prenda con agua a 40°C y agitación constante, posteriormente al extracto se le agrega acetilacetona en solución de acetato de amonio con el fin de producir 3,5-diacetil-1,4-dihidrolutidina (DDL), el cual absorbe luz a una longitud de onda de 412 nm y permite cuantificar de manera indirecta el formaldehído espectrofotométricamente (International Organization for Standardization, 2011).

Materiales y métodos

Reactivos

Formaldehído al 37%, ácido acético glacial, acetato de amonio grado análisis de pureza 98 %, agua tipo I, papel filtro de celulosa de 110 mm 5A.

Equipos

Baño de agua con control de temperatura, agitador orbital (shaker) con control de temperatura y agitación, espectrofotómetro UV/Vis de rango espectral entre 190 y 900 nm.

Extracción y cuantificación de formaldehído

La cuantificación de formaldehído libre en textiles se realiza tomando como referencia la norma ISO 14184-1:2011.

Reactivo de Nash: Se disuelven 150 g de acetato de amonio en aproximadamente 800 mL de agua tipo I, se agregan 3,0 mL de ácido acético glacial y 2,0 mL de acetil acetona, se vierten en un balón volumétrico de 1000,0 mL y se afora con agua tipo I. Antes de utilizar, se deja reposar por un tiempo mínimo de 12 horas. La solución final se debe conservar en una botella oscura durante un tiempo de 6 semanas como máximo, puesto que la sensibilidad puede variar ligeramente en un largo periodo de tiempo.

Tratamiento de muestra: Se corta la muestra de tela en cuadros de aproximadamente 0,5 cm x 0,5 cm de área y se pesa $2,5000 \pm 0,0001$ g en un erlenmeyer de 250 mL limpio y seco, se añade 100,0 mL de agua tipo I, se tapa el Erlenmeyer con papel aluminio y se lleva a extracción en un agitador orbital (shaker) a $40 \pm 2^\circ\text{C}$, durante una hora y 150 rpm. Al cabo de este tiempo se deja enfriar la muestra a temperatura ambiente y se filtra sobre un balón volumétrico de 100,0 mL. Se miden 5,0 mL del filtrado en un tubo de ensayo con tapa y se le agrega 5,0 mL de reactivo de Nash, se agita el tubo de ensayo y se sumerge en el baño de agua a $40 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 30 ± 5 min, al cabo de este tiempo se deja enfriar y reposar la solución por 30 ± 5 min más a temperatura ambiente. Por último, se mide la absorbancia a una longitud de onda de 412 nm, la cual es la longitud de onda de máxima absorbancia del 3,5-diacetil-1,4-dihidrolutidina (DDL).

Parámetros de validación

Como parámetros de validación se evaluaron, los señalados en la Conferencia Internacional de Armonización ICH: linealidad, especificidad, precisión, precisión intermedia, exactitud, límite de detección y cuantificación (Guideline, 2005).

Linealidad: Se prepararon soluciones estándar de concentraciones entre (0,56462 y 12,099) mg/l de formaldehído a partir de la solución de formaldehído certificada al 37%. Se eligieron dichas concentraciones por encontrarse dentro de los límites establecidos para el método espectrofotométrico para el cumplimiento de la ley de Lambert - Beer y por la ausencia de distorsión en el espectro. Para la lectura en el espectrofotómetro se vertió 5 mL de cada una de las soluciones estándar en un tubo de ensayo con tapa y se le agregó 5,0 mL de reactivo de Nash, con el fin de formar la sustancia

coloreada. Posteriormente los tubos se agitaron y se sumergieron en un baño de agua a $40 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 30 ± 5 min, al cabo de este tiempo se dejó enfriar y reposar las soluciones por 30 ± 5 min más a temperatura ambiente. Por último, se midió las absorbancias a una longitud de onda de 412 nm. Como criterios de aceptación de la linealidad se evaluaron los siguientes parámetros: coeficiente de variación de los factores de respuesta (f) $\leq 5\%$, coeficiente de correlación (r) $\geq 0,990$, coeficiente de determinación ajustado (r^2) $\geq 98,01\%$, prueba de hipótesis para la pendiente (b) $\neq 0$, prueba de hipótesis para el intercepto (a) $= 0$.

Especificidad: Como criterio de aceptación se evaluó que no se presentaran interferencias por componentes de la matriz, productos de degradación o compuestos relacionados para cinéticas de primer orden con relación al analito (degradaciones mayores al 5% y menores al 30%).

Interferencia de matriz: Con el fin de evaluar la influencia de los analitos de degradación de la matriz sobre la lectura espectrofotométrica de formaldehído, se realizó el procedimiento de tratamiento de las muestras de tela descrito con anterioridad a una prenda de algodón comercial, hasta obtener aproximadamente dos litros de extracto. Para cada ensayo de degradación se midieron 90,0 mL del extracto y para la lectura en el espectrofotómetro se realizó el tratamiento de derivatización del formaldehído y se tomó el dato de absorbancia a una longitud de onda de 412 nm.

Interferencia analito degradado: Con el fin de evaluar la influencia del formaldehído degradado sobre la lectura espectrofotométrica de éste, se realizó el procedimiento de tratamiento de las muestras de tela descrito anteriormente a una prenda de algodón comercial, hasta obtener aproximadamente dos litros de extracto, a dicho extracto se le agregó formaldehído en una cantidad equivalente a 1,8 mg/L de formaldehído en solución, ya que ésta es la concentración que se espera medir en un extracto de una prenda que contenga 75 mg/Kg de tela, el cual es el límite máximo permitido en prendas en contacto con la piel, según la norma OEKO-TEX® Standard 100 (OEKO TEX, 2016). Para cada ensayo de degradación se midieron 90,0 mL del extracto y para la lectura en el espectrofotómetro se realizó el tratamiento de derivatización del formaldehído y se tomó el dato de absorbancia a una longitud de onda de 412 nm.

Tratamientos de degradación

Interferencia por hidrólisis ácida: Se agrega 5 mL de una solución de ácido clorhídrico 1N, se somete a calentamiento en baño de agua a $70 \pm 5^\circ\text{C}$ durante una hora, se deja enfriar, se neutraliza con 5 mL de una solución de hidróxido de sodio 1N, se ajusta el volumen a 100,0 mL con agua tipo I y se homogeniza.

Interferencia por hidrólisis básica: Se agrega 5 mL de una solución de hidróxido de sodio 1N, se calienta en baño de agua a $70 \pm 5^\circ\text{C}$ durante una hora, se deja enfriar, se neutraliza con 5 mL de una solución de ácido clorhídrico 1N, se ajusta el volumen a 100,0 mL con agua tipo I y se homogeniza.

Interferencia por termólisis: Se calienta en baño de agua a $80 \pm 5^\circ\text{C}$ durante dos horas, dejar enfriar, se ajusta el volumen a 100,0 mL con agua tipo I y se homogeniza.

Interferencia por fotólisis: Se expone a luz ultravioleta durante 24 horas.

Interferencia por oxidación: Se agrega 5 mL de peróxido de hidrógeno al 1% V/V, se calienta en baño de agua a $70 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 30 minutos, se deja enfriar, se ajusta el volumen a 100,0 mL con agua tipo I y se homogeniza.

Precisión: Según la norma Oeko-Tex® Standard 100 la concentración máxima permitida de formaldehído en prendas que estarán en contacto con la piel es de 75 mg/kg, por lo cual se enriqueció con dicha concentración una muestra de tela de algodón cruda, sin ningún proceso preliminar (OEKO TEX, 2016). Posteriormente se pesaron seis muestras de la tela enriquecida y se sometió al tratamiento de muestra descrito anteriormente. Como parámetro de aceptación para evaluar la precisión se evaluó el coeficiente de variación del porcentaje de recuperación de formaldehído en la muestra dopada, el cual debe ser $\leq 2\%$.

Precisión Intermedia: Se enriquecieron tres muestras de tela de algodón cruda, sin ningún tratamiento preliminar con concentraciones de 16 mg/kg, 75 mg/kg y 90 mg/kg. Se evaluaron estas concentraciones ya que son los límites máximos permitidos en la normatividad internacional para prendas en contacto directo con la piel y en prendas para bebés. Las telas enriquecidas se trataron por triplicado según el procedimiento de tratamiento de muestra descrito anteriormente. Se realizó un estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) entre analistas. Como parámetro de aceptación se evaluó que no existan diferencias estadísticas significativa entre analistas con relación a los estimados obtenidos entre las muestras evaluadas en el estudio (R&R).

Exactitud: Se enriquecieron tres muestras de tela de algodón cruda con concentraciones (80%, 100% y 120%), tomando como referencia la concentración máxima permitida de 75 mg/kg, lo que equivale a concentraciones de 60 mg/kg, 75 mg/kg y 90 mg/kg. Las telas enriquecidas se trataron por triplicado según el procedimiento de tratamiento de muestra descrito anteriormente.

Se evaluó el porcentaje de recuperación promedio para las tres concentraciones, el cual debe ser de $100\% \pm 2\%$, para un factor de protección del 95%, equivalente a un $k=1,96$.

Límite de detección (LD) y cuantificación (LC) (Tabla 9): Se estimó la respuesta promedio de 10 lecturas de blanco (ruido, solución de reactivo de Nash sin formaldehído) y se multiplicó dicho valor por 3 para el LD y por 10 para el LC.

Muestras analizadas

Se analizó por triplicado el contenido de formaldehído libre, en prendas comercializadas en diferentes almacenes de cadena de la ciudad de Medellín, Colombia.

Análisis estadístico

Los criterios de aceptación de cada uno de los parámetros de validación se calcularon mediante el software STATGRAPHICS Centurion XVI, versión 16.1.18.

Resultados y discusión

Parámetros de validación

Linealidad

Análisis de los factores de respuesta

En la Tabla 1 se observa que el valor-P más bajo de las pruebas realizadas es igual a 0,146055. Debido a que el valor-P para esta es mayor o igual que 0,05, no se puede rechazar la idea de que Factor de Respuesta proviene de una distribución normal con 95% o más, de confianza.

Tabla 1. Prueba de normalidad correspondiente al parámetro factores de respuesta de las concentraciones evaluadas para la curva de calibración.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,912043	0,146055

Fuente: Los autores

Según se observa en la Figura 1 y en la Tabla 2; con un nivel de confianza del 95%, los datos correspondientes al parámetro factores de respuesta excluyendo atípicos, se ajustan a una distribución de probabilidad normal, debido a que el P-Valor es mayor a 0,05, lo que permite estimar el valor de dispersión correspondiente al coeficiente de variación con un resultado de 4,03%.

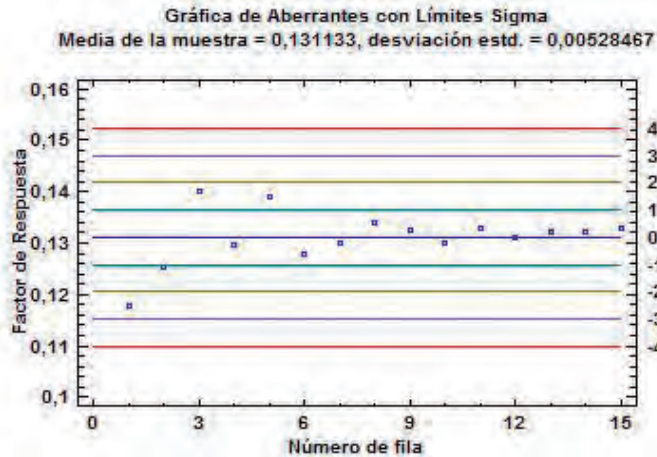


Figura 1. Gráfico de comportamiento correspondiente al parámetro factores de respuesta de las concentraciones evaluadas para la curva de calibración.

Fuente: Los autores.

Tabla 2. Resumen estadístico correspondiente al parámetro factores de respuesta de las concentraciones evaluadas para la curva de calibración.

Recuento	15
Promedio	0,131133
Desviación estándar	0,00528467
Coef. de variación	4,03002%
Mínimo	0,11772
Máximo	0,140025
Rango	0,0223048
Sesgo estandarizado	-1,29625
Curtosis estandarizada	1,88967

Fuente: Los autores.

Modelo de regresión lineal

Los datos se ajustan a un modelo de regresión lineal el cual describe la relación entre las variables Absorbancia y concentración de formaldehído en mg/L (Figura 2).

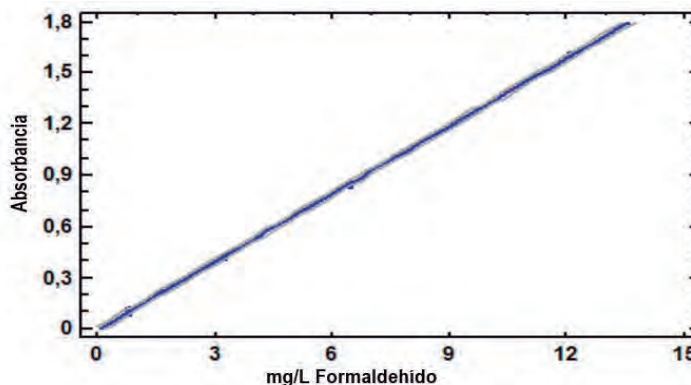


Figura 2. Regresión lineal para cuantificación de formaldehído.

Fuente: Los autores.

En la Tabla 3 se muestran los valores de pendiente e intercepto para la ecuación de la ecuación lineal del modelo ajustado $\text{Absorbancia} = -0,00304564 + 0,132572 \cdot \text{mg/L formaldehído}$.

Tabla 3. Resumen resultados modelo de regresión lineal para cuantificación de formaldehído.

	Estimado de	Error	Estadístico	
Parámetro	Mínimos Cuadrados	Estándar	T	Valor-P
Intercepto	-0,00304564	0,00312642	-0,974162	0,3478
Pendiente	0,132572	0,000492177	269,359	0,0000

Fuente: Los autores.

Según el análisis de varianza del modelo de regresión lineal para cuantificación de formaldehído (Tabla 4), el P-Valor del modelo es menor que 0,05 existe una relación estadísticamente significativa entre las variables Absorbancia y concentración de formaldehído en mg/L con un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 4. Análisis de varianza del modelo de regresión lineal para cuantificación de formaldehído.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	4,46085	1	4,46085	72554,44	0,0000
Residuo	0,000799276	13	0,0000614827		
Falta de Ajuste	0,000262109	4	0,0000655272	1,10	0,4141
Error Puro	0,000537167	9	0,0000596852		
Total (Corr.)	4,46165	14			

Fuente: Los autores.

Coefficiente de correlación = 0,99991

R-Cuadrada = 99,9821 %

R-Cuadrada = 99,9807 %

Error estándar del est. = 0,00784109

El estadístico R-Cuadrado ajustado con grados de libertad indica que el modelo lineal explica un 99,9807 % de la variabilidad obtenida en la Absorbancia con respecto a la concentración de formaldehído en mg/L. El coeficiente de correlación es igual a 0,99991, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar para los residuos es de 0,00784109.

Pruebas de hipótesis para la pendiente y el intercepto

Hipótesis nula: intercepto = 0,0

Hipótesis alterna: intercepto no igual 0,0

Estadístico t calculado = -0,974162

Valor-P = 0,347755

No rechazar la hipótesis nula para alfa = 0,05.

Como el valor-P en la prueba de hipótesis para el intercepto es mayor a 0,05 se acepta la hipótesis nula, lo que indica que el intercepto es estadísticamente igual a cero.

Hipótesis nula: pendiente = 0,0

Hipótesis alterna: pendiente no igual 0,0

Estadístico t calculado = 269,359

Valor-P = 0,0

Rechazar la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

Como el valor-P en la prueba de hipótesis para la pendiente es menor a 0,05, se acepta la hipótesis alternativa, lo que indica que la pendiente es estadísticamente diferente de cero.

Especificidad

En la Figura 3 se observa que la interferencia de matriz y degradaciones asociadas no presentan una respuesta en porcentaje mayor al 1%. En la Figura 4 se observa que las degradaciones asociadas analito – matriz presentan degradaciones de primer orden ninguna degradación es menor del 5%, ni mayor al 30%.

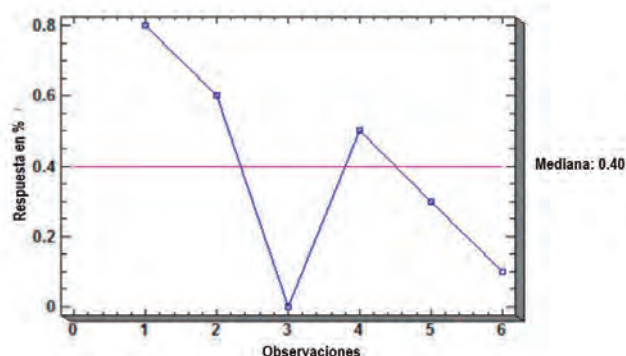


Figura 3. Comportamiento de las interferencias asociadas a las degradaciones de matriz sobre la respuesta de formaldehído.

Fuente: Los autores.

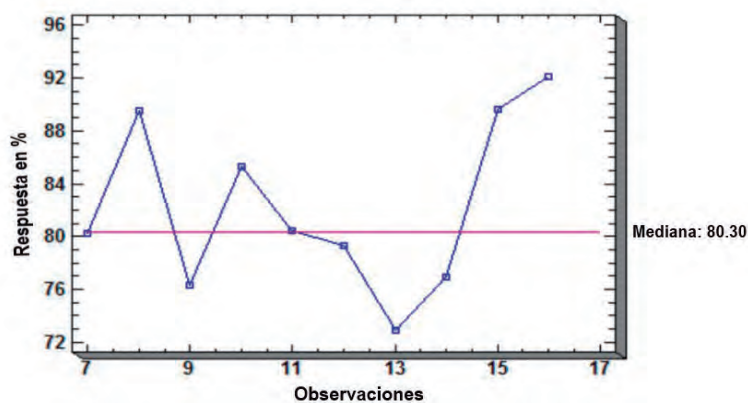


Figura 4. Comportamiento de la respuesta asociada a las interferencias de degradaciones de (analito (formaldehído) - matriz).

Fuente: Los autores.

Precisión

En la Tabla 5 se observa que el P-Valor es mayor a 0,05, indicando con un nivel de confianza del 95% que los datos obtenidos se pueden asumir como provenientes de una distribución de probabilidad normal. En la Tabla 6 se observa que el coeficiente de variación obtenido es 0,354983%. En la Figura 5 se observa que todos los datos se distribuyen en un rango de dos desviaciones estándar por encima y por debajo con relación al valor nominal, lo cual indica la reproducibilidad del método analítico.

Tabla 5. Prueba de normalidad correspondiente al ensayo de precisión de la respuesta de formaldehído.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,951246	0,767548

Fuente: Los autores

Tabla 6. Resumen estadístico correspondiente al ensayo de precisión de la respuesta de formaldehído.

Promedio	93,7133
Desviación estándar	0,332666
Coeficiente de variación de variación	0,354983%
Mínimo	93,28
Máximo	94,22
Rango	0,94

Fuente: Los autores.

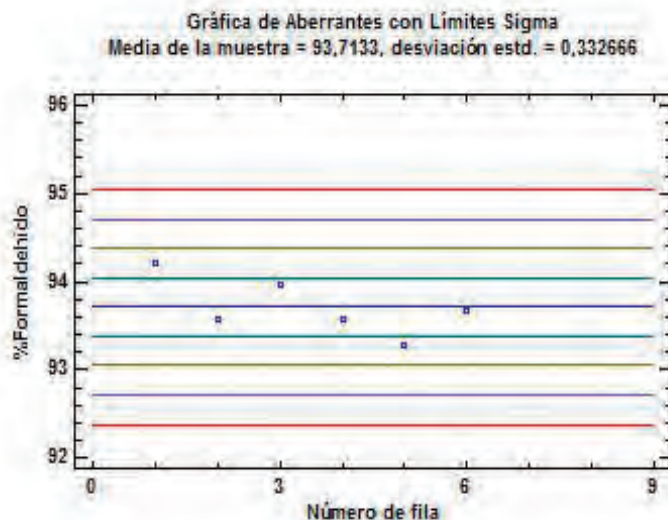


Figura 5. Comportamiento correspondiente al ensayo de precisión de la respuesta de formaldehído.

Fuente: Los autores.

Precisión intermedia

En la Figura 6 y en la Tabla 7, se observa que el 35,80 % de la variabilidad obtenida en el estudio (R&R) la aporta la repetibilidad del analista (precisión en las réplicas de las muestras preparadas por nivel de concentración), el 50,25 % la reproducibilidad y el 13,95 % la interacción Analista*Muestra. El porcentaje de variación total es 1,07378 % lo que indica que los analistas presentan un desempeño estadísticamente igual, debido a que dicho porcentaje de variación total es menor al 10%, lo cual se puede observar más claramente en la Figura 7.

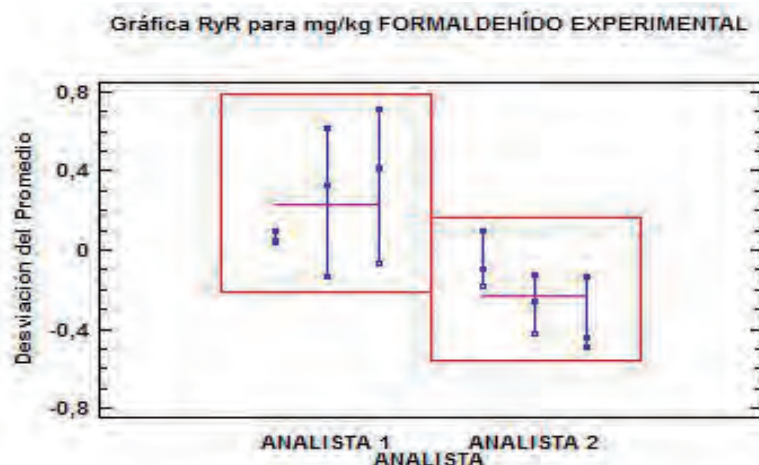


Figura 6. Comportamiento de las desviaciones de los resultados de concentración de formaldehído obtenidas por los analistas en tres niveles de concentración.

Fuente: Los autores.

Tabla 7. Resumen estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R).

Medición	Sigma	Porcentaje	Varianza	Porcentaje de	Porcentaje
Unidad	Estimada	Variación Total	Estimada	Contribución	de (R&R)
Repetibilidad	0,250836	0,642431	0,0629185	0,00412717	35,80
Reproducibilidad	0,297201	0,761179	0,0883283	0,00579394	50,25
Interacción	0,156609	0,401101	0,0245264	0,00160882	13,95
(R & R)	0,419253	1,07378	0,175773	0,0115299	100,00
Partes	39,0425	99,9942	1524,32	99,9885	
Variación Total	39,0448	100,0	1524,49		

Fuente: Los autores.



Figura 7. Comportamiento de los analistas en relación con los resultados de concentración de formaldehído obtenidos en los tres niveles de concentración.

Fuente: Los autores.

Exactitud

En la Tabla 8 se observa que el P-Valor es mayor a 0,05 tanto, lo que permite estimar los datos como provenientes de una distribución de probabilidad normal. Con un nivel de confianza del 95%, se puede inferir que el 95% de los datos estarán entre el 97,0372% y 101,643%. El método analítico para la cuantificación de formaldehído libre tiene la capacidad de recuperar el $99,34\% \pm 0,941\%$ (Figura 8).

Tabla 8. Prueba de normalidad para los datos obtenidos en la recuperación en %.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,918435	0,258754

Fuente: Los autores.

Normal

Límites de Tolerancia Normal para % de Recuperación

Límites de tolerancia del 95,0% para 99,73% de la población

X barra $\pm$ 4,82785 sigma

Superior: 101,643

Inferior: 97,0372

En la Figura 8 se observa que los límites de control se encuentran cubiertos por los límites de especificación con resultados para los índices de capacidad potencial y real a corto plazo de 1,52 y 1,02 respectivamente.

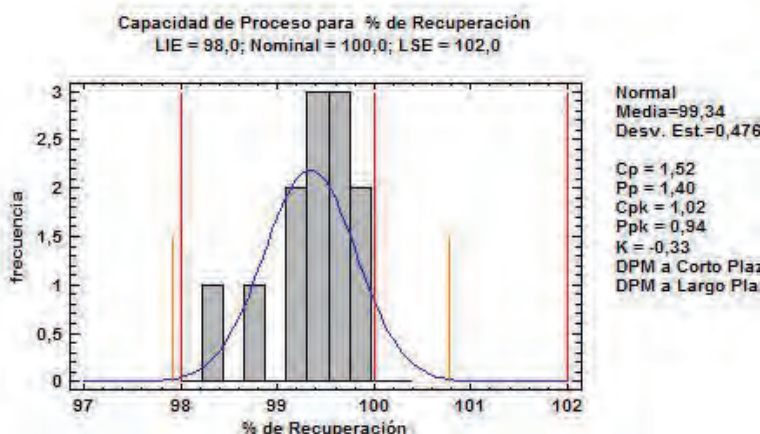


Figura 8. Índices de capacidad a corto plazo para el porcentaje de recuperación de formaldehído.

Fuente: Los autores.

Límite de detección (LD) y límite de cuantificación (LC)

En la Tabla 9 se muestran los límites de detección y cuantificación del método analítico validado para la cuantificación de formaldehído libre en textiles.

Tabla 9. Límites de Detección y Cuantificación para la cuantificación espectrofotométrica de Formaldehído.

LD (mg/L de Formaldehído)	0,4073
LC (mg/L de Formaldehído)	1,358

Fuente: Los autores.

Muestras comerciales analizadas

En la Tabla 10 se muestran los resultados de los análisis de formaldehído libre en 62 muestras comercializadas en el mercado colombiano. Se encontraron concentraciones entre 0,2 y 86,7 mg/kg de formaldehído.

Tabla 10. Contenido de formaldehído (mg/kg) en las muestras comerciales analizadas, mediante el método validado.

MUESTRA	CONCENTRACIÓN FORMALDEHÍDO (mg/kg)	DESVIACIÓN ESTANDAR (mg/kg)
Muestra 1	ND	NA
Muestra 2	ND	NA
Muestra 3	86,7	0,3
Muestra 4	72,1	0,4
Muestra 5	4,3	0,3
Muestra 6	ND	NA
Muestra 7	8,6	0,9
Muestra 8	9,3	0,9
Muestra 9	21,3	0,7
Muestra 10	3,7	0,5
Muestra 11	12,3	0,5
Muestra 12	0,2	0,5
Muestra 13	13,4	0,1
Muestra 14	15,6	0,1
Muestra 15	15,6	0,1
Muestra 16	17,7	0,1
Muestra 17	15	0,1
Muestra 18	29,1	0,1
Muestra 19	21,8	0,1
Muestra 20	22,2	0,3
Muestra 21	29,9	0,3
Muestra 22	11,5	0,1
Muestra 23	5,8	0,2
Muestra 24	43	0,1
Muestra 25	25,4	0,8
Muestra 26	9,6	0,1
Muestra 27	45,7	0,3
Muestra 28	5	0,1
Muestra 29	8,1	0,2
Muestra 30	ND	NA
Muestra 31	16,9	0,1
Muestra 32	36,4	0,8
Muestra 33	28,6	0,1

Continúa en la página siguiente

Viene de la página anterior

Muestra 34	36,7	0,1
Muestra 35	27,7	0,2
Muestra 36	61,6	0,5
Muestra 37	8,15	0,3
Muestra 38	ND	NA
Muestra 39	ND	NA
Muestra 40	ND	NA
Muestra 41	ND	NA
Muestra 42	ND	NA
Muestra 43	ND	NA
Muestra 44	ND	NA
Muestra 45	ND	NA
Muestra 46	ND	NA
Muestra 47	ND	NA
Muestra 48	39,6	0,1
Muestra 49	8,4	0,1
Muestra 50	4,7	0,5
Muestra 51	25,1	0,2
Muestra 52	25,1	0,9
Muestra 53	26,3	0,3
Muestra 54	26,3	0,4
Muestra 55	11,4	0,8
Muestra 56	5,1	0,9
Muestra 57	4,3	0,9
Muestra 58	14,9	0,3
Muestra 59	14,9	0,1
Muestra 60	38,7	0,1
Muestra 61	ND	NA
Muestra 62	ND	NA

ND: No Detectable, NA: No Aplica

Fuente: Los autores.

Conclusiones

Los resultados encontrados en el estudio de validación indican que el método analítico utilizado para la cuantificación de formaldehído libre en prendas es lineal, ya que el coeficiente de correlación de 0,99991, indica que existe una relación relativamente fuerte entre la absorbancia y la concentración de formaldehído. Además, se observa que el método analítico tiene la capacidad de recuperar el $99,34\% \pm 0,941\%$ del contenido de formaldehído en telas de algodón. El coeficiente de variación de 0,354983% indica la reproducibilidad del método analítico. El estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) permite observar que los analistas presentan un desempeño estadísticamente igual, ya que la variación total es de 1,07378 %. También se observa con un nivel de confianza del 95% que el Analista y la interacción Analista*Muestra, no presentan influencia significativa en los resultados obtenidos.

Los límites de detección y cuantificación de este método analítico fueron de 0,4073 mg/L y 1,358 mg/L de formaldehído libre respectivamente, que equivale a que el método validado permite detectar una cantidad mínima de formaldehído 16,2 mg/kg de tela y permite cuantificar mínimamente 54,3 mg/kg de tela, lo cual indica que este método permite cuantificar el formaldehído por debajo del límite máximo permitido para prendas, en contacto directo con la piel, el cual es de 75 mg de formaldehído/kg de tela. Mientras que, para prendas para bebe, este método resulta adecuado para detectar el formaldehído a partir de su límite máximo permitido, el cual es de 16 mg/kg de tela.

El método analítico validado para la cuantificación de formaldehído libre permitió cuantificar concentraciones entre 0,2 y 86,7 mg/kg en el 74% de las muestras comercializadas en el mercado nacional y solo una de las 62 muestras analizadas excedió el límite máximo permitido para prendas en contacto directo con la piel de 75mg/kg según Oeko tex. Las concentraciones encontradas en el mercado nacional fueron similares a las reportadas en Japón en el año 2015 de 2 a 89 mg/kg de formaldehído en prendas comerciales (Kawakami *et al.*, 2015) y a las reportadas en Estados Unidos por la Oficina de Responsabilidad del Gobierno en el año 2010 para prendas nacionales de 75,4 mg/kg de formaldehído (States y Accountability, 2010). En este mismo estudio se reportaron concentraciones hasta de 206 mg/kg de formaldehído en prendas provenientes de China, India, Indonesia, Pakistán y Tailandia. Los niveles de formaldehído reportados de todos estos países están por encima de los niveles reportados en la Unión Europea, los cuales fueron de 30 mg/kg (Piccinini *et al.*, 2007), ello demuestra el éxito de más de quince años de regulación. En Colombia se requiere un mayor control sobre la presencia de este tipo de sustancias en las prendas de vestir, ya que estan demostrados sus efectos nocivos para la salud humana, lo cual resulta aún más preocupante en las prendas de uso infantil y en las prendas de uso íntimo.

Bibliografía

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (1999). *Formaldehído (Cas # 50-00-0)*. Recuperado de https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts111.pdf
- Araque, L. G., Casas, J. P., y Herrera, D. A. (2013). *Caracterización de la exposición ocupacional a formaldehído en trabajadores del sector salud y educación en Colombia 2004-2013* (Tesis de Maestría). Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia.
- Cohen, D., Hatch, K. L., Maibach, H., y Pratt, M. (2001). Clothes Make the (Wo)man: Diagnosis and Management of Clothing Dermatitis. *American Journal of Contact Dermatitis*, 12(4), 229–231. doi: <https://doi.org/10.1097/01634989-200112000-00012>
- de Freitas Rezende, F. B., de Souza Santos Cheibub, A. M., Pereira Netto, A. D., y de Carvalho Marques, F. F (2017). Determination of formaldehyde in bovine milk using a high sensitivity HPLC-UV method. *Microchemical Journal*, 134, 383–389. doi: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2017.07.003>
- De Groot, A. C., y Maibach, H. I. (2010). Does allergic contact dermatitis from formaldehyde in clothes treated with durable-press chemical finishes exist in the USA? *Contact Dermatitis*, 62(3), 127–136. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0536.2009.01581.x>
- Fisher, A. A., Kanof, N. B., y Biondi, E. M. (1962). Free formaldehyde in textiles and paper: Clinical significance. *Archives of Dermatology*, 86(6), 753–756. doi: <https://doi.org/10.1001/archderm.1962.01590120051008>
- Fregert, S., Dahlquist, I., y Gruvberger, B. (1984). A simple method for the detection of formaldehyde. *Contact Dermatitis*, 10(3), 132–134. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0536.1984.tb00017.x>
- Frosch, J., Menné, T., y Lepoittevin, J. P. (Eds.). (2006). *Contact Dermatitis* (4th ed.). Heidelberg, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi: <https://doi.org/10.1007/3-540-31301-X>
- García-Gavín, J., Armario-Hita, J. C., Fernández-Redondo, V., Fernández-Vozmediano, J. M., Sánchez-Pérez,

- J., Silvestre, J. F., Uter, W., y Giménez-Arnau, A. M. (2011). Epidemiología del eczema de contacto en España. Resultados de la Red Española de Vigilancia en Alergia de Contacto (REVAC) durante el año 2008. *Actas Dermo-Sifiliográficas*, 102(2), 98-105. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ad.2010.10.015>
- Gryllaki-Berger, M., Mugny, C., Perrenoud, D., Pannather, A., y Frenk, E. (1992). A comparative study of formaldehyde detection using chromotropic acid, acetylacetone and HPLC in cosmetics and household cleaning products. *Contact Dermatitis*, 26(3), 149-154. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0536.1992.tb00284.x>
- Guideline, I. H. T. (2005, November). *Validation of analytical procedures: text and methodology Q2 (R1)*. In International Conference on Harmonization, Geneva, Switzerland (pp. 11-12).
- International Organization for Standardization, T. (2011). Determination of Formaldehyde – Part 1: Free and Hydrolysed Formaldehyde (water extraction method). *ISO 14184-1*.
- Kawakami, Y., Maruo, Y. Y., Nakagawa, T., y Saito, H. (2015). A screening method for detecting formaldehyde emitted from textile products. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 62, 41-46. doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.11.005>
- Latorre, N., Silvestre, J. F., y Monteagudo, A. F. (2011). Allergic Contact Dermatitis Caused by Formaldehyde and Formaldehyde Releasers. *Actas Dermo-Sifiliográficas (English Edition)*, 102(2), 86-97. doi: [https://doi.org/10.1016/S1578-2190\(11\)70765-X](https://doi.org/10.1016/S1578-2190(11)70765-X)
- Lazarov, A. (2004). Textile dermatitis in patients with contact sensitization in Israel: A 4-year prospective study. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, 18(5), 531-537. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1468-3083.2004.00967.x>
- Lazarov, A., Trattner, A., Abraham, D., y David, M. (2002). Frequency of textile dye and resin sensitization in patients with contact dermatitis in Israel. *Contact Dermatitis*, 46(2), 119-120. doi: <https://doi.org/10.1034/j.1600-0536.2002.460217.x>
- Marks Jr, J. G., Belsito, D. V., DeLeo, V. A., Fowler Jr, J. F., Fransway, A. F., Maibach, H. I., ... y Storrs, F. J. (2000). North American Contact Dermatitis Group Patch-Test Results, 1996-1998. *Archives of Dermatology*, 136(2), 272-273. doi: <https://doi.org/10.1001/archderm.136.2.272>
- Marks, J. J., Belsito, D. V., DeLeo, V. A., Fowler, J. F., Fransway, A. F., Maibach, H. I., ... y Storrs, F. J. (2003). North American Contact Dermatitis Group patch-test results, 1998 to 2000. *American Journal of Contact Dermatitis: Official Journal of the American Contact Dermatitis Society*, 14(2), 59-62. doi: <https://doi.org/10.1097/01634989-200306000-00002>
- OEKO TEX. (2016). *Limit values and fastness*. doi: https://doi.org/10.2115/fiber.65.P_225
- Peng, H., Yang, C. Q., y Wang, S. (2012). Nonformaldehyde durable press finishing of cotton fabrics using the combination of maleic acid and sodium hypophosphite. *Carbohydrate Polymers*, 87(1), 491-499. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.08.013>
- Piccinini, P., Senaldi, C., y Summa, C. (2007). *European survey on the release of formaldehyde from textiles*. Recuperado de: http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC36150/6150%20-%20HCHO_survey_final_report.pdf
- Pratt, M. D., Belsito, D. V., DeLeo, V. A., Fowler, J. F., Fransway, A. F., Maibach, H. I., ... y Sherertz, E. F. (2004). North American Contact Dermatitis Group patch-test results, 2001-2002 study period. *Dermatitis*, 15(4), 176-183. doi: <https://doi.org/10.1097/01206501-200412000-00003>

- Scherman, A., Jacob, S., Zirwas, M., Warshaw, E., Nedorost, S., Katta, R., Cook, J., Castanedo-Tardan, M. P. (2008). Contact Allergy: Alternatives for the 2007 North American Contact Dermatitis Group (NACDG) Standard Screening Tray. *Disease-a-Month*, 54(1-2), 7-156. doi: <https://doi.org/10.1016/j.disamonth.2007.10.002>
- Schindler, W. D. y Hauser, P. J. (2004). *Chemical finishing of textiles*. New York, USA: CRC Press LLC. Recuperado de: <https://books.google.es/s?hl=es&lr=&id=S42kAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=textile+processes+and+chemical+agents&ots=u0N7GkkR5A&sig=TFkPLs3yczinKyUZLIhsHLq9ok#v=onepage&q=textile+processes+and+chemical+agents&f=false>
- Standard, J. I. (2011). Methods for Resin Finished Textiles. *JIS L1041*.
- States y Accountability, G. (2010). Formaldehyde in while levels in clothing generally appear to be low , allergic contact dermatitis is a health issue for some people h ighlights, (august).
- Wahed, P., Razzaq, M. A., Dharmapuri, S., y Corrales, M. (2016). Determination of formaldehyde in food and feed by an in-house validated HPLC method. *Food Chemistry*, 202, 476-483. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.01.136>
- Warshaw, E. M., Belsito, D. V., DeLeo, V. A., Fowler Jr., J. F., Maibach, H. I., Marks, J. y Storrs, F. J. (2008). North American Contact Dermatitis Group patch-test results, 2003-2004 study period. *Dermatitis*, 19(3), 126-136. <https://doi.org/10.2310/6620.2007.06060>
- Yao, W., Wang, B., Ye, T., y Yang, Y. (2013). Durable press finishing of cotton fabrics with citric acid: Enhancement of whiteness and wrinkle recovery by polyol extenders. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(46), 16118-16127. doi: <https://doi.org/10.1021/ie402747x>
- Zug, K. A., Warshaw, E. M., Fowler, J. F., Maibach, H. I., Belsito, D. L., Pratt, M. D., ... y DeLeo, V. A. (2009). Patch-test results of the North American Contact Dermatitis Group 2005-2006. *Dermatitis*, 20(3), 149-160.

Resistencia química de concretos de activación alcalina ceniza volante/escoria: Sulfatos y ácidos

Chemical resistance of alkali-activated fly ash/slag concrete: sulfates and acids

William Gustavo Valencia-Saavedra¹
Daniela Eugenia Angulo-Ramírez²
Ruby Mejía de Gutiérrez³

¹Colombiano. Estudiante de Doctorado en Ingeniería de Materiales Universidad del Valle, Grupo de Materiales Compuestos (CENM), Cali, Colombia. e-mail: william.gustavo.valencia@correounivalle.edu.co

²Colombiana. PhD en Ingeniería de Universidad del Valle, Grupo de Materiales Compuestos (CENM), Cali, Colombia. e-mail: daniela.eugenia.angulo@correounivalle.edu.co

³Colombiana. PhD en Ciencias Químicas. Profesora Titular de la Universidad del Valle, Grupo de Materiales Compuestos (CENM), Cali, Colombia. e-mail: ruby.mejia@correounivalle.edu.co

Recibido: 02-09-2017 Aceptado: 05-05-2018

Resumen

Una de las características más importantes del concreto en adición a sus propiedades mecánicas es su durabilidad, que se asocia con la vida en servicio de las estructuras expuestas a ciertas condiciones o ambientes; esta propiedad es requerida para definir los potenciales campos de aplicación y facilitar la comercialización de nuevos materiales cementantes. En este estudio, se evaluó la resistencia química de un concreto de activación alcalina basado en cenizas volantes (CV) y escoria de alto horno (ESC) en relación 80/20; como material de referencia se utilizó un concreto a base de cemento convencional (OPC). La resistencia a la compresión del concreto Geo CV /ESC a 28 días de curado normal fue de 42,9 MPa, 26% superior a la reportada por el concreto OPC. Geo CV/ESC expuesto a sulfatos hasta la edad de 180 días no muestra expansión y la pérdida de resistencia a la compresión no es significativa (2%) en comparación con OPC (39%). En el caso de la exposición a los ácidos, Geo CV/ESC presenta una pérdida de resistencia del 39% y OPC de hasta el 80%. Estas características demuestran una mayor resistencia química del concreto de activación alcalina y por tanto su potencial uso en ambientes agresivos.

Palabras Clave: Ácidos; ceniza volante; geopolímeros; propiedades mecánicas; resistencia química; sulfatos.

ABSTRACT

One of the most important features of concrete, in addition to its mechanical properties, is its durability, which is associated to the in-service life of structures exposed to certain conditions or environments; this property is required to define the potential application fields and facilitate the commercialization of new cementing materials. In this study, the chemical resistance of a concrete based on a binary mixture of fly ash (FA) and blast furnace slag (GBFS) in an 80/20 ratio was evaluated. A concrete based on Portland cement (OPC) was used as a reference material. The compressive strength of Geo FA/GBFS at 28 days cured at room temperature was 42.9 MPa, 26% higher than that reported by the OPC concrete. Geo FA/GBFS exposed to sulfates does not show expansion, and the loss of compressive strength at 180 days aged of exposure was not significant (2%) compared to OPC concrete (39%). In the case of exposure to acids, FA/GBFS had a loss of resistance

Como citar: Valencia-Saavedra, W., Angulo-Ramírez, D., y Mejía de Gutiérrez, R. (2018). Resistencia química de concretos de activación alcalina ceniza volante/escoria: sulfatos y ácidos. *Informador Técnico*, 82(1), 67-77. doi: <https://doi.org/10.23850/22565035.1351>

of 39% and OPC of up to 70%. These characteristics show the best performance of the activated material and its potential use in aggressive environments.

Keywords: Acids; geopolymers; mechanical properties; chemical resistance; sulfates.

Introducción

Aunque el cemento Portland ordinario (OPC) es el material más comúnmente utilizado en la construcción, su resistencia a los ataques químicos tales como ácidos y sulfatos es aún un tema de interés en la comunidad científica. Los materiales cementicios pueden afectarse significativamente en presencia de ácidos dada la reacción ácido-base con el hidróxido de calcio presente en los poros e inclusive la potencial afectación de algunos de los productos de hidratación. El ataque por sulfato, por su parte, es generalmente causado por la exposición de los concretos a los sulfatos alcalinos o alcalinotérreos que están presentes en el suelo, en aguas subterráneas, aguas superficiales y aguas de mar, los cuales pueden ingresar al concreto y reaccionar con los componentes de la matriz cementicia. Este ataque da lugar a la aparición de grietas, delaminación, generación de productos expansivos, tales como etringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), y ocasionan la pérdida de resistencia en las estructuras del concreto (Crammond, 2003; Irassar, Bonavetti, Trezza, y González, 2005). En las últimas décadas, los cementos geopoliméricos han surgido como una de las posibles alternativas a los cementos de OPC debido a su alta resistencia a tempranas edades y sus buenas propiedades de durabilidad tales como la resistencia al ataque ácido y a sulfatos (Palomo, Grutzeck, y Blanco, 1999). Entre estos, los cementos de activación alcalina basados en ceniza volante (CV) como precursor vienen siendo investigados desde los años 1990, con resultados altamente prometedores; especialmente en algunas condiciones agresivas en los que concretos de cemento portland son vulnerables (Song, Marosszeky, Brungs, y Munn, 2005).

Los cementos geopoliméricos podrían ser una alternativa, por ejemplo, en el desarrollo de concretos resistentes a los ácidos. Davidovits, (2005); Van Jaarsveld, Van Deventer, y Lorenzen, (1997) encontraron que cementos de activación alcalina basados en metacaolín presentan una pérdida de masa muy baja cuando las muestras se sumergen en soluciones de ácido sulfúrico al 5% durante 4 semanas. Bakharev (2005b) estudió la resistencia de este tipo de materiales y concluye que presentan mejor resistencia que sus homólogos producidos con cemento portland. En el mismo sentido, Song *et al.*, (2005) utilizando ensayos acelerados demostraron la mayor durabilidad de concretos de activación alcalina en una solución de ácido sulfúrico al 10% durante 56 días, lo cual está igualmente reportado por otros investigadores (Wallah y Rangan, 2006; Thokchom, Ghosh, y Ghosh, 2009; Allahverdi y Skvara, 2005, 2006). Sin embargo, la falta de métodos normalizados para evaluar el desempeño de los cementos en ambientes ácidos ha dado lugar a que sea difícil el correlacionar los resultados obtenidos por los diferentes investigadores.

En cuanto el desempeño en presencia de sulfatos, los estudios son escasos y en su gran mayoría han sido llevados a cabo en pastas y morteros y muchos de estos a concentraciones variables (Abora *et al.*, 2014; Singh, Ishwarya, Gupta, y Bhat-tacharyya, 2015). Škvára, Jílek, y Kopecký, (2005) investigaron la resistencia a sulfatos de pastas y morteros de CV activada hasta edad de 720 días, y reportan incrementos resistentes a lo largo del ensayo, indicando que no se observaron cambios dimensionales ni tampoco formación de fases expansivas, se presume que el sulfato de sodio actúa como activante en la mezcla. Puertas, Gutiérrez, Fernández-Jiménez, Delvasto, y Maldonado (2002), estudiaron el comportamiento de morteros de escoria siderúrgica y de mezclas de Escoria/CV 50/50 activadas con silicato de sodio y con hidróxido de sodio, se concluye que en ambos casos los morteros activados presentan alta resistencia al ataque por sulfatos, sin embargo las muestras activadas con NaOH son más susceptibles a la degradación, lo cual atribuyen a la presencia de fases expansivas tales como yeso y etringita. Ismail, Bernal, Provis, Hamdan, y van Deventer (2012), reportan en pastas activadas de escoria/CV 50/50 expuestas a sulfatos de sodio y magnesio al 5% por un periodo de tres meses, una mayor agresividad del sulfato de magnesio que atribuyen a la mayor descalcificación del gel silicato cálcico hidratado y a la formación de yeso, coincide así con el tipo de acción que ha sido reportada para concretos de cemento portland (Aye y Oguchi, 2011).

Con base en lo anterior, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el desempeño de concretos de activación alcalina basados en la mezcla binaria de una ceniza volante colombiana (CV), procedente de una caldera industrial, con escoria de alto horno (ESC) en proporciones 80/20, luego de su exposición a sulfato de sodio y de magnesio (Na_2SO_4 y MgSO_4) y ácidos

acético (CH_3COOH) y sulfúrico (H_2SO_4) a edad hasta de 180 días, y comparar este comportamiento con el correspondiente de un concreto convencional. Para ello se determinó el nivel de expansión longitudinal y el cambio de resistencias mecánicas para el caso de los concretos expuestos a sulfatos; para las muestras expuestas a ácidos se midió la pérdida de resistencia mecánica, el cambio de peso y se realizó una inspección visual de las muestras.

Materiales y metodología experimental

Materiales

En el presente estudio se utilizó como precursor del concreto de activación alcalina una ceniza volante (CV), subproducto de la combustión del carbón en una caldera ubicada en una planta papelera. La composición química de CV, determinada por fluorescencia de rayos X, se presenta en la Tabla 1, donde se aprecia que se compone de óxidos de sílice, alúmina y hierro aproximadamente en un 56,5% cumpliendo así el requisito definido en la norma ASTM C618-12 (2012) (50% mínimo) para ceniza volante tipo C, sin embargo su contenido en óxido de calcio es bajo (6,68%) y generalmente este tipo de cenizas reportan órdenes superiores al 10%. Es de destacar el alto contenido de inquemados ($\text{LOI}=20,67\%$), valor que supera ampliamente el definido en la norma (6% máximo), al igual que un contenido relativamente alto en óxidos de sodio (7,94%). Estas últimas características limitan el uso de este material como adición puzolánica al cemento portland y justifican la búsqueda de otras alternativas de valorización.

Tabla 1. Características físicas y químicas de los materiales utilizados

Características, %	CV	ESC	Cemento (OPC)
SiO_2	28,53	31,99	20,20
Al_2O_3	19,18	14,54	7,00
Fe_2O_3	8,80	1,12	4,80
Na_2O	7,94	0,23	--
CaO	6,68	46,86	58,40
S	2,71	0,82	--
MgO	2,24	1,05	--
TiO_2	1,62	0,54	--
Otros	1,65	1,03	--
LOI	20,67	1,82	9,60

Fuente: Los autores

Adicionalmente se utilizó una escoria siderúrgica de alto horno (ESC) como reemplazo parcial de la CV en el material geopolimérico, constituyendo así una mezcla de tipo binario. La escoria procede de la empresa Acerías Paz del Río, y acorde con la composición química incluida en la misma Tabla 1, presenta un coeficiente de calidad ($(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2)$) y un coeficiente de basicidad ($\text{Kb} = \text{CaO} + \text{MgO}/\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) de 1,92 y 1,03 respectivamente; esto permite su clasificación como una escoria de tipo neutra. Como material cementante de referencia se utilizó un cemento portland (OPC), cuyas características (Tabla 1), indican que corresponde a un cemento altamente adicionado, en este caso con un material calizo. Como activante se empleó una mezcla de silicato de sodio comercial ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) de composición SiO_2 : 32,24%; Na_2O : 11,18%; H_2O : 55,85% e hidróxido de sodio industrial (NaOH) del 96,7% de pureza.

Preparación de los especímenes y ensayos realizados

Los concretos de activación alcalina se elaboraron con la mezcla binaria ceniza volante (CV) y escoria de alto horno (ESC) en relaciones de 80/20, utilizando como activante alcalino una mezcla de silicato de sodio e hidróxido de sodio; la dosificación del activante se ajustó para obtener proporciones molares en la mezcla de $\text{Si}/\text{Al}=3,85$ y $\text{Na}/\text{Si}=0,25$. Para la producción de los concretos se utilizó un agregado grueso de tipo silíceo (tamaño máximo: 19 mm, densidad aparente: 2440 kg/m^3 , y absorción: 2,55%), y una arena de río como agregado fino (módulo de finura: 3,1, densidad aparente: 2510 kg/m^3 , y absorción: 1,72%). La proporción de agregados grueso y fino fue del 42% y 58% respectivamente (ver Tabla 2).

La relación (L/S) utilizada fue de 0,48. Cabe aclarar que L representa el contenido de agua presente en la mezcla, además de la aportada por el activante y S incluye la fase sólida representada por los precursores (CV+ESC) y el activante anhidro. Como material de referencia se utilizó un concreto basado en OPC, tal como se aprecia en la Tabla 2. Las muestras de Geo CV/ESC se curaron por 28 días a temperatura ambiente, con una humedad relativa mayor al 90% y las muestras de OPC se curaron bajo agua por igual tiempo. A edad de 28 días, y previo a la exposición en sulfatos, se evaluó la resistencia a compresión y el coeficiente de succión capilar para cada mezcla de concreto; este último se determinó con base en la Norma Suiza EMPA-SIA 162/1 (1989).

Tabla 2. Proporciones de componentes por m³ de concreto

Mezclas	Cemento (Kg)	CV (Kg)	ESC (Kg)	NaOH (Kg)	SS (Kg)	Arena (Kg)	Grava (Kg)	Relación L/S
Control (OPC)	400	-	-	-	-	972,72	704,39	0,48
GEO(CV/ESC)	0	320	80	28,55	158,37	972,72	704,39	0,48

Fuente: Los autores

La resistencia química al ataque por sulfatos se realizó con base en la norma ASTM C1012-13 (2012), exponiendo las muestras a soluciones de sulfato de sodio (Na_2SO_4) y sulfato de magnesio (MgSO_4) al 5%, a una temperatura de 25°C hasta por un periodo de 180 días; el pH de las soluciones a lo largo del estudio se mantuvo entre 6 y 8. Se utilizaron especímenes prismáticos (50,8 x 50,8 x 285 mm) para evaluar la expansión longitudinal y cubos de concreto (50,8 x 50,8 x 50,8 mm) para determinar la pérdida de resistencia a la compresión (ASTM C109, 2012). Las soluciones de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido acético (CH_3COOH) se prepararon a una concentración 1 M. Las muestras se sumergieron durante un período de 180 días en cada una de las soluciones; durante todo el estudio, se llevó a cabo un control de pH para evitar la neutralización del medio ambiente. En diferentes edades de la prueba, se registró la pérdida de peso, para lo cual la muestra previamente lavada se somete a un proceso de secado a 60 °C durante 24 horas, y se determinó la pérdida de resistencia a la compresión en cubos (50,8 x 50,8 x 50,8 mm). Complementariamente se realizó una inspección visual de las muestras.

Resultados y discusión

Propiedades físico-mecánicas

La Tabla 3 muestra los valores de resistencia a la compresión de los concretos a los 7 y 28 días de curado, previo a la inmersión en sulfatos y ácidos, en la que se puede observar que los Geo CV/ESC presentan una mayor resistencia a la compresión a los 7 días de curado hasta de un 59% en comparación con el concreto de control (OPC). Estos resultados son consistentes con los reportados en la literatura, donde los concretos activados a bases de CV y ESC presentan elevadas resistencias a edades tempranas de curado (Fernández-Jiménez y Palomo, 2009; Gao, Yu, y Brouwers, 2015; Kovalchuk, Fernández-Jiménez, y Palomo, 2007; Nath y Sarker, 2014; Ranjbar, Mehrli, Behnia, Alengaram, y Jumaat, 2014; Ryu, Lee, Koh, y Chung, 2013). A los 28 días de curado los concretos de Geo CV/ESC logran obtener resistencia de 43 MPa, la cual supera la reportada por el concreto de control en un 39%, este comportamiento coincide con lo expresado por otros investigadores (Fernández-Jiménez y Palomo, 2009; Gao *et al.*, 2015), quienes atribuyen este comportamiento a la coexistencia de los geles de activación alcalina N-A-S-H y C-A-S-H. En cuanto a las propiedades de absorción al agua, las muestras Geo CV/ESC presentan una reducción en la absorción capilar de 44%, en comparación al concreto de OPC, y la resistencia a la penetración de agua es a su vez superior en órdenes de hasta un 70%, este comportamiento está relacionado a la estructura más densa que presenta el sistema de activación alcalina y a una red de poros de mayor tortuosidad (Valencia, Mejía de Gutiérrez, y Gordillo, 2018).

Tabla 3. Propiedades físico-mecánicas de los concretos antes de ser expuestos a los ambientes agresivos

Resistencia a la Compresión (MPa)		
Días	Control OPC	Geo CV/ES
7	21,90	34,75
28	30,93	42,92
Propiedades físicas		
Coefficiente de Absorción capilar, k, (kg/m ² s ^{1/2})	0,0292	0,0162
Resistencia a la penetración de agua, m, (s/m ²)	1,899	3,242

Fuente: Los autores

Ataque por sulfatos

En la Figura 1 se presentan los resultados del ensayo de expansión realizado siguiendo la norma ASTM C1012 (2012) en las muestras de concreto de referencia (OPC) y de activación alcalina Geo CV/ESC, luego de su inmersión en una solución de Na_2SO_4 y MgSO_4 a una concentración de 50g/L y temperatura de 25°C. Los concretos inmersos en la solución de Na_2SO_4 presentan una mayor expansión en comparación con las muestras inmersas en MgSO_4 para las dos mezclas. A los 28 días de exposición en la solución de Na_2SO_4 se observa que la muestra de OPC presenta una expansión del 0,05%, la cual se mantiene estable hasta los 120 días, a diferencia de la muestra de Geo CV/ESC que revela una expansión de 0,005% (diez veces inferior) hasta los 120 días. A partir de esta edad las muestras de OPC presentaron un incremento significativo en el porcentaje de expansión (0,31 %) con respecto a las muestras de Geo CV/ESC (0,013%) tal como se observa hasta los 270 días de exposición a este medio. El mayor deterioro de los concretos a base de cemento portland se debe a la reacción del sulfato con el hidróxido de calcio y los monosulfoaluminatos de calcio para formar yeso y etringita, el cual conduce a la pérdida de resistencia, expansión, aparición de grietas, y desprendimiento de las capas superficiales en los concretos (Snelson y Kinuthia, 2010; Yang, Zhongzi, y Mingshu, 1996). Los concretos de activación alcalina, sin embargo, exhiben un mecanismo diferente, donde los principales productos de hidratación son menos susceptibles al ataque del Na_2SO_4 . (Sata, Sathonsaowaphak, y Chindaprasirt, 2012).

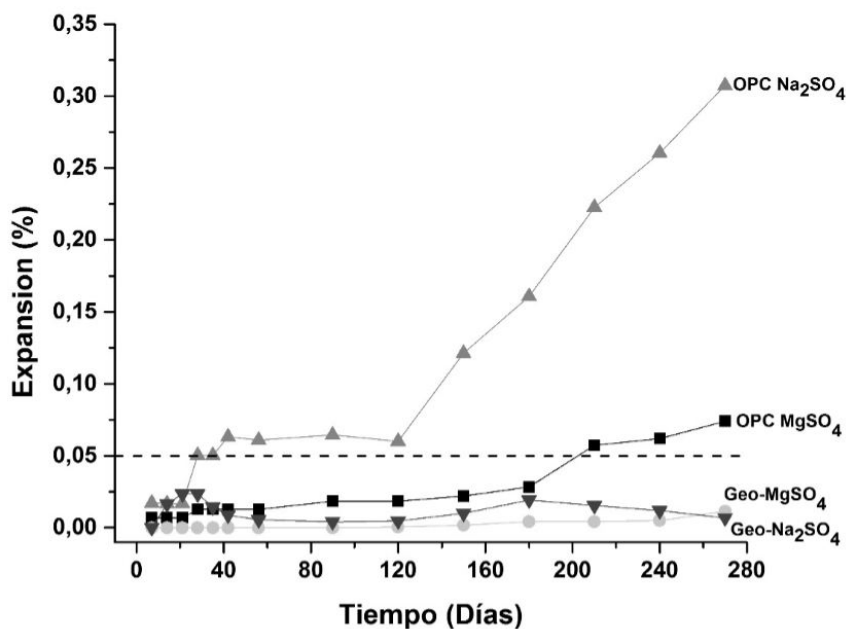


Figura 1. Gráfico de expansión vs Tiempo de concretos expuestos a Na_2SO_4 y MgSO_4

Fuente: Los autores

Las muestras de Geo CV/ESC inmersas en la solución de $MgSO_4$ no presentaron expansión a los 21 días de exposición, a diferencia de los concretos de control los cuales muestran una expansión de 0,007%. Los concretos Geo CV/ESC expuestos en Na_2SO_4 inician el proceso de expansión a tempranas edades, diferente a lo observado en $MgSO_4$, las cuales empiezan la expansión a los 120 días con un 0,0006% de expansión, a esta edad las muestras de OPC presentan valores de expansión de 0,0184%, triplicando la expansión de las muestras de activación alcalina. A los 270 días de exposición los concretos de Geo CV/ESC no presentan un incremento significativo en el porcentaje de expansión (0,0114%), caso contrario a lo ocurrido con los concretos a base de cemento portland (OPC) los cuales exhiben valores de expansión relativamente altos (0,074%) superando aproximadamente 6 veces los concretos de Geo CV/ESC. En general, tomando en consideración los límites de expansión recomendados para cemento portland y cemento adicionado con escorias luego de la exposición a sulfatos por un periodo de seis meses (ASTM C1012-13, 2012), se puede afirmar que el concreto de activación alcalina Geo CV/ESC clasifica como un material de alta resistencia a sulfatos, debido a que presenta una expansión inferior a 0,05% en los dos medios evaluados (normativa ACI 201, 2016).

La Figura 2 muestra el comportamiento de resistencia a la compresión de los concretos de activación alcalina (Geo CV/ESC) y de cemento portland a 60, 120 y 180 días de exposición en las soluciones de sulfato de magnesio y sulfato de sodio ($MgSO_4$ y Na_2SO_4). Entre los 60 y 120 días los concretos de Geo CV/ESC y OPC no presentan pérdidas de resistencia en ninguno de los dos medios de sulfatos; y en general logran mantener e incluso superar a la muestra curada en agua (OPC control, Geo CV/ESC control) en órdenes hasta del 12%; este comportamiento en las muestras de activación alcalina concuerda con lo obtenido por Bakharev (2005a) quien reportó incrementos resistentes de hasta un 4%, además este resultado es coherente con lo obtenido en el ensayo de expansión (Valor máximo de 0,05% para las muestras de OPC y de 0,005% para las muestras de Geo CV/ESC) hasta los 120 días de exposición. En el caso de OPC esto puede atribuirse a la formación de los compuestos expansivos que en las primeras etapas podrían densificar a la matriz, mientras que en el caso de Geo CV/ESC se atribuye a la participación de los sulfatos en el proceso de activación de especies no-activadas lo que conduce a nuevos compuestos de reacción. Después de los 180 días de exposición se observa que todas las muestras presentan pérdida en las resistencias, siendo mayor para las muestras de OPC, este comportamiento puede atribuirse a la presencia de portlandita (CH), la cual reacciona con los iones SO_4^{2-} para dar origen a la etringita, ocasionando agrietamiento en la estructura y un incremento en la porosidad (Mehta y Monteiro, 2006). Se observa que en la solución de Na_2SO_4 las muestras Geo CV/ESC presentan una pérdida en la resistencia a la compresión de apenas un 2,65%, valor poco significativo, lo cual concuerda con el reducido nivel de expansión (0,019%), este comportamiento coincide con lo encontrado por Ismail *et al.* (2012). Por otra parte la muestra de OPC expuesta a este medio presentó una pérdida de resistencia del 18,4%, lo cual era de esperarse debido a su elevado porcentaje de expansión. A los 180 días de exposición en la solución de $MgSO_4$ se observa igualmente una caída en la resistencia a la compresión pero esta vez en un mayor porcentaje, para las muestras de Geo CV/ESC se encontró una pérdida de 4,03%, lo cual se puede deber a la presencia de magnesio en el agente agresivo, el cual conduce a la descalcificación de las fases del gel rico en Ca presente en el sistema de activación alcalina, causando la degradación del sistema y la formación de yeso (Ismail *et al.*, 2012; Komljenović, Baščarević, Marjanović, y Nikolić, 2013; Chindaprasirt, Paisitsrisawat, y Rattanasak, 2014). Para los concretos de OPC se observó una caída en las resistencias más elevada, del orden de 31,87%, esto se atribuye a que hay una mayor descalcificación del C-S-H debido al potencial reemplazo del Ca^{2+} por Mg^{2+} para producir el silicato de magnesio hidratado.

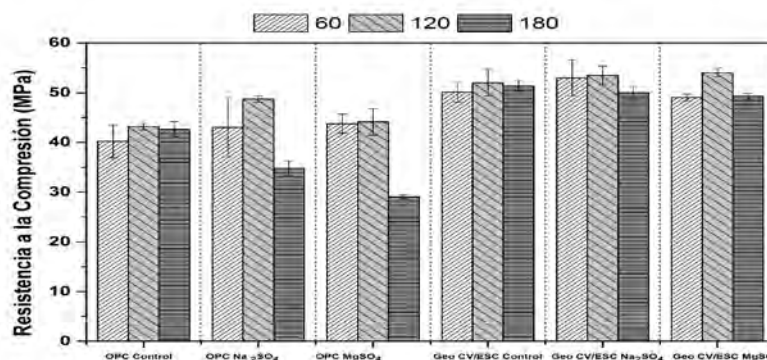


Figura 2. Resistencia a la compresión de concretos expuestos a Na_2SO_4 y $MgSO_4$
Fuente: Los autores

Ataque por ácidos

La exposición de los concretos a los diferentes medios ácidos generalmente conduce a un deterioro que es particularmente visible en la superficie expuesta. Se establece que los productos de reacción son hidrogeles de sílice, óxidos de aluminio y de hierro, y sales de ácido, que en el caso de ser solubles se retiran de la solución; la generación de un proceso de descalcificación se refleja en pérdidas en peso y de propiedades físico-mecánicas (Izquierdo, Rodríguez, y Mejía de Gutiérrez, 2015). Se identifican como factores que influyen en la velocidad de ataque: los relacionados con la solución (resistencia a los ácidos, la solubilidad de la sal de calcio, la concentración, pH, la difusividad del ácido y su sal), los relacionados con el material cementante (tipo y cantidades de cemento, la naturaleza de los agregados, la permeabilidad, el tiempo de curado, y las condiciones de servicio), y los que son externos tales como la temperatura (Allahverdi y Skvara, 2005). Los resultados de resistencia a compresión de las muestras expuestas a los ácidos se muestran en la Figura 3. De acuerdo con estos resultados, los valores de resistencia para todos los concretos estudiados siguió un patrón de pérdida de resistencia en los dos medios (ácido acético (CH_3COOH) y ácido sulfúrico (H_2SO_4)). En los Geo CV/ESC, sin embargo, la resistencia se redujo en aproximadamente entre un 40% y 50% hasta los 180 días de exposición en los dos medios (CH_3COOH y H_2SO_4), mientras que en los concretos de control (OPC) la resistencia se redujo hasta en un 82%.

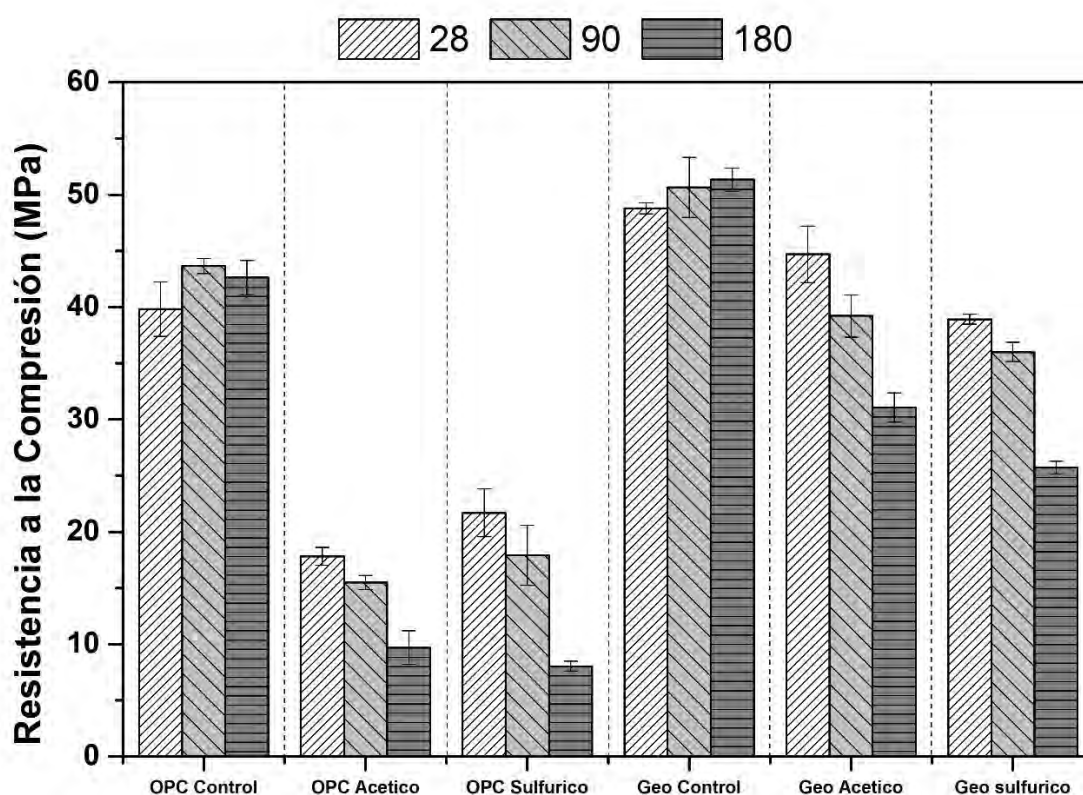


Figura 3. Resistencia a la compresión de concretos expuestos a Ácido acético y sulfúrico
Fuente: Los autores

Se destaca el buen comportamiento de los Geo CV/ESC inmersos en el ácido acético, con una menor pérdida de resistencia en comparación con las inmersas en ácido sulfúrico, caso contrario al que sucede con los concretos de OPC donde en los dos medios las muestras presentan un deterioro muy similar de las resistencias. Esta disminución en los valores de resistencia concuerda con la pérdida de la masa de los especímenes, los concretos sumergidos en la solución de CH_3COOH mostraron pérdidas de peso de alrededor del 5% después de 180 días de exposición para los Geo CV/ESC y una pérdida de hasta un 14% para los concretos de control. Sistemas inmersos en H_2SO_4 , sin embargo, mostraron una ganancia de peso entre los 7 y 90 días de exposición para las muestras de Geo CV/ESC, que se atribuye a la solubilidad reducida de la sal formada (sulfato de calcio hidratado o yeso), a los 180 días la pérdida resistente fue de 2,5% para las muestras de Geo CV/ESC y de 16% para las muestras de OPC. Cabe señalar que las muestras de Geo CV/ESC mostraron una menor pérdida de peso en la solución

de H_2SO_4 . La disminución de la masa de los concretos se atribuye a la solubilización de algunos productos de hidratación y el posterior aumento de la porosidad. Esto incluye el proceso de descalcificación y la solubilidad de los óxidos de alúmina y de hierro (Allahverdi y Skvara, 2006). Un examen visual de las probetas expuestas a las disoluciones ácidas muestra que los concretos Geo CV/ESC presentan buen aspecto físico hasta los 180 días de exposición en ambos medios (Figura 4). Sin embargo, los concretos de control (OPC) presentan un deterioro severo después de los 90 días de inmersión en CH_3COOH y a partir de los 7 días en H_2SO_4 , lo cual coincide con su elevada pérdida de resistencia mecánica y su alta pérdida de masa.

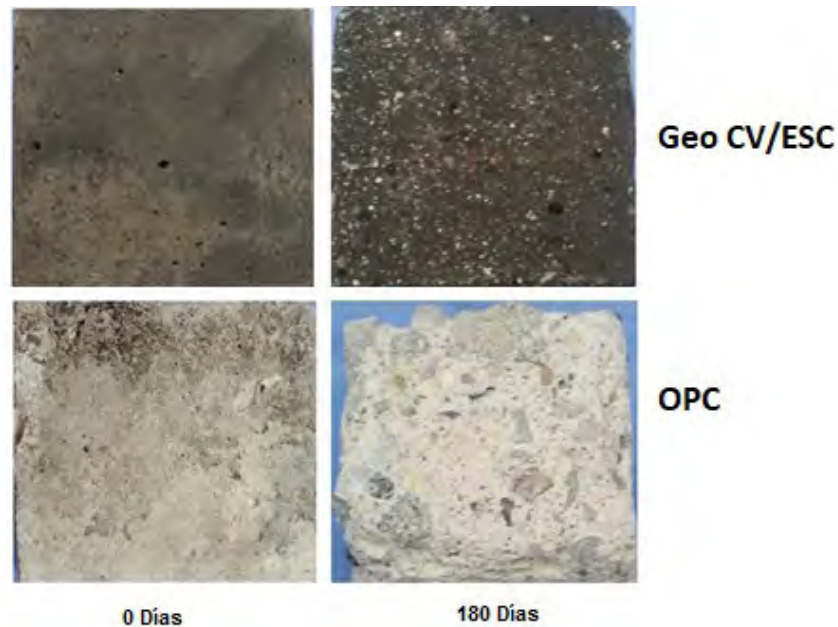


Figura 4. Concretos en ácido sulfúrico: Condición inicial y 180 días de exposición.
Fuente: Los autores

Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente estudio confirman que el concreto de activación alcalina evaluado (Geo CV/ESC 80/20) es menos susceptible al ataque de sulfatos y ácidos, comparado con el concreto de cemento portland tradicional, esto se puede relacionar a su mayor resistencia a la compresión, a su baja absorción capilar y su mayor resistencia a la penetración de agua, lo cual puede ocasionar una mayor resistencia al ataque de agentes agresivos.

En el ataque por sulfatos se destaca el mayor deterioro observado en las probetas expuestas a sulfato de magnesio, lo que indica su mayor agresividad. Este ataque trae como consecuencia la pérdida de propiedades mecánicas atribuible a la formación de nuevas fases cristalinas, particularmente yeso, en presencia de sulfato de magnesio. Esta pérdida de resistencia para Geo CV/ESC es del 4% a edad de 180 días de exposición a $MgSO_4$ comparado con el 32% reportado por el concreto OPC. Los porcentajes de expansión de los concretos Geo CV/ESC y OPC fueron de 0,005 y 0,062% respectivamente. Para los concretos expuestos en sulfato de sodio se observa para Geo CV/ESC una disminución de resistencia del 2% después de 180 días, mientras en OPC la reducción resistente es del 19%. El porcentaje de expansión reportado por Geo CV/ESC en Na_2SO_4 es despreciable (0,0012%) comparado con el de los especímenes de OPC (0,2604%).

En el ataque químico por ácidos, se encontró que los dos sistemas muestran un deterioro en sus propiedades, pero se resalta el mejor comportamiento de los Geo CV/ESC, los cuales presentaron la menor pérdida de resistencia y de masa en los dos medios de exposición ácidos (CH_3COOH y H_2SO_4), en comparación con el concreto de control.

Agradecimientos

Los autores, miembros del Grupo Materiales Compuestos agradecen a la Universidad del Valle (Cali, Colombia) y al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias) por el soporte financiero para la realización del presente trabajo investigativo, a través del proyecto “Construcción de prototipo a escala de vivienda rural utilizando materiales innovadores de baja huella de carbono”, Contrato No. 0696-2016.

Referencias

- Abora, K., Beleña, I., Bernal, S. A., Dunster, A., Nixon, P. A., Provis, J. L., ... Winnefeld, F. (2014). Durability and Testing – Chemical Matrix Degradation Processes. En J. L. Provis y J. S. J. van Deventer (Eds.), *Alkali Activated Materials* (177-221). Netherlands: Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2_8
- ACI 201.2R-16 (2016). *American Concrete Institute. Guide to Durable Concrete*. Reported by ACI Committee 201. American Concrete Institute: Michigan, Estados Unidos.
- Allahverdi, A., y Skvara, F. (2005). Sulfuric acid attack on hardened paste of geopolymer cements-Part 1. Mechanism of corrosion at relatively high concentrations. *Ceramics Silikaty*, 49(4), 225.
- Allahverdi, A., y Skvara, F. (2006). Sulfuric acid attack on hardened paste of geopolymer cements-part 2. Corrosion mechanism at mild and relatively low concentrations. *Ceramics Silikaty*, 50(1), 1.
- ASTM C618-12 (2012). *American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. American Society for Testing and Materials: Philadelphia, Estados Unidos.
- ASTM C1012 / C1012M (2012). *American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Length Change of Hydraulic Cement Mortars Exposed to a sulfate Solution*. American Society for Testing and Materials: Philadelphia, Estados Unidos.
- ASTM C109 / C109M (2012). *American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or 50-mm Cube Sécomens)*. American Society for Testing and Materials: Philadelphia, Estados Unidos.
- Aye, T., y Oguchi, C. T. (2011). Resistance of plain and blended cement mortars exposed to severe sulfate attacks. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2988-2996. doi: https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2_8
- Bakharev, T. (2005a). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1233-1246. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.002>
- Bakharev, T. (2005b). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 658-670. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.005>
- Chindaprasirt, P., Paisitsrisawat, P., y Rattanasak, U. (2014). Strength and resistance to sulfate and sulfuric acid of ground fluidized bed combustion fly ash-silica fume alkali-activated composite. *Advanced Powder Technology*, 25(3), 1087-1093. doi: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2014.02.007>
- Crammond, N. J. (2003). The thaumasite form of sulfate attack in the UK. *Cement and Concrete Composites*, 25(8), 809-818. doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00106-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00106-9)
- Davidovits, J. (2005). *Geopolymer, Green Chemistry and Sustainable Development Solutions: Proceedings of the World Congress Geopolymer 2005*. Geopolymer Institute.

- EMPA -SIA 162/1 (1989). *Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technologies. Test No. 5 –Water Conductivity*. Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technologies: Zurich, Suiza
- Fernández-Jiménez, A., y Palomo, Á. (2009). Propiedades y aplicaciones de los cementos alcalinos. *Revista Ingeniería de Construcción*, 24(3), 213-232. doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-50732009000300001>
- Gao, X., Yu, Q. L., y Brouwers, H. J. H. (2015). Reaction kinetics, gel character and strength of ambient temperature cured alkali activated slag-fly ash blends. *Construction and Building Materials*, 80, 105-115. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.065>
- Irassar, E. F., Bonavetti, V. L., Trezza, M. A., y González, M. A. (2005). Thaumasite formation in limestone filler cements exposed to sodium sulphate solution at 20 °C. *Cement and Concrete Composites*, 27(1), 77-84. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2003.10.003>
- Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., Hamdan, S., y van Deventer, J. S. J. (2012). Microstructural changes in alkali activated fly ash/slag geopolymers with sulfate exposure. *Materials and Structures*, 46(3), 361-373. doi: <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9906-2>
- Izquierdo, S., Rodríguez, E. D., y Mejía de Gutiérrez, R. (2015). Resistance to acid corrosion of blended cements mortars with spent fluid catalytic cracking (sFCC) catalyst. *Revista Ingeniería de Construcción*, 30(3), 169–176. doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-50732015000300002>
- Komljenović, M., Baščarević, Z., Marjanović, N., y Nikolić, V. (2013). External sulfate attack on alkali-activated slag. *Construction and Building Materials*, 49, 31-39. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.013>
- Kovalchuk, G., Fernández-Jiménez, A., y Palomo, A. (2007). Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development – Part II. *Fuel*, 86(3), 315-322. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.07.010>
- Mehta, P. K., y Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete Microestructure, Properties, and Material* (Third Edit, p. 647). The McGraw Hill Companies.
- Nath, P., y Sarker, P. K. (2014). Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building Materials*, 66, 163-171. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080>
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., y Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323-1329. doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9)
- Puertas, F., Gutiérrez, R., Fernández-Jiménez, A., Delvasto, S., y Maldonado, J. (2002). Morteros de cementos alcalinos. Resistencia química al ataque por sulfatos y al agua de mar. *Materiales de Construcción*, 52(267), 55-71. doi: <https://doi.org/10.3989/mc.2002.v52.i267.326>
- Ranjbar, N., Mehrali, M., Behnia, A., Alengaram, U. J., y Jumaat, M. Z. (2014). Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar. *Materials & Design*, 59, 532-539. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.037>
- Ryu, G. S., Lee, Y. B., Koh, K. T., y Chung, Y. S. (2013). The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials*, 47, 409-418. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.069>
- Sata, V., Sathonsaowaphak, A., y Chindaprasirt, P. (2012). Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack. *Cement and Concrete Composites*, 34(5), 700-708. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.010>

- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., y Bhattacharyya, S. K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials*, 85, 78-90. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>
- Škvára, F., Jílek, T., y Kopecký, L. (2005). Geopolymer materials based on fly ash. *Ceram.-Silik*, 49(3), 195–204.
- Snelson, D. G., y Kinuthia, J. M. (2010). Resistance of mortar containing unprocessed pulverised fuel ash (PFA) to sulphate attack. *Cement and Concrete Composites*, 32(7), 523-531. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.03.001>
- Song, X. J., Marosszeky, M., Brungs, M., y Munn, R. (2005). Durability of fly ash based geopolymer concrete against sulphuric acid attack. *International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Lyon, France (123–129). Recuperado de <http://www.irbnet.de/daten/iconda/06059017363.pdf>
- Thokchom, S., Ghosh, P., y Ghosh, S. (2009). Resistance of fly ash based geopolymer mortars in sulfuric acid. *arPN Journal of engineering and applied Sciences*, 4(1), 65-70. Recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.470.8765&rep=rep1&type=pdf>
- Valencia, W., Mejía de Gutiérrez, R., y Gordillo, M., (2018). Geopolymeric concretes based on fly ash with high unburned content. *Construction and Building Materials*, 165, 697–706. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.071>
- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., y Lorenzen, L. (1997). The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theory and applications. *Minerals Engineering*, 10(7), 659-669. doi: [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(97\)00046-0](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(97)00046-0)
- Wallah, S. E., y Rangan, B. V. (2006). *Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties*. Res. Report-GC2, Curtin University, Australia. pp, 76–80.
- Yang, S., Zhongzi, X., y Mingshu, T. (1996). The process of sulfate attack on cement mortars. *Advanced Cement Based Materials*, 4(1), 1-5. doi: [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(96\)90057-7](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(96)90057-7)



Elaboración de un nuevo tipo de guías quirúrgicas para implantes dentales mediante impresión 3D

Elaboration of a new type of surgical guidelines for dental implants through 3D printing

Jefferson Henao¹
Jhoan Sebastián Ramos²
Carlos H. Valencia^{3*}
Ivonne Adams⁴
Carlos Alberto Rico⁵
Juan Manuel Escandón⁶
Daniela Echeverri-Cárdenas⁷

¹Colombiano. Tecnólogo en Mecánica Dental. Universidad Santiago de Cali, Cali, Colombia. E-mail: jeffersonhenao0411@gmail.com

²Colombiano. Tecnólogo en Mecánica Dental. Universidad Santiago de Cali, Cali, Colombia. E-mail: sebas.ramos_14@hotmail.com

³Colombiano. PhD. en Ciencias Biomédicas. Universidad Santiago de Cali, Cali, Colombia, Grupo de Investigación BEO. Autor de correspondencia: carlos.valencia12@usc.edu.co

⁴Colombiana. MsC. en Derecho Médico. Universidad Santiago de Cali, Cali, Colombia. E-mail: ivonneadams@usc.edu.co

⁵Colombiano. Licenciado en Educación, Especialista en Educación Ambiental. Universidad Santiago de Cali, Cali, Colombia. E-mail: carlosalbertoricoc@yahoo.com

⁶Colombiano. MsC. en Ciencia y Tecnología de Polímeros. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Cali Colombia. E-mail: jmescaandon@misena.edu.co

⁷Colombiana. Ingeniera de Diseño de Producto. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Cali Colombia. E-mail: danaeca@gmail.com

Recibido: 25- 09 - 2017 Aceptado: 10-05-2018

Resumen

Las guías quirúrgicas son dispositivos biomédicos indispensables para la inserción adecuada de los implantes dentales; actualmente se dispone de 2 tipos de guías: las “restrictivas” y las “no restrictivas”, siendo las primeras las que brindan un mayor grado de estabilidad y exactitud, pero a un costo muy elevado. En este trabajo se propone la elaboración de un nuevo tipo de guía que combina una determinación protésica y la incorporación de información tomográfica con técnicas de impresión 3D para obtener un dispositivo con buen ajuste y adecuada exactitud, pero a un menor precio. El producto obtenido fue elaborado en ácido poliláctico y mostró unas buenas propiedades de adaptación, rigidez y estabilidad lo que puede garantizar un buen desempeño clínico. Si bien las guías convencionales son muy económicas presentan problemas de estabilidad que comprometen la seguridad del procedimiento quirúrgico y por lo tanto la salud del paciente; con la técnica propuesta se puede obtener una guía quirúrgica precisa, estable y a un precio razonable conservando los principios de la predeterminación protésica y asegurando que los procedimientos quirúrgicos sean adecuados y seguros. La elaboración del dispositivo mediante impresión 3D a partir de una predominación protésica es técnicamente viable, sin mayores complejidades técnicas y podría ser una alternativa real a las guías restrictivas las cuales aún son demasiado complejas y costosas.

Palabras clave: Prototipeado; ácido poliláctico; biodispositivo; odontología; implantología.

Cómo citar: Henao, J., Ramos, J. S., Valencia, C. H., Adams, I., Rico, C. A., Escandón, J. M., Echeverri-Cárdenas, D. (2018). Elaboración de un nuevo tipo de guías quirúrgicas para implantes dentales mediante impresión 3D. *Informador Técnico*, 82(1), 78-89. doi: <http://doi.org/10.23850/22565035.1005>

Abstract

Surgical guides are essential biomedical devices for the proper insertion of dental implants; there are two types of guides, a "restrictive" and "non-restrictive" these are currently available in the dental field, the first one provides a great degree of stability and accuracy, but at a very high cost. This paper proposes the development of a new type of guide that combines a prosthetic determination and the incorporation of tomographic information with 3D printing techniques to obtain a device with good fit and adequate accuracy but at a lower price. The product obtained was elaborated in polylactic acid and showed good adapting properties, rigidity and stability which would guarantee a good clinical performance. Even though conventional guides are very economical, they present a lot of stability problems that compromises the security of the surgical procedure and therefore patient's health; with the proposed technique an accurate, stable and reasonably price surgical guide can be obtained keeping the principles of prosthetic predetermination and ensuring that surgical procedures are adequate and safe. The manufacturing of devices through 3D printing from a from predominance of the prosthesis is technically viable, without major technical complexities and could be a real alternative to restrictive guides which are still too complex and expensive.

Keywords: Prototipeado; polylactic acid; biodispositive; dentistry; implantology.

Introducción

La rehabilitación protésica dental implanto soportada es un procedimiento cada vez más solicitado por los pacientes debido a sus altas tasas de éxito (Gómez de la Mata Galiana, Lora-Vázquez, Gómez de la Mata Galiana y Gutiérrez-Pérez 2006), se calcula que solo en los Estados Unidos de América se colocan alrededor de 5 millones de implantes al año (Boyce y Klemons, 2015).

Una guía diagnóstica y/o quirúrgica es un dispositivo biomédico que permite la preparación de los alveolos quirúrgicos y la inserción controlada de los implantes dentales respetando las estructuras anatómicas y garantizando que la futura rehabilitación sea adecuada.

El éxito de la inserción y de la posterior rehabilitación de los implantes depende principalmente de una correcta planificación, la cual se realiza a partir de una predeterminación (Argüello, 2013); en pacientes parcialmente edéntulos, la predeterminación se basa en un encerado diagnóstico y en pacientes totalmente edéntulos en un enfilado o una réplica de la prótesis que está usando, si esta cumple con criterios funcionales y estéticos adecuados (Oh y Saglik, 2008).

Una vez elaborada la predeterminación, en el caso del enfilado se realizan algunas pruebas clínicas para evaluar la línea de sonrisa, el soporte labial, la expresión facial y la altura intermaxilar; si se determina clínicamente que la predeterminación cumple con las expectativas se procede a elaborar la guía de diagnóstico cuyo fin será determinar la relación entre la base ósea y los perfiles de tejido blando y duro en relación con implantes, posteriormente se adaptará para servir como guía quirúrgica en la orientación y posicionamiento de los implantes dentales (Biotti y García, 2014).

La guía es esencial para contrastar la información obtenida mediante un estudio tomográfico con una predeterminación protésica elaborada con base en unos hallazgos clínicos y a la proyección de los parámetros de la rehabilitación, permitiendo tanto la planificación quirúrgica como la protésica (Matta, Bergauer, Adler, Wichmann, y Nickenig, 2017), en lo quirúrgico la principal función de la guía es permitir el correcto posicionamiento tridimensional del implante en la estructura ósea (Volpato, Vasconcellos, Garbelotto, Manfro, y Özcan, 2013).

En general, las guías de diagnóstico y quirúrgico deben poseer unas propiedades de rigidez, estabilidad y precisión para garantizar la exactitud y seguridad durante los procedimientos de inserción de los implantes (De Kok, Thalji, Bryington, y Cooper, 2014); idealmente les corresponde tener incorporados marcadores radiopacos, ser retentivas y estables intraoralmente, confortables, esterilizables y compatibles con la técnica tomográfica (De Kok, *et al.*, 2014).

La estabilidad de la guía en pacientes parcialmente edéntulos se consigue incorporando los dientes remanentes vecinos, por ejemplo Shotwell, Billy, Wang, y Oh (2005), proponen una guía sencilla elaborada con resina foto polimerizable que utiliza como soporte los dientes vecinos a la zona edéntula; pero en pacientes totalmente edéntulos la estabilidad se torna crítica por problemas de movilidad, para garantizar el correcto posicionamiento y estabilidad durante los procedimientos quirúrgicos es posible utilizar como soportes implantes dentales que hayan sido colocados previamente (Zandinejad, Abdel-Azim, Lin, y Morton, 2013) o minitornillos quirúrgicos o de osteosíntesis para fijar lateralmente el dispositivo (Cassetta, Mambro, Giansanti, Stefanelli, y How, 2014).

Tipos de guía

Las guías quirúrgicas pueden clasificarse de acuerdo con la limitación o restricción que ofrezcan durante el momento de la preparación quirúrgica o de acuerdo con la técnica de fabricación.

De acuerdo con la restricción pueden ser no restrictivas, semirrestrictiva o restrictivas. La no restrictiva le indica al cirujano la posición de los implantes en relación con la prótesis, impide mayor control sobre dirección o profundidad de fresado lo que puede ocasionar errores de angulación, falta de paralelismo o compromiso de estructuras anatómicas. El tipo semirrestrictiva incorpora un tubo guía que corresponde a la fresa inicial de la preparación pero el cirujano deberá continuar a mano alzada con el protocolo quirúrgico lo que también puede ocasionar complicaciones, mientras que la restrictiva limita las posiciones vestibular o lingual y posee topes de profundidad lo que lleva a que las preparaciones serán exactas y de acuerdo con la planificación (Stumpel, 2008).

Las guías restrictivas y semirrestrictivas pueden obtenerse a partir del duplicado de encerados o enfilados diagnósticos, pero también es posible utilizar prótesis preexistentes, si presentan similitud con la proyección protésica propuesta, en cualquier caso se les debe incorporar marcadores radiopacos (De Kok *et al.*, 2014).

Dependiendo de la técnica de fabricación la guía podrá ser de dos tipos: Guía clásica o de laboratorio y guía diseñada por computador o CAD-CAM.

Guía clásica o de laboratorio

Este es el tipo de guía más común, originalmente se diseñó para permitir establecer la relación entre la predeterminación y el reborde óseo sin ser muy precisa, pero ha sufrido múltiples modificaciones como la incorporación de tubos guías en los sitios de las perforaciones en un diámetro que corresponda a la primera fresa, siendo considerada como una guía semirrestrictiva o semiestricta (Melej, Ibañez, y Ilic, 2011).

En las guías se pueden realizar algunas modificaciones como la eliminación de la porción vestibular o lingual / palatino de la zona de la preparación (guías de rielera) para mejorar la visibilidad, garantizar el paralelismo y disminuir la temperatura intraósea durante la preparación al disminuir la fricción y mejorar la irrigación (Akça, Iplikçioğlu, y Çehreli, 2002); o la incorporación de pines de paralelismo para orientar el posicionamiento de la fresa durante el procedimiento quirúrgico (Patras, Martin, y Sykaras, 2012).

Estos dispositivos normalmente se elaboran a partir de una lámina de acetato termoplástico aplicada al vacío sobre un duplicado en yeso de la predeterminación protésica y reforzada con polimetil metacrilato (PMMA) transparente, pero existen materiales alternativos como la resina fotopolimerizable tipo Triad ®, (Shotwell *et al.*, 2005).

Para visualizar radiográficamente la proyección de los dientes en relación con el reborde óseo, a la guía, se le incorporan unos marcadores radiopacos en los sitios donde irían los implantes; los más frecuentemente utilizados son balines y tubos metálicos, gutapercha y sulfato de bario (Scherer y Roh, 2015); adicionalmente Zahran y Fenton (2010) propusieron utilizar como marcador una silicona radiopaca (Vinil polixilosano) con el fin de identificar los contornos de la rehabilitación y su relación con el reborde óseo.

De los materiales radiopacos utilizados, los balines metálicos son los menos recomendados ya que solo actúan como un marcador de posición dificultando determinar la trayectoria del futuro implante, mientras que los tubos y la gutapercha cumplen con su función de servir de guía y permitir determinar trayectorias (Almog, Torrado, Moss, Meitner, y LaMar, 2002).

Las principales ventajas de este tipo de guía son su bajo costo y facilidad de elaboración pero presenta como desventaja la incapacidad para garantizar una buena estabilidad y precisión (Madriz y Martín, 2009) además, la relación entre las estructuras anatómicas y la misma guía no es muy exacta (Orentlicher, Goldsmith, y Abboud, 2012).

Guía diseñada por computador (CAD-CAM)

El desarrollo de programas para manejar la información tomográfica permitió el surgimiento del concepto “Cirugía implantológica guiada por computador”, lo cual consiste en la realización precisa de un plan de tratamiento a partir de una tomografía axial computarizada y una predeterminación protésica, puesto que proporciona un conocimiento exacto de la anatomía de la zona y la posibilidad de diseñar la posición de los implantes, además mediante la fabricación de dispositivos de guía personalizados, la transferencia de esta información al paciente permite protocolos mínimamente invasivos y rehabilitaciones precisas (Carlevaris y Armijo, 2013).

Al igual que en los otros tipos de guías se parte de una predeterminación protésica que es escaneada y complementada con la información tomográfica para elaborar un dispositivo que es anclado al hueso maxilar para permitir la inserción de los implantes y la instalación de la rehabilitación, el cual es elaborado mediante técnicas de prototipeado rápido (Marchack, Charles, y Pettersson, 2011).

Mediante la utilización de un software la información capturada por el escáner se procesa para determinar las posiciones y dimensiones del implante en relación con los niveles óseos de anchura y altura, esto va a permitir elaborar una guía que va a transferir al paciente en forma muy precisa la posición de los implantes (Turbush y Turkyilmaz, 2012) y proyectar en el mismo momento la rehabilitación protésica planeada, de esta forma la técnica concede una visualización de las tres estructuras que son relevantes en la planeación (el hueso con los detalles anatómicos, los implantes proyectados y la prótesis propuesta), (Sanna, Molly, y van Steenberghe, 2007).

La combinación de las imágenes volumétricas del hueso con la información obtenida mediante el escaneo de la predeterminación protésica, permite realizar guías quirúrgicas prototipeadas mediante mecanizado CNC o impresión 3D que incorporan imágenes de implantes posicionados virtualmente en forma muy realista (Ganz, 2015), con las formas y dimensiones de numerosas marcas comerciales lo que lleva a procedimientos quirúrgicos y rehabilitadores muy seguros, debido a que se da una verdadera integración entre la información tomográfica, el plan quirúrgico y el plan protésico (Greenberg, 2015).

A pesar de su alto costo y de requerir un proceso de planificación detallado y preciso, las guías CAD- CAM son consideradas el Gold estándar debido a que son restrictivas, es decir, solo permiten el paso de fresas con un diámetro y longitud exactos, lo cual garantiza la seguridad del procedimiento, igualmente facilitan los procedimientos quirúrgicos, disminuyen el tiempo intraquirúrgico, son estables y permiten procedimientos menos invasivos (Molina *et al.*, 2013; Narayanan, Vernekar, Kuyinu, y Laurencin, 2016).

Técnicas de prototipeado rápido en biomédica

Las técnicas de prototipeado rápido (PR) fueron un aporte de las Ingenierías a las ciencias de la salud, el prototipeado biomédico surgió a fines de la década de 1980, inicialmente con fines didácticos (Nogueira, Alencar, Roque-Torres, y Groppo, 2015) pero pronto fue utilizado en la planificación y realización de procedimientos quirúrgicos.

El prototipeado rápido incluye diferentes técnicas como la litografía estereoscópica (SLA), la sinterización selectiva por láser (SLS), el modelado por deposición fundida (FDM), fabricación de objetos laminados (LOM) y los sistemas basados en

inyección de tinta e impresión tridimensional (3DP), entre otros, que se pueden clasificar como técnicas aditivas, sustractivas y aditivas / sustractivas (Banoriya, Purohit, y Dwivedi, 2015).

La impresión 3D es una técnica aditiva, fue desarrollada por Hideo Kodama del Nagoya Municipal Industrial Research Institute en 1981, presenta la ventaja de permitir construir formas complejas, incluyendo estructuras huecas y actualmente permite el empleo de diversos materiales metálicos o poliméricos (Kaye, Goldstein, Zeltsman, Grande, y Smith, 2016).

La técnica de impresión se basa en la obtención de un modelo virtual mediante el escaneo de un objeto o por modelado 3D, para posteriormente materializar el objeto mediante la adición de un material capa a capa; en el área biomédica se utilizan principalmente 3 sistemas de sinterización selectiva por láser (SLS), el modelado de deposición por fusión y la impresión por chorro de tinta (Martelli *et al.*, 2016).

El SLS utiliza un láser para fusionar selectivamente las partículas de material durante la construcción del objeto; el modelado de deposición fundida, se basa en el mismo principio que la impresión bidimensional clásica y construye el objeto depositando capas de pequeñas perlas de material; mientras que la impresión por inyección de tinta utiliza un cabezal de impresión que deposita tinta térmica u otro material para formar el objeto (Martelli *et al.*, 2016).

Los principales materiales utilizados actualmente para la impresión 3D son polímeros termoplásticos como el acrilonitrilo buta - dieno estireno (ABS), el ácido poliláctico (PLA), la poliamida (PA), el policarbonato (PC), así como materiales poliméricos termoendurecibles como las resinas epoxicas (Wang, Jiang, Zhou, Gou, y Hui, 2017).

Técnica propuesta

En este artículo se presenta un nuevo método para elaborar guías quirúrgicas de bajo costo incorporando una predeterminación protésica y tecnología 3D para convertir la guía de diagnóstico en una guía quirúrgica rígida y precisa, utilizando como material termoplástico ácido poliláctico (PLA).

Este trabajo se realizó en dos fases: la de diseño y la de prototipeado.

Descripción clínica del paciente

Se trata de un paciente totalmente edéntulo portador de una prótesis total, al cual se le realizó la evaluación preprotésica:

- Evaluación de los principios de soporte labial
- Análisis de la línea de sonrisa
- Medición de dimensión vertical
- Estudio de los perfiles faciales y estética

Una vez realizado el examen se determinó que era viable utilizar la prótesis como predeterminación protésica, lo cual es un procedimiento usual (De Kok *et al.*, 2014).

Elaboración de la guía de diagnóstico

Se duplicó la predeterminación protésica (encerado o enfilado), en este caso a la prótesis del paciente se le tomó una impresión en alginato y se procedió a elaborar un duplicado mediante el vaciado en polimetilmetacrilato (PMMA) de auto curado, para obtener un modelo acrílico (Figura 1).



Figura 1. Proceso de duplicado de la prótesis. A: Duplicado; B: Vaciado con polimetilmetacrilato (PMMA); C: Obtención del duplicado de la prótesis.

Fuente: Los autores

Se realizaron perforaciones en el modelo acrílico, en las zonas correspondientes a los dientes donde se propuso colocar los implantes; en este punto hay que tener en cuenta que normalmente el número de implantes dependerá del tipo de rehabilitación planeada, para una rehabilitación fija se recomiendan de 6 a 8 y para una removible (sobre dentadura) 3 o 4 implantes, preferiblemente ferulizados, en este caso se seleccionaron varios sitios (Figura 2).

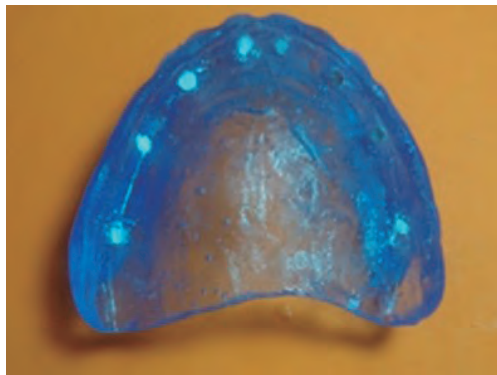


Figura 2. Guía diagnóstica en PMMA con los marcadores radiopacos en las zonas propuestas para colocar los implantes.

Fuente: Los autores

Verificación clínica de la guía y solicitud de examen tomográfico

Se verificó en el paciente la estabilidad relativa del dispositivo; no fue necesario pero sí es relevante se puede realizar una readaptación *in situ* con PMMA o con una silicona para rebases, y se solicita la realización del examen tomográfico con la guía en posición, (Figura 3).



Figura 3. Examen tomográfico. A: Guía en PMMA colocada en el paciente.

Fuente: Los autores

Revisión de la información tomográfica y reposicionamiento de la posición de los implantes

Si la evidencia tomográfica indica el reposicionamiento de las zonas donde van a estar los implantes se determinan las nuevas posiciones en la tomografía y se trasladan a la guía realizando nuevas perforaciones.

Elaboración de la guía quirúrgica 3D

Una vez determinadas las posiciones definitivas de los implantes se procede a escanear la guía en PMMA para obtener un duplicado en ácido poliláctico (PLA) mediante impresión 3D.

La guía se cubrió con una pintura blanca radiopaca, ya que genera mayor contraste con la base y resalta detalles de la pieza, logrando que el escáner 3D capturara con mayor precisión las formas y texturas del producto. Posteriormente se ubicó sobre una base negra con puntos reflectivos que funcionan como targets de posición para el escaneo, los cuales al mismo tiempo se ubicaron en la guía en puntos estratégicos (Figura 4).

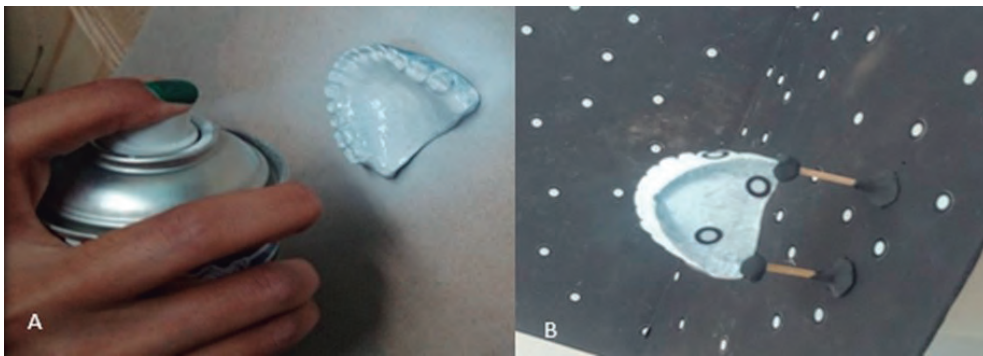


Figura 4. Determinación de los targets de posición.
Fuente: Los autores

Se procedió a escanear el dispositivo utilizando un Handy Scan 3D para obtener la representación digital de la guía a la resolución más alta (0,2 mm) (Figura 5).

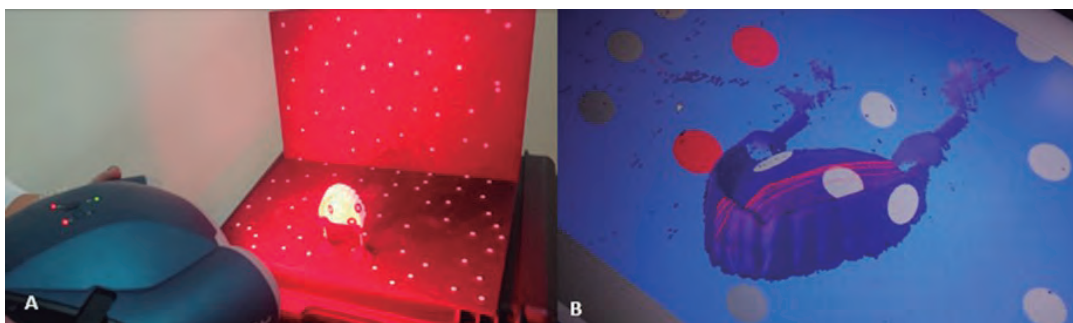


Figura 5. Proceso de escaneo de la guía de diagnóstico.
Fuente: Los autores

Una vez obtenida la representación digital en forma de malla poligonal se procedió a realizar un refinamiento de malla utilizando el software Rapidform XOR3 llegando a una generación de la superficie preliminar, la cual posteriormente se pulió en el software SolidWorks 2013, donde se obtuvo el sólido definitivo de la guía.

Para finalizar el proceso de prototipeado se exportaron el modelo 3D de la guía y por último se generó el código G para imprimirla en PLA con la impresora 3D Prusa Tairona a una resolución de 0,1mm, (Figura 6).

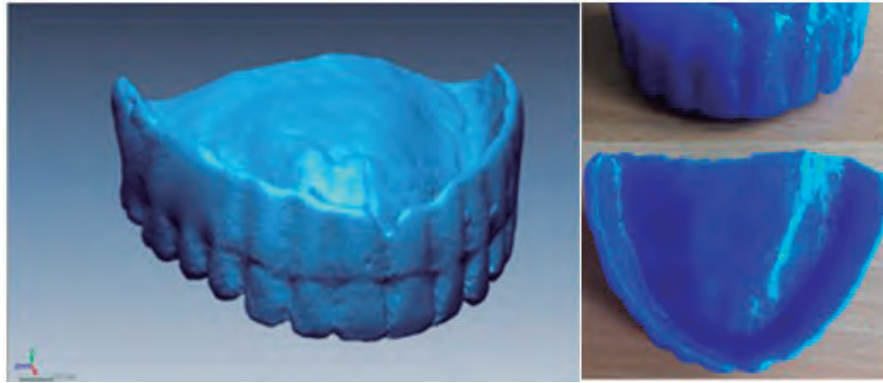


Figura 6. Refinamiento de superficies y obtención de la impresión tridimensional.
Fuente: Los autores

Finalmente, al producto terminado se le realizaron las perforaciones en las zonas donde irían los implantes, se le adaptaron tubos guías en acero grado médico para convertirla en semirrestrictiva y se adaptaron las guías laterales para garantizar la estabilidad durante los procedimientos quirúrgicos, (Figura 7).



Figura 7. Guía impresa con 2 tubos guía en posición y 2 marcadores laterales para tornillos de osteosíntesis.
Fuente: Los autores

Discusión

La guía para implantes tipo férula termoplástica es de las más utilizada debido a su bajo costo y facilidad de fabricación, sin embargo presenta problemas como falta de rigidez lo que influye en la adaptación y dependiendo del medio de contraste utilizado puede ser difícil establecer una buena relación entre la predeterminación protésica y el reborde óseo, algunos autores como Zahran y Fenton (2010) han propuesto cambiar el medio de contraste por una silicona radiopaca, sin embargo en este trabajo la utilización de gutapercha en barras con una buena condensación permitió tener una buena visión del eje de inserción de los futuros implantes como se puede apreciar en la figura 3 B.

En una revisión realizada por Boyce y Klemons (2015), entre las principales complicaciones relacionadas con guías quirúrgicas están: fractura de la guía, falta de estabilidad, aumento de la temperatura durante la preparación intraósea y disminución de la visibilidad.

Misir, Sumer, Yenisey y Ergioglu (2009) compararon la generación de calor durante las preparaciones quirúrgicas con y sin guía quirúrgica encontrando diferencias significativas, sin embargo es aceptado que el uso de una guía disminuirá los riesgos inherentes al procedimiento (Aljadi, Thompson, Izumi, y Ziebert, 2011) proponen un diseño de guía semirrestrictiva que combina el de rielera con la incorporación de tubos guías, lo que permitiría la preparación inicial en forma precisa (usando los tubos) y la disminución del calor por fricción en la etapa final de la preparación al utilizar una rielera lingual.

La falta de la estabilidad de la guía es considerado uno de los factores de riesgo más importantes influyendo directamente en la concordancia o no entre la posición de los implantes y la rehabilitación, en un intento por controlar este factor se ha llegado a proponer el uso de minimplantes para soportar la guía en rebordes mucosos o poco estables (Simon, 2002), o de topes oclusales para verificar la posición correcta de la guía durante las preparaciones (Briccoli, Barone, y Clauser, 2012).

Si se logra garantizar la estabilidad de la guía convencional, el procedimiento puede ser tan seguro como un sistema guiado por computador (Barnea, Alt, Kolerman, y Nissan, 2010), pero aun estas deberán ser fijadas al reborde óseo mediante tornillos de osteosíntesis para garantizar su exactitud (Verhamme, Meijer, Bergé, y Maal, 2015).

En un estudio realizado por Matta *et al.* (2017) encuentran que tanto la guía termoplástica (clásica) como la CAD-CAM son aptas para trasladar la información de la planeación al medio clínico, sin embargo, hay que tener en cuenta que este estudio fue realizado en pacientes parcialmente edéntulos y por lo tanto las guías fueron dentosoportadas; como ya se mencionó en pacientes sin dientes los tejidos blandos intraorales, de naturaleza móvil, no son garantía de la estabilidad de la prótesis y esta debe ser reforzada con algunos de los métodos ya mencionados

En el tipo de dispositivo propuesto en este trabajo se logró garantizar la exactitud de la guía a partir de una predeterminación que fue primero adaptada clínicamente y posteriormente duplicada en un material estable y resistente, por otra parte se incorporaron tubos guías para mejorar la precisión y se incluyeron anclajes intraóseos laterales con tornillos de osteosíntesis para garantizar un ajuste perfecto entre la guía y el reborde óseo.

Conclusión

Si bien las guías convencionales son muy económicas presentan problemas de estabilidad que comprometen la seguridad del procedimiento quirúrgico y por lo tanto la salud del paciente; con la técnica propuesta se puede obtener una guía quirúrgica precisa, estable y a un precio razonable conservando los principios de la predeterminación protésica y asegurando que los procedimientos quirúrgicos sean adecuados y seguros.

La elaboración del dispositivo mediante impresión 3D a partir de una predominación protésica es técnicamente viable, sin mayores complejidades técnicas y podría ser una alternativa real a las guías restrictivas las cuales aun son demasiado complejas y costosas.

Referencias

- Akça, K., Iplikçioğlu, H., y Çehreli, M. C. (2002). A surgical guide for accurate mesiodistal paralleling of implants in the posterior edentulous mandible. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 87(2), 233–235. doi: <https://doi.org/10.1067/mpr.2002.120900>
- Aljadi, M., Thompson, G. A., Izumi, M., y Ziebert, G. J. (2011). A technique for fabricating a 2-part surgical template. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 106(1), 57–60. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(11\)60094-2](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(11)60094-2)

- Almog, D. M., Torrado, E., Moss, M. E., Meitner, S. W., y LaMar, F. (2002). Use of imaging guides in preimplant tomography. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontics*, 93(4), 483–487. doi: <https://doi.org/10.1067/moe.2002.121389>
- Argüello González, J. E. (2013). Cirugía guiada protésico-quirúrgica: Aplicación de una nueva técnica. *Tecnica Dental*, 80(80), 28–32.
- Banoriya, D., Purohit, R., y Dwivedi, R. K. (2015). Modern trends in rapid prototyping for biomedical applications. *Materials Today: Proceedings*, 2(4–5), 3409–3418. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.316>
- Barnea, E., Alt, I., Kolerman, R., y Nissan, J. (2010). Accuracy of a laboratory-based computer implant guiding system. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology and Endodontology*, 109(5), e6–e10. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2010.01.001>
- Biotti Picand, J., y García Nieto, J. (2014). Técnica simplificada en la rehabilitación del desdentado. *Revista Clínica de Periodoncia, Implantología Y Rehabilitación Oral*, 7(1), 17–20. doi: <https://doi.org/10.4067/S0719-01072014000100004>
- Boyce, R. A., y Klemons, G. (2015). Treatment planning for restorative implantology. *Dental Clinics of North America*, 59(2), 291–304. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cden.2014.10.009>
- Briccoli, L., Barone, R., y Clauser, C. (2012). A technique for fabricating a definitive immediate implant-supported prosthesis for the edentulous mandible. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 108(3), 196–199. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(12\)60148-6](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(12)60148-6)
- Carlevaris, B., y Armijo, A. (2013). Precisión en cirugía guiada por ordenador. *Dental Tribune Hispanic & Latin America*, 21, 20–23.
- Cassetta, M., Mambro, A. Di., Giansanti, M., Stefanelli, L. V, y How, E. B. (2014). How does an error in positioning the template affect the accuracy of implants inserted using a single fixed mucosa-supported stereolithographic surgical guide ? *International Journal of Oral & Maxillofacial Surgery*, 43(1), 85–92. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2013.06.012>
- De Kok, I. J., Thalji, G., Bryington, M., y Cooper, L. F. (2014). Radiographic stents: Integrating treatment planning and implant placement. *Dental Clinics of North America*, 58(1), 181–192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cden.2013.09.008>
- Ganz, S. D. (2015). Three-Dimensional Imaging and Guided Surgery for Dental Implants. *Dental Clinics of North America*, 59(2), 265–290. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cden.2014.11.001>
- Gómez de la Mata Galiana, J., Lora-Vázquez, M., Gómez de la Mata Galiana, G., y Gutiérrez-Pérez, J. L. (2006). Planificación y rehabilitación inmediata en la cirugía mínimamente invasiva. *Rcoe*, 11(2), 221–227. doi: <https://doi.org/10.4321/S1138-123X2006000200006>
- Greenberg, A. M. (2015). Digital Technologies for Dental implant treatment planning and guided surgery. *Oral and Maxillofacial Surgery Clinics of North America*, 27(2), 319–340. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coms.2015.01.010>
- Kaye, R., Goldstein, T., Zeltsman, D., Grande, D. A., y Smith, L. P. (2016). Three dimensional printing: A review on the utility within medicine and otolaryngology. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 89, 145–148. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2016.08.007>
- Madriz, G., y Martín, A. (2009). Férulas quirúrgicas en Implantología. *Cient. Dent*, 6, 165–175.

- Marchack, C. B., Charles, A., y Pettersson, A. (2011). A single appointment protocol to create a partially edentulous CAD/CAM guided surgical template: A clinical report. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 106(6), 346–349. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(11\)00158-2](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(11)00158-2)
- Martelli, N., Serrano, C., Van Den Brink, H., Pineau, J., Prognon, P., Borget, I., y El Batti, S. (2016). Advantages and disadvantages of 3-dimensional printing in surgery: A systematic review. *Surgery (United States)*, 159(6), 1485–1500. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surg.2015.12.017>
- Matta, R. E., Bergauer, B., Adler, W., Wichmann, M., y Nickenig, H. J. (2017). The impact of the fabrication method on the three-dimensional accuracy of an implant surgery template. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 45(6), 804–808. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2017.02.015>
- Melej, C., Ibañez, C., y Ilic, D. (2011). Planificación quirúrgica digital guía quirúrgica semi estricta e implantes alternativos al sistema original ABSTRACT. *Fundación Juan José Carraro*, 34, 1–13.
- Misir, A. F., Sumer, M., Yenisey, M., y Ergioglu, E. (2009). Effect of surgical drill guide on heat generated from implant drilling. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 67(12), 2663–2668. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joms.2009.07.056>
- Molina, I. C., Molina, G. C., Bez, L., Magini, R. D. S., Ángela, C., y Volpato, M. (2013). Guided surgery in implantology practice. *Revista Odo*, 17(2), 117–122.
- Narayanan, G., Vernekar, V. N., Kuyinu, E. L., y Laurencin, C. T. (2016). Poly (lactic acid)-based biomaterials for orthopaedic regenerative engineering. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 247–276. doi: <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.04.015>
- Nogueira, P., Alencar, B., Roque-torres, G. D., y Groppo, F. C. (2015). Utilización del prototipado rápido en la odontología. *Rev Estomatol Herediana*, 25(2), 167–174. doi: <https://doi.org/10.20453/reh.v25i2.2463>
- Oh, W. suk, y Saglik, B. (2008). A simple method to duplicate a denture for an implant surgical guide. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 99(4), 326–327. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(08\)60072-4](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(08)60072-4)
- Orentlicher, G., Goldsmith, D., y Abboud, M. (2012). Computer-guided planning and placement of dental implants. *Atlas of the Oral and Maxillofacial Surgery Clinics of North America*, 20(1), 53–79. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cxom.2011.12.004>
- Patras, M., Martin, W., y Sykaras, N. (2012). A novel surgical template design in staged dental implant rehabilitations. *J Oral Maxillofac Res*, 3(2), e5–e5. doi: <https://doi.org/10.5037/jomr.2012.3205>
- Sanna, A. M., Molly, L., y van Steenberghe, D. (2007). Immediately loaded CAD-CAM manufactured fixed complete dentures using flapless implant placement procedures: A cohort study of consecutive patients. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 97(6), 331–339. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(07\)60021-3](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(07)60021-3)
- Scherer, M. D., y Roh, H. K. (2015). Radiopaque dental impression method for radiographic interpretation , digital alignment , and surgical guide fabrication for dental implant placement. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 113(4), 343–346. doi: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2014.02.022>
- Shotwell, J. L., Billy, E. J., Wang, H. L., y Oh, T. J. (2005). Implant surgical guide fabrication for partially edentulous patients. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 93(3), 294–297. doi: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2004.12.013>
- Simon, H. (2002). Enhancing the accuracy of implant placement. *Thre Journal of Prosthetic Dentistry*, 17(2), 229–232. doi: <https://doi.org/10.1067/mpr.2002.121824>

- Stumpel, L. J. (2008). Cast-based guided implant placement: A novel technique. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 100(1), 61–69. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(08\)60140-7](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(08)60140-7)
- Turbush, S. K., y Turkyilmaz, I. (2012). Accuracy of three different types of stereolithographic surgical guide in implant placement: An in vitro study. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 108(3), 181–188. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(12\)60145-0](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(12)60145-0)
- Verhamme, L. M., Meijer, G. J., Bergé, S. J., y Maal, T. J. J. (2015). The use of first stage bone augmentation screws to stabilize the surgical template in the second stage. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 44(6), 781–784. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2015.01.010>
- Volpato, C. A. M., Vasconcellos, D. K., Garbelotto, L. G. D., Manfro, R., y Özcan, M. (2013). A modified surgical template with dual function. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 110(3), 232–233. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(13\)60364-9](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(13)60364-9)
- Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., y Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 110, 442–458. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>
- Zahran, M. H., y Fenton, A. (2010). A radiopaque implant template for partially edentulous patients. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 103(6), 390–392. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(10\)60085-6](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(10)60085-6)
- Zandinejad, A., Abdel-Azim, T., Lin, W. S., y Morton, D. (2013). Fabrication of a fixed multipurpose template retained by existing dental implants. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 110(2), 144–146. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(13\)60356-X](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(13)60356-X)



Bio-Energía: Trabajo muscular y respiración en la córnea

Bio-Energy: muscular work and breathing in the cornea

Luis F. del Castillo¹
 Juanibeth G. Ramírez-Calderón²
 Carolina Caicedo³
 Yenny Ávila-Torres⁴
 Diego F. Caicedo-Cano⁵
 Vicente Compañ⁶

¹Mexicano. PhD. Departamento de Polímeros, Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, México. E-mail: lfelipe@unam.mx.

²Mexicana. Física. Departamento de Polímeros, Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, México. E-mail: summersbunbury@hotmail.com.

³Colombiana. PhD. Grupo de investigación GIDEMP, Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria, Servicio Nacional de Aprendizaje-SENA. Cali, Colombia. E-mail: ccaicedo60@misena.edu.co.

⁴Colombiana. PhD. Grupo de Investigación QCOAMMSB, Escuela de Química, Universidad Tecnológica de Pereira, La Julita, Pereira, Risaralda, Colombia. E-mail: yennypatricia.avila@utp.edu.co.

⁵Colombiano. MSc. ESE Hospital Departamental Tomás Uribe Uribe de Tuluá, Empresa Social del Estado. Valle del Cauca. Colombia. E-mail: difer821@hotmail.com.

⁶Español. PhD. Departamento de Termodinámica Aplicada. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII). Universidad Politécnica de Valencia, España. E-mail: vicommo@ter.upv.es.

Recibido: 29-06-2017 Aceptado: 21-02-2018

Resumen

En este artículo de revisión se presentan dos casos del área de bioenergía en relación con la producción de energía vía descomposición del trifosfato de adenosina (ATP). El primero, es el trabajo que realiza el cuerpo humano debido a la contracción del músculo esquelético y el segundo el proceso de difusión de oxígeno en la córnea. Se exponen los antecedentes químico-físicos de la producción y utilización de la molécula energética por excelencia del ATP. Se analizan desde el punto de vista termodinámico, la generación de moléculas bioenergéticas tanto en la respiración aeróbica como en glicólisis anaeróbica. En este sentido, se presentan los procesos de biosíntesis para la utilización de la energía que almacenan las moléculas de ATP y se describe el transporte activo de moléculas en contra de gradientes de concentración. El transporte vesicular de proteínas, la permeabilidad de iones a través de las membranas envolventes a las paredes celulares por medio de las denominadas bombas de sodio-potasio. Posteriormente, se establecen algunos detalles acerca de los mecanismos por medio de los cuales se da la contracción muscular, haciendo referencia a la estructura de las fibras musculares. En el segundo caso, se muestra el estudio de la fisiología de la córnea, donde también se genera trabajo químico para mantener su transparencia a la luz, proveniente del exterior del ojo. Lo que conlleva a la conservación de la estructura adecuada de las células del endotelio, estroma y epitelio. Así mismo, se ilustra el requerimiento de trabajo osmótico para mantener el balance del pH en la córnea, cuando se encuentra con una deficiencia de oxígeno. En tal circunstancia se genera un flujo contra osmótico desde el humor acuoso hacia el estroma que tiende a contrarrestar el aumento de acidez.

Palabras clave: Contracción muscular; córnea; trifosfato de adenosina (TPA); difosfato de adenosina (DPA); consumo de oxígeno; porfirina.

Cómo citar: Del Castillo, L. F., Ramírez-Calderón, J. G., Caicedo, C., Ávila-Torres, Y., Caicedo-Cano, D. F., Compañ, V. (2018). Bio-energía: Trabajo muscular y respiración en la córnea. *Informador Técnico*, 82(1), 90-107. doi: <http://doi.org/10.23850/22565035.884>

Abstract

In this review article, two cases of the bioenergy area are presented, in relation to the production of energy via the decomposition of adenosine triphosphate (ATP). The first is the work done by the human body due to the contraction of the skeletal muscle and the second the process of oxygen diffusion in the cornea. The chemical-physical background of the production and use of the energy molecule par excellence of the ATP is exposed. The generations of bioenergetic molecules in aerobic respiration and in anaerobic glycolysis are analyzed from the thermodynamic point of view. In this sense, the processes of biosynthesis for the use of the energy stored by the ATP molecules are presented and the active transport of molecules against concentration gradients is described. The vesicular transport of proteins, the permeability of ions through the enveloping membranes to the cell walls by means of the so-called sodium potassium pumps. Subsequently, some details are established about the mechanisms by which muscle contraction occurs, with reference to the structure of muscle fibers. In the second case, the study of the physiology of the cornea is shown, where chemical work is also generated to maintain its transparency to light, coming from outside the eye. This leads to the conservation of the proper structure of the endothelial cells, stroma and epithelium. Likewise, the osmotic work requirement is illustrated to maintain the balance of the pH in the cornea, when it encounters an oxygen deficiency. In such circumstance, an osmotic flow is generated from the aqueous humor towards the stroma which tends to counteract the increase in acidity.

Keywords: Muscle contraction; cornea; adenosine triphosphate (ATP); adenosine diphosphate (ADP); oxygen consumption; porphyrins.

Introducción

La molécula especializada capaz de producir movimiento a partir de la energía química, como consecuencia del trabajo generado es la molécula de trifosfato de adenosina (ATP). La conversión de energía química en trabajo muscular, es uno de los mecanismos más extraordinarios conocidos en la naturaleza biológica (Lodish *et al.*, 1995). Además, es el mecanismo responsable de la motilidad y esfuerzos musculares (Kushmerick y Davies, 1969). Lo esencial, es la producción de trabajo directo de la energía libre que está contenida en las uniones moleculares. En contraste, los dispositivos de ingeniería producen trabajo a partir de la energía atrapada en los combustibles, utilizando un paso intermedio entre la conversión de energía química y trabajo (Cavagna, Heglund y Taylor, 1977). Este proceso genera una expansión volumétrica que conlleva a la realización de trabajo. Este mecanismo es utilizado en los motores de combustión externa (máquinas de vapor) y en los motores de combustión interna (máquinas automotrices). En el caso de la motilidad muscular se lleva a cabo la ruptura violenta de la molécula de ATP en dos partes: una de menor peso molecular que corresponde al grupo fosfato, y otra de mayor peso molecular que corresponde al difosfato de adenosina ADP (Bennett, 1981).

En relación con la motilidad y tensión originadas en los músculos-esquelético, se describe el arreglo especial que presentan las fibras musculares, para realizar una retro recarga producida por la descomposición del ATP en la que un filamento delgado se desliza en relación con otro grueso, dando lugar al efecto de contracción muscular.

Por otro lado, en cuanto a la fisiología de la córnea (Leung, Bonanno, y Radke, 2011), el trabajo de ATP se utiliza para establecer canales de transporte activo del tipo de bomba sodio-potasio, para mover iones de bicarbonato, regular el pH en la córnea y trasladar la glucosa desde el humor vítreo (Baum, Maurice y McCarey, 1984). Todo ello, en este trabajo, será indicado en términos de análisis experimental describiendo el consumo de oxígeno, en cada una de las partes de la córnea (endotelio, estroma y epitelio), y el efecto asociado de dicho consumo con la presión parcial de oxígeno existente en la interface córnea-lágrima/lente generada en función de la transmisibilidad de la lente de contacto usada (Takatori *et al.*, 2012; Bonanno *et al.*, 2002; Bonanno, Clark, Pruitt, y Alvord, 2009). La medida de la presión es obtenida experimentalmente del análisis de la fluorescencia producida por una porfirina ubicada entre la córnea y el lente de contacto (Takahashi, Fatt, y Goldstick, 1966). Finalmente, se discutirá el resultado de los análisis numéricos obtenidos mediante simulación computacional, para cuantificar el consumo de oxígeno en diferentes puntos de la córnea: epitelio, estroma y endotelio (Del Castillo, 2015; Compañ, Aguilera-Arzo, Del Castillo, Hernández, y Gonzalez-Mejome, 2017).

A partir del estudio de la presión parcial de oxígeno sobre la interface córnea-lente de contacto, se muestra la necesidad de producción de ATP en la córnea y se describen los detalles de la respiración de las células de la córnea. Para ello, describimos los experimentos que cuantifican la presión parcial de oxígeno a la entrada de la córnea (interface córnea-lágrima-lente de contacto), y las simulaciones que permitieron predecir los perfiles de la distribución de oxígeno en cada una de sus partes internas (epitelio, estroma, endotelio). El modelo para determinar el consumo del oxígeno se fundamenta en la cinética de las reacciones enzimáticas. Finalmente, se exponen las predicciones del consumo de oxígeno en la córnea sobre la que se disponen diferentes lentes de contacto, haciendo uso del modelo metabólico, y se muestra la presencia de una discontinuidad que es al día de hoy objeto de debate e investigación.

Fundamentos termodinámicos de la conversión de energía química en trabajo muscular

En el formalismo termodinámico el trabajo (W) obtenido en cualquiera de los procesos mencionados anteriormente se detalla por medio de ecuación 1, que expresa el teorema de trabajo máximo.

$$W \leq -\Delta G^{0'} \quad (1)$$

El símbolo Δ representa el cambio de la energía libre de Gibbs ($G^{0'}$). El superíndice cero indica que esta función es evaluada en condiciones estándar (una atmosfera de presión, 20°C y un pH de 7,0). El superíndice prima indica que esta cantidad es molar.

De acuerdo con la ecuación anterior, el signo igual describe el trabajo obtenido en condiciones cuasi estáticas reversibles, corresponde al trabajo máximo que se podría obtener, ya que en condiciones reales alguna cantidad de energía no es utilizada para la producción de trabajo y se convierte en calor Q . Bajo esta situación podemos expresar la inecuación en ecuación donde la igualdad la podemos expresar en la ecuación 2.

$$W + Q = -\Delta G^{0'} \quad (2)$$

Considerando que la cantidad de calor es disipada dentro del sistema biológico, esta cantidad (de acuerdo con el criterio de signos) es positiva, y entonces se tiene que una cantidad de entropía es producida, ecuación 3.

$$Q = T\Delta S^{0'} \geq 0 \quad (3)$$

De acuerdo con las ecuaciones (2) y (3) podemos expresar que un aumento de entropía ($\Delta S^{0'}$) nos indica que la conversión de energía libre en trabajo es un proceso incompleto.

Biocombustibles a partir de moléculas orgánicas

La forma en que la energía química se conserva y se transporta es en la molécula llamada trifosfato de adenosina o ATP, cuya estructura química se representa en la Figura 1. Una observación detenida de la figura nos indica que su estructura molecular revela el acercamiento de cargas del mismo signo, de manera que se asemeja a un resorte comprimido en disposición de saltar y por tanto con capacidad de producción de energía cuando se rompa alguno de los enlaces.

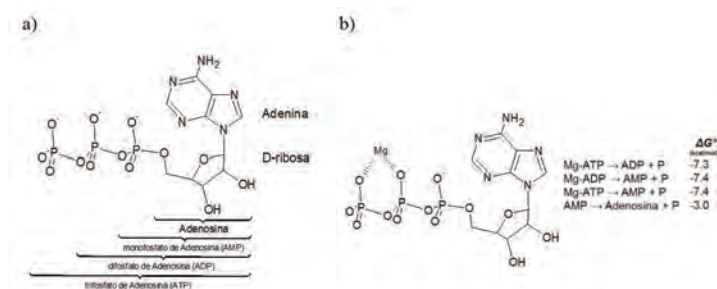


Figura 1. a) Estructura de la molécula de ATP. b) Estructura del complejo de ATP con Mg^{2+} , el cual está ligado coordinadamente con los fosfatos beta (β) y gamma (γ) (Lenhinger, 1970).

Fuente: Los autores.

En una serie de reacciones químicas escalonadas en diferentes estratos se forma una de las moléculas más energéticas que se conocen. La molécula de ATP se obtiene en la respiración de los heterótrofos, envolviendo un ciclo químico llamado de Krebs, donde se consume oxígeno y se producen 36 moléculas de ATP. Lo cual representa un alto rendimiento comparado con la fermentación de la glucosa, donde se producen dos moléculas de ATP. En este último caso, la energía en forma de trifosfato de adenosina (ATP) se genera por la descomposición de 1 mol de glucosa en agua y dióxido de carbono, primero por la vía de Embden-Meyerhof (glicólisis anaeróbico) produciendo 2 moles de ATP. En ausencia de oxígeno, este proceso termina aquí en ácido pirúvico, que se convierte entonces en ácido láctico. Si hay oxígeno disponible (Lodish *et al.*, 1995), el ciclo convencional de ácido tricarboxílico (TCA) o Krebs (glicólisis aeróbico) suele seguir, transformando ácido pirúvico a CO_2 y agua para producir 36 moles adicionales de ATP, tal como se ilustra en la Figura 2.

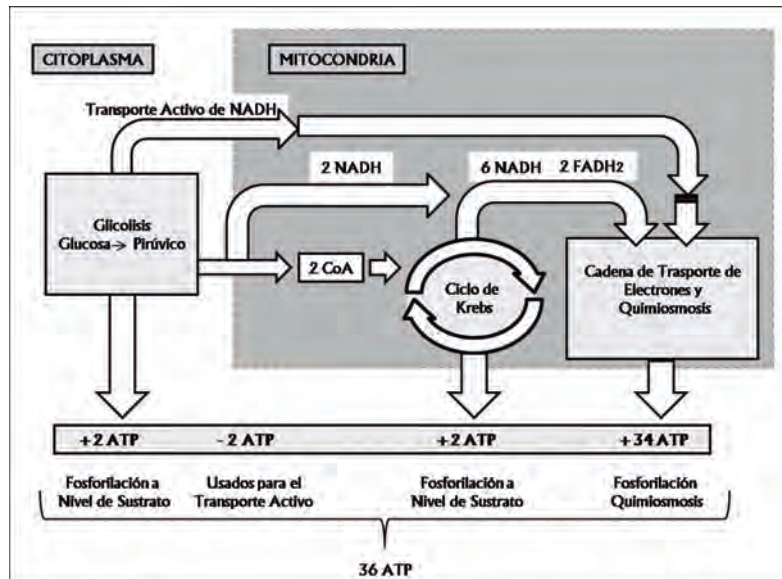


Figura 2. En primera instancia la producción de ATP por el proceso de glicólisis se llega a producir 2 moléculas de ATP con un rendimiento de 31%. En cambio, la oxidación de la glucosa produce en el ciclo de Krebs 2 moléculas de ATP y mediante el transporte de electrones a través de las cadenas 34 moléculas de ATP dando un total de 36 moléculas de ATP con un rendimiento del 38%.

Fuente: Los autores.

La utilización del ATP se divide en 3 formas:

- El trabajo químico.
- El trabajo osmótico.
- El trabajo mecánico.

En el primer caso tenemos la llamada biosíntesis en la que el ATP interviene en la obtención de productos complejos del metabolismo de los animales, como ocurre en la elaboración de polisacáridos, porfirinas, compuestos fosfatados, proteínas, ácidos nucleicos, lípidos, entre otros. En el segundo caso, tenemos la concentración de sustancias que elevan el potencial químico (en contra de la difusión *fickiana*) de los compartimentos de la célula y generan flujo osmótico. Particularmente, este flujo sigue la dirección del gradiente del potencial químico y el ATP logra subir los potenciales electroquímicos haciendo trabajo para concentrar sustancias, iones y compuestos de importancia vital dentro del consumo metabólico de la célula, como la glucosa. La manera de lograr la concentración de sustancias es por medio del transporte activo, en forma de bombas de sodio-potasio, a través del transporte facilitado y por medio de vesículas. Específicamente, una bomba de sodio-potasio se caracteriza por ser una estructura en la interface de la membrana celular y opera por medio de un cambio en los sitios de absorción para atrapar iones de Na^+ y K^+ , modificando su forma configuracional por medio de una descomposición de la ATP.

En el tercer caso tenemos la realización de trabajo por medio de las fibras de los músculos-esqueléticos. La obtención de la fuerza de contracción de las fibras musculares proporciona la movilidad de los animales.

Modelo para explicar la contracción muscular

Para comprender mejor el modelo de la contracción muscular, se aborda en primera instancia, la estructura anatómica del sistema muscular esquelético, es decir, los componentes que conforman el músculo estriado. En segunda instancia, las microfibrillas que conforman el músculo estriado se dividen en una serie de unidades repetidas longitudinalmente llamadas sarcómeros, el cual se muestra en la Figura 3A. El sarcómero es la unidad básica y funcional del músculo, y está delimitado por los discos Z. La disposición intercalada de estos filamentos da lugar a la aparición de las bandas A que se alternan con las bandas I. Asimismo, los miofilamentos finos están formados por una proteína denominada actina, la cual es una proteína globular. Estas moléculas se polimerizan para formar la actina fibrilar. Otras proteínas que conforman los filamentos son: la tropomiosina y troponina (Figura 3B).

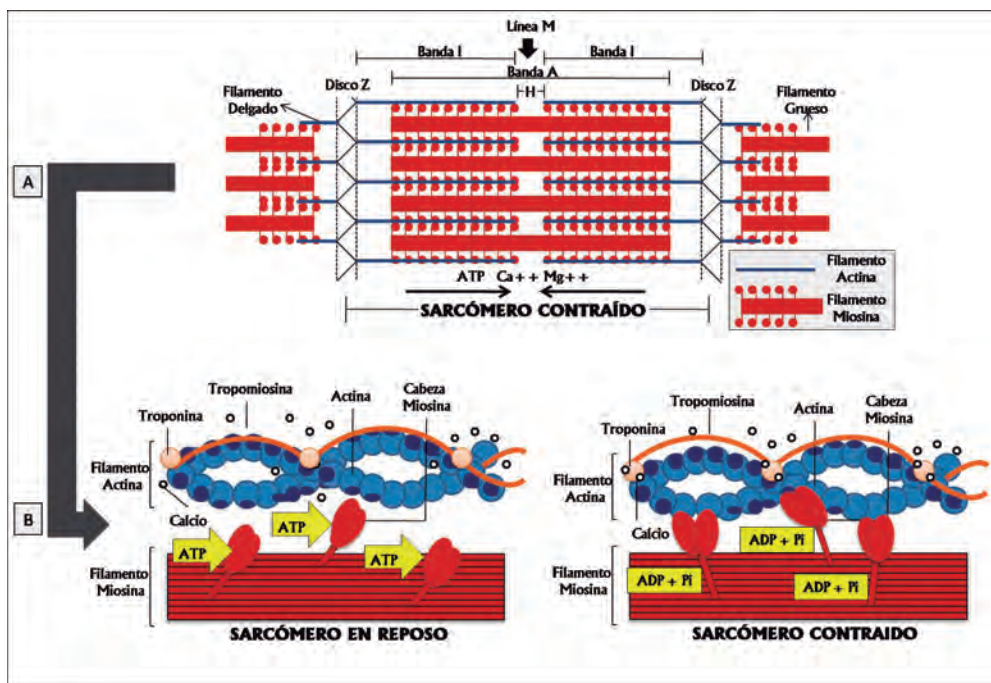


Figura 3. a) Distribución del Sarcómero: Banda A, Bandas I, Discos Z, Filamentos delgados, Filamentos Gruesos, Espacio H y Línea M. b) La distribución de iones calcio en los espacios intermusculares, por acercamiento, la molécula de ATP dispara la descomposición en dos moléculas, la de ADP y el grupo fosfato. Este último queda ligado a la miosina la cual se ha adherido a las fibras delgadas de la actina.

Fuente: Los autores.

De acuerdo con la Figura 3, se tienen, en las fibras del músculo esquelético, estructuras especiales que coordinan la contracción muscular. Se destaca el sarcómero del endoplasma de la célula. Cuando se liberan iones de calcio del sarcómero y llegan a las fibrillas, se dispara la contracción muscular.

Aunque el mecanismo de la contracción muscular actualmente sigue en discusión (Morel, 2015), una imagen tentativa se establece considerando el deslizamiento relativo de la actina o filamento delgado, respecto a los filamentos gruesos (miosina), la contracción ocurre cuando se rompe un entramado dado por entrecruzamientos de finos tirantes con nacimiento en los filamentos gruesos y terminación en la cabeza de la miosina (Huxley, y Simmons, 1971). El entramado se produce cuando el extremo donde se encuentra la miosina se pega a los filamentos delgados. En la miosina se liga una molécula de ATP. Cuando el ion calcio se acerca a la molécula de ATP, por efecto de la repulsión coulombiana llevada a cabo entre las cargas de los iones calcio (Ca^{2+}) con el ion magnesio (Mg^{2+}) (Muñiz *et al.*, 1996) se separa el grupo fosfato de la otra parte de

la molécula del ATP, que es el difosfato de adenosina (ADP). La cabeza de la miosina adherida a los filamentos delgados mueve este filamento por la retrocarga producida por el disparo del ADP (véase la parte B de la Figura 3).

De acuerdo con la concentración de calcio en la solución intramuscular del número de cabezas de miosinas, que intervienen en la acción simultánea del ATP, se produce la intensidad requerida de la fuerza muscular, tal y como se visualiza de manera esquemática en la Figura 3A. En la regulación de la actividad del trabajo muscular, participan millones de terminales nerviosas por medio de la inyección de neurotransmisores sobre las interfaces nervio-músculo. Cuando el músculo está inactivo, los iones calcio se hallan aislados en compartimentos intramusculares. Sin embargo, en el momento en que las células reciben la señal eléctrica de acción, el calcio se libera y los filamentos de actina y miosina se deslizan mutuamente dando lugar a la contracción muscular. La retro carga de grupo fosfato al impulso de disparo del ADP hace retroceder el músculo. La acción conjunta de otros disparos simultáneos da la intensidad y tono de la contracción muscular (Rayment *et al.*, 1993).

Efecto de la presión parcial de oxígeno sobre el consumo de oxígeno en la córnea

La córnea es un tejido vascular y se requiere trabajo osmótico para el acarreo de la glucosa y otras sustancias necesarias para la fisiología ocular. En cada una de sus partes, endotelio, epitelio y estroma, se lleva a cabo el transporte activo para mover iones de carbonato, regular el *pH* de la córnea y evitar el edema resultante. Para ello, se necesita un suministro de oxígeno necesario para la formación de ATP, que refleja la actividad de la córnea. Dicho suministro proviene mayoritariamente vía respiración aeróbica de la atmósfera ambiente, en el caso de ojos abiertos, mientras que se realiza por difusión desde los capilares de la conjuntiva palpebral y de la cámara anterior (humor acuoso) en condiciones de ojos cerrados. Experimentalmente es complejo cuantificar el gradiente de presiones y consumo de oxígeno en las diferentes partes de la córnea (epitelio, estroma y endotelio) (Nicholls, y King-Smith, 2003; Weissman, 1984). Los estudios son llevados a cabo por medio de simulaciones teóricas a partir de datos experimentales, que se conocen en los extremos de la córnea, tanto bajo la situación de ojo abierto como ojo cerrado (Papavas, 2003; Pérez, Méijome, Jalbert, Sweeney y Erickson, 2003; Alvord, Hall, Keyes, Morgan, y Winterton, 2007).

Las técnicas experimentales solo logran medir la presión parcial de oxígeno que tenemos en la capa de lágrima en contacto con la córnea, tanto en ojo abierto (aproximadamente 155 mmHg a nivel del mar) (Smelser y Ozanics, 1952) como en ojo cerrado (aproximadamente 61. 5mmHg) proveniente de la conjuntiva palpebral (Brennan, 2005; Chhabra, 2009; Compañ *et al.*, 2014). La entrada de oxígeno se da en la región denominada epitelio. Por otro lado, en la parte posterior de la córnea, el endotelio, recibe el oxígeno del humor acuoso cuya tensión de oxígeno es aproximadamente de 24. 1 mmHg. (Polse y Mandell, 1970). Estos datos los podemos tomar como condiciones de contorno, y aplicar un análisis numérico para conocer el perfil de presiones de oxígeno en los diferentes puntos de la córnea, estimando la razón de consumo de oxígeno. El procedimiento se plantea en la solución de la segunda ley de Fick, con un término de consumo bajo las condiciones limitantes a la frontera (Leach y Treacher, 1998).

Los datos experimentales de la presión parcial de oxígeno son medidos por medio de un fosforímetro ante la reacción de porfirina colocada entre la córnea y el lente de contacto, tal y como ha sido reportado por Bonanno y colaboradores (Bonanno *et al.*, 2002; Bonanno, *et al.*, 2009). Para esto, se prepara al paciente con un lente de contacto dispuesto sobre la córnea durante cinco minutos bajo la condición de ojos cerrados. Transcurrido este tiempo (tiempo cero), el sistema córnea-lágrima-lente se expone a la atmosfera ambiente y se mide el transitorio del cambio de presión con el tiempo, tal como se indica en la Figura 4.

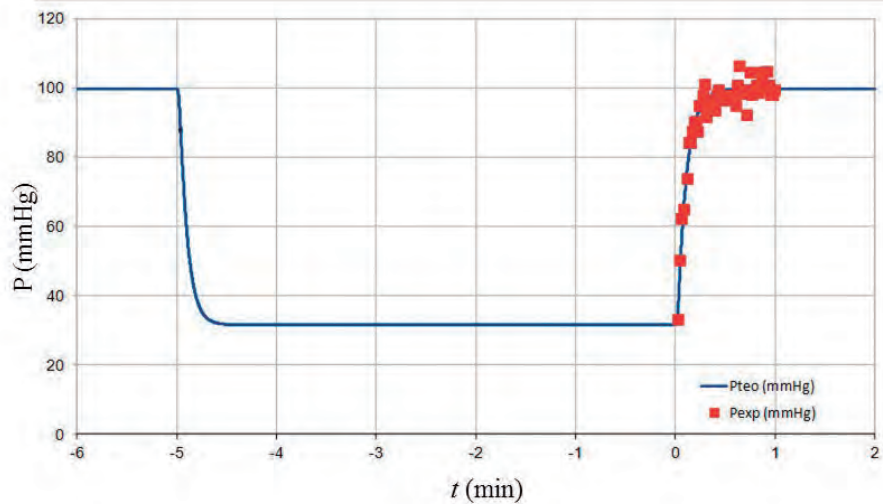


Figura 4. Evolución de la presión parcial del oxígeno a la entrada de la córnea.
Fuente: Larrea *et al.*, 2009

En la Figura 4, observamos que transcurrido un tiempo en función de la lente dispuesta, se obtiene un estado donde la presión es prácticamente constante con el tiempo (Chhabra, 2009; Larrea y Büchler, 2009). Esta presión es denominada presión estacionaria y es la que el paciente tendrá en la interface córnea-lágrima al usar la lente de forma ininterrumpida (condiciones estacionarias) (Lee, Nguyen, Edrington, y Weissman, 2015).

La línea de trazo continuo en la Figura 4, representa la evolución del gradiente de presiones de oxígeno en la córnea. Por lo cual, es necesario determinar la solución de la ecuación diferencial siguiente (Guyer, Wheeler, y Warren, 2009), ecuación 4.

$$\frac{\partial^2 p_c}{\partial x^2} - \left(\frac{Q}{Dk} \right)_c = \frac{1}{D_c} \frac{\partial p_c}{\partial t} \quad (4)$$

donde $p_c(x,t)$ es la presión parcial de oxígeno en mmHg, D_c es el coeficiente de difusión en el tejido de la córnea, supuesta homogénea, en cm^2/s , k_c es el coeficiente de solubilidad del tejido de la córnea en cm^3 de O_2 / cm^3 de tejido / mm de Hg, x es la distancia en la dirección normal a la superficie de la córnea en cm, Q_c es la variación del consumo de oxígeno en mL of O_2 / cm^3 de capa de tejido / s, y t el tiempo en s. El sub-índice c se refiere a las cantidades medidas en la córnea. Cuando se alcanza el estado estacionario, la ecuación (5) se reduce a:

$$\frac{\partial^2 p_c}{\partial x^2} = \left(\frac{Q}{Dk} \right)_c \quad 0 \leq x \leq x_c, \quad (5)$$

De acuerdo con las condiciones de contorno de Dirichlet

$$\begin{aligned} p(x_c = 0) &= p_0 = 24.1 \text{ mmHg} \\ p(x_c) &= p_{xc} \end{aligned}$$

Donde x_c es el espesor de la córnea, es decir, la distancia desde el humor acuoso a la interface córnea-lágrima, p_0 es la tensión de oxígeno en el humor acuoso ($x_c=0$), y p_{xc} la tensión de oxígeno en la interface córnea-lágrima que en el caso de ojos abiertos sin lente será de 155 mmHg, y en el caso de ojos cerrados sin lente está dada por la presión parcial de oxígeno que proviene de la conjuntiva palpebral e igual a 61. 5mmHg. En el caso de un lente de contacto situada sobre la córnea, la tensión de oxígeno dependerá de su Transmisibilidad, definiéndose esta como el cociente entre la permeabilidad (P) y el espesor de la lente (L), (i. e. Transmisibilidad = Permeabilidad / L), (Weissman, 1986; Compañ, Andrio, López-Aleman, Riande y Refojo, 2002). Para la capa de lágrima y la lente las ecuaciones están dadas, respectivamente, por medio de las ecuaciones (6) y (7).

$$\frac{\partial^2 p_{tear}}{\partial x^2} = 0 \quad x_c \leq x \leq x_c + x_{tear} \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 p_{lens}}{\partial x^2} = 0 \quad x_c + x_{tear} \leq x \leq x_c + x_{tear} + x_{lens} \quad (7)$$

Donde x_{tear} y x_{lens} son los espesores de la capa de lágrima y el lente, respectivamente. p_{tear} , p_{lens} y $p_c(x)$ son las presiones parciales de oxígeno en la lágrima, el lente y en la córnea (la variable a determinar puntualmente), respectivamente. En primera aproximación, para determinar el consumo de oxígeno, nosotros consideramos a la córnea como un sistema homogéneo en donde cada uno de los parámetros, difusividad, solubilidad y permeabilidad al oxígeno son valores promedio de todo el sistema compuesto por el epitelio, estroma y endotelio (Wang, Fonn y Simpson, 2003).

La solución de la ecuación (8) para la córnea es una función de $Q_c(p_c)$ como un resultado del metabolismo aeróbico, más concretamente del ciclo de Krebs, donde una mol de glucosa reacciona con 6 moles de oxígeno para formar 6 moles de dióxido de carbono y agua; produciendo una energía en la forma de 36 moles de ATP. Durante los últimos años (Hill, y Fatt, 1964), han surgido diferentes funciones $Q_c(p_c)$ para determinar el perfil de presiones y consumo de oxígeno en la córnea. La más utilizada es una función no-lineal basada en una hipótesis funcional del consumo de oxígeno, de acuerdo con la reacción enzimática dependiendo de la concentración de oxígeno, como es la expresión dada para el funcionamiento metabólico, donde el consumo varía con la tensión por medio de la expresión:

$$Q_c(p_c) = \frac{Q_{c,max} \cdot p_c(x)}{(K_m + p_c(x))} \quad (8)$$

Donde $Q_{c,max}$, es una cantidad desconocida que depende de otras variables como el pH y la concentración de la glucosa. El valor del parámetro de K_m se modela de acuerdo a la reacción de la respiración de las especies biológicas llamadas heterótrofos que consumen oxígeno, con un valor de $K_m = 2$. Este valor corresponde a $Q_c/Q_{c,max} = 0.9$, y una presión en la interface córnea-lágrima de 20 mmHg (Chhabra *et al.*, 2009).

La ecuación (8) describe la variación del consumo $Q_c(p_c)$ en función de la presión p_c , desde un valor mínimo igual a cero cuando la tensión de oxígeno es cero $Q_c(p_c)=0$, hasta un valor máximo $Q_{c,max}$ ya una tensión de oxígeno $p_c=155$ mmHg, correspondiente a la presión parcial de oxígeno en la interface córnea-lágrima bajo la condición de ojos abiertos, que representa la condición de equilibrio de una córnea expuesta a la presión atmosférica a nivel del mar. Estas condiciones, para el metabolismo aeróbico de la glucosa con el oxígeno (ciclo de Krebs) están saturadas, llevando al sistema a un consumo que es independiente de la presión (Holden, Sweeney, Vannas, Nilsson, y Efron, 1985). Este modelo reproduce experimentos individuales para cada lente (Fonn, Sweeney, Holden y Cavanagh, 2005).

La Figura 5A muestra la variación de la tensión de oxígeno en la interface córnea-lágrima, en función del tiempo utilizando un lente de contacto Biomedics. Los puntos representan los datos experimentales obtenidos por Bonanno y colaboradores (Bonanno *et al.*, 2002) usando la técnica "Dye" y la línea de trazo continuo corresponde a la curva teórica obtenida, al llevar las ecuaciones (5) a (8), con las condiciones de contorno establecidas para ojo abierto y ojo cerrado (Graham, Fusaro, Polse, Lin, y Giasson, 2001), respectivamente. Obtenido el parámetro $Q_{c,max}$ se ha determinado el gradiente de presiones en la córnea, tal y como se muestra en la Figura 5B para el sistema córnea/lágrima/lente Biomedics. Para esto, se ha considerado a la lágrima como una capa de agua con valores de solubilidad y coeficiente de difusión de oxígeno de 3.3×10^{-5} mL de O_2 (sTP)/cm³ de tejido/mmHg y 3×10^{-5} cm²/s, respectivamente. Los parámetros de la lente Biomedics son: espesor de la parte central del lente, $L=115$ μm, y permeabilidad al oxígeno $P=19.7$ b. Como podemos observar de la Figura 5A, el ajuste teórico tiende a comportarse del mismo modo que los valores experimentales. El valor del consumo de oxígeno en la córnea obtenido para este tipo de lentes fue de 5×10^{-5} cm² de O_2 /cm³ de tejido/s.

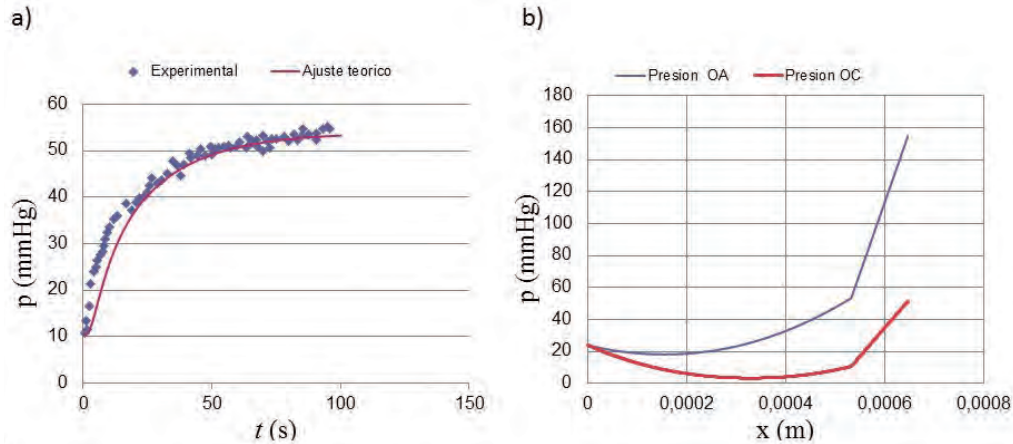


Figura 5. En la Figura (a) se establece el ajuste a los datos experimentales por medio del modelo metabólico para una lente Biomedics. En la Figura (b) se muestra el perfil de la presión parcial del oxígeno en cada punto de la córnea, para la misma lente, calculado por medio de la ecuación diferencial PDE usando FiPy. La solución puede obtenerse por medio de Python con las condiciones de contorno indicadas. Cada curva corresponde a condiciones diferentes: OA: ojos abiertos y OC: ojos cerrados.

Fuente: Bonanno *et al.*, 2002

Un estudio similar al realizado sobre el lente Biomedics (Hidrogel convencional) se ha efectuado disponiendo sobre la córnea una lente del tipo hidrogel de silicona (Si-Hy). Esta lente a diferencia de los hidrogeles convencionales presenta una elevada transmisibilidad (Figura 6). Al igual que ocurría con el lente *Biomedics*, el ajuste teórico sigue un comportamiento consistente con los datos experimentales, con un consumo máximo de oxígeno de $2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ de } O_2 / \text{cm}^3 \text{ de tejido/s}$. Es decir, cuatro veces mayor que el observado con la lente hidrogel de Biomedics. Lo cual implica una modificación en el modelo metabólico aeróbico.

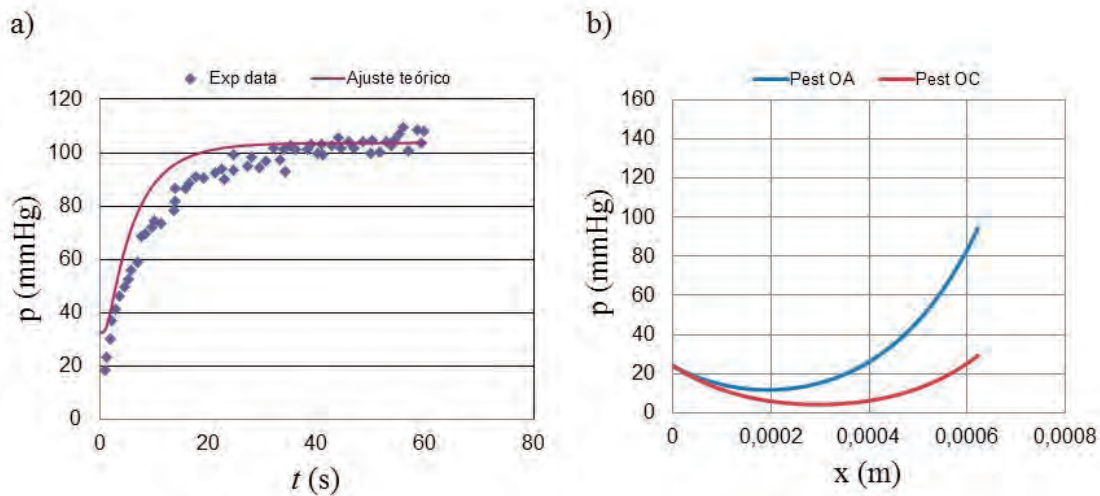


Figure 6. a) Estado transitorio de la medida de la tensión de oxígeno en la interface córnea-lente mediante la técnica de fluorescencia "Dye" realizada por Bonanno (Bonanno *et al.*, 2002 y Bonanno *et al.*, 2009). b) Perfil de la presión parcial de oxígeno en cada punto de la córnea. Ambos estudios se han realizado para el sistema: Córnea-lagrima-lente PureVision.

Fuente: Bonanno *et al.*, 2002 y Bonanno *et al.*, 2009

Los parámetros de la lente PureVision son espesor de la parte central del lente, $L=90 \mu\text{m}$, y permeabilidad al oxígeno, $P=112 \text{ b}$. Nótese que tanto en la figura 5a como en la 6a el perfil de presiones alcanza un mínimo cuando el flujo de oxígeno es nulo entre el endotelio y el epitelio de acuerdo con la primera ley de Fick (Sweeney, 1992; Sweeney, 2003).

En la simulación del consumo de oxígeno para once lentes de contacto presentada en la referencia de Compañ *et al.* (2017) se establece que a medida que la presión parcial de oxígeno disminuye en la entrada de la córnea, el valor de la razón de consumo de oxígeno, (ver ecuación 8), aumenta con la acidez y disminuye con el aumento de la concentración de la glucosa (Holden *et al.*, 1985), véase la Figura 7.

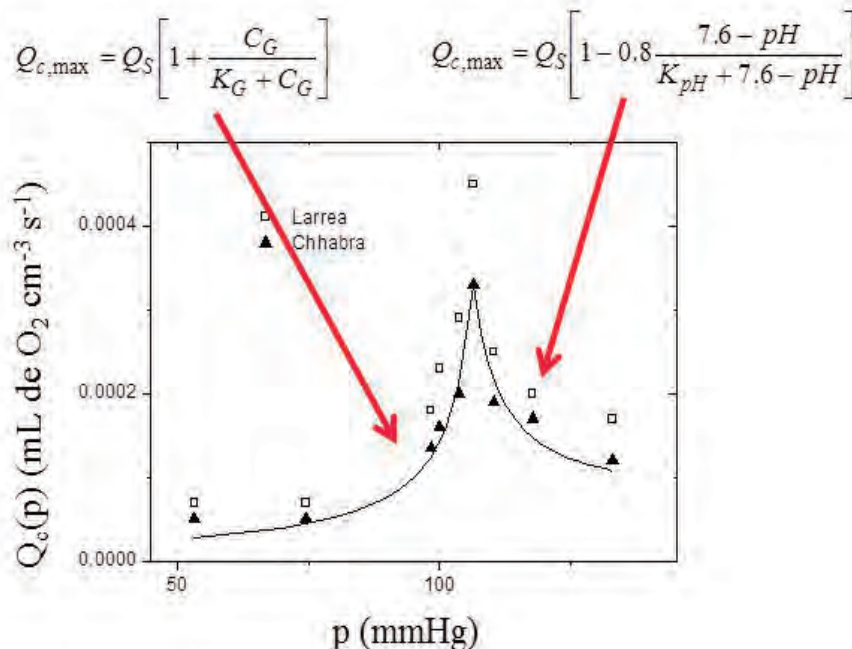


Figura 7. Valores de la tasa de consumo de oxígeno, en función de su presión parcial a la entrada de la córnea.
Fuente: Compañ *et al.*, 2017

Ha sido previamente reportado por Harvit y Bonanno (1998; 1999) que el consumo de oxígeno se incrementa debido a la acidosis producida por el desbalance en la producción de ATP, lo que ocurre cuando baja la presión parcial de oxígeno y aumenta la proporción de la contribución anaeróbica. La razón máxima de consumo de oxígeno se incrementa por las exigencias del metabolismo cuando hay una disminución en la presión parcial de oxígeno (ver Figura 7). En efecto, la simulación reportada (Compañ *et al.*, 2017), presenta un consumo de oxígeno que incrementa con la presión parcial, por debajo de 140 mmHg disminuye. En consecuencia, cuando las células del estroma no reciben suficiente oxígeno (Lin, Graham, Polse, McNamara y Tieu, 2000) para realizar el metabolismo aeróbico (insuficiente producción de ATP por este medio) se incrementa el consumo de glucosa por glicólisis, y se produce un aumento en la acidez (por ácido láctico). La respuesta es un flujo electro-osmótico, que se origina en el humor acuoso e inicia en el endotelio y termina en el estroma para compensar el incremento del pH. Esto causa inflamación de la córnea (Sarver, Baggett, Harris, y Louie, 1981), conocido como edema corneal (Mandell y Farrell, 1980), y se produce por un aumento en la acidez por la formación de ácido láctico.

La Figura 7 muestra que la variación del consumo de oxígeno es función de la tensión en los dos casos: el modelo metabólico con los parámetros de Chhabra (2009a) y de Larrea y Büchler (2009). Una observación detallada de la figura muestra una aparente discontinuidad inherente a ambos modelos debida a que el consumo de oxígeno se incrementa con la acidosis y decrece con la transición anaeróbica (Harvitt y Bonanno, 1999). Para incluir estos efectos (acidosis y falta de oxígeno) en el modelo de distribución de oxígeno, este debe ser modificado con base en el comportamiento real de la córnea.

Para un consumo entre 105 y 135 mmHg de presión de oxígeno se considera en la ecuación 9 (Compañ *et al.*, 2017).

$$Q_{c,\max} = Q_S \left[1 - 0.8 \frac{7.6 - pH}{K_{pH} + 7.6 - pH} \right] \quad (9)$$

Siendo Q_S el consumo en la discontinuidad donde $p_c = p_s$, y siendo pH y K_{pH} dos parámetros que caracterizan la acidosis. El signo menos en la ec. (9) refleja que el consumo de oxígeno disminuye.

Por otro lado, si se considera el intervalo de presiones por debajo de la presión máxima p_s (valores de p_s entre 50 y 105 mmHg), es posible analizar esta variación como consecuencia del cambio en la concentración de la glucosa. Esta variación puede describirse mediante la ecuación 10:

$$Q_{c,\max} = Q_S \left[1 + \frac{C_G}{K_G + C_G} \right] \quad (10)$$

Siendo C_G la concentración de glucosa y K_G la constante del modelo de reacción, (Leung *et al.*, 2011).

Por todo lo anteriormente descrito, la función no lineal de la presión genera una discontinuidad asociada a otras reacciones metabólicas que se producen en la córnea como consecuencia del ciclo de Krebs como también por otras reacciones que se dan en la córnea cuando una falta de oxígeno se encuentra presente como: hinchamiento corneal, acidosis, hiperemia limbal, neovascularización, keratitis, falta de transparencia, (Sweeney, 2003; Fonn *et al.*, 2005; Brennan, 2005a).

Por otro lado, Bonanno y colaboradores (Bonanno *et al.*, 2002; Bonanno *et al.*, 2009; Giasson y Bonanno 1994), observaron que lentes de contacto de hidrogel dispuestas sobre una córnea pueden inducir a acidosis. Harvitty Bonanno (1998) concluyeron que una acidosis incrementa 1,8 veces el consumo de oxígeno en la córnea, respecto de un pH normal. El incremento en la demanda de energía, para estos procesos provoca un incremento del consumo de oxígeno, lo cual genera moléculas adicionales de ATP por medio de la vía oxidada de la fosforilación. El máximo punto presente en la Figura 7, se explica en términos bioquímicos. El comportamiento a bajas presiones en la Figura 7, podría explicarse siguiendo el trabajo de Frahm y colaboradores (Frahm, 2003), donde se observa un decaimiento del consumo de oxígeno, debido a que la concentración de glucosa disminuye a causa de la respiración. En las ecuaciones 9 y 10 se incluye un factor que describe la transición en función de la presión parcial de oxígeno.

Sistemas moleculares detectores de oxígeno en la córnea

Las porfirinas, Figura 8, presentan un núcleo básico: macrociclo de cuatro anillos pirrólicos unidos por cuatro puentes metino. La existencia de dobles enlaces alternados en los 16 átomos de carbono internos del anillo tetrapirrólico estabilizan una molécula plana, resonante y altamente resistente a modificaciones químicas. Los cuatro anillos pirrólicos se denominan A, B, C y D, y los puentes metilo son σ , α , β y γ . En esta estructura rígida planar se encuentran ocho cadenas laterales unidas en las posiciones 1 a 8, las cuales determinan las características físicas de las porfirinas, Figura 8.

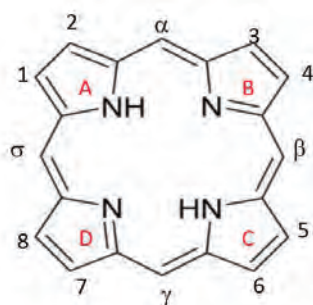


Figura 8. Anillo de porfirina
Fuente: Los autores.

Las porfirinas se combinan fácilmente con metales de transición formando anillos tipo quelato, los cuales forman parte de la estructura de compuestos de gran importancia biológica, por ejemplo: Hemoglobina y mioglobina (Smith, Raven, y Chernova, 2011), que contienen hierro en estado de oxidación 2^+ y la Clorofila que posee el ión magnesio 2^+ en su estructura, Figura 9.

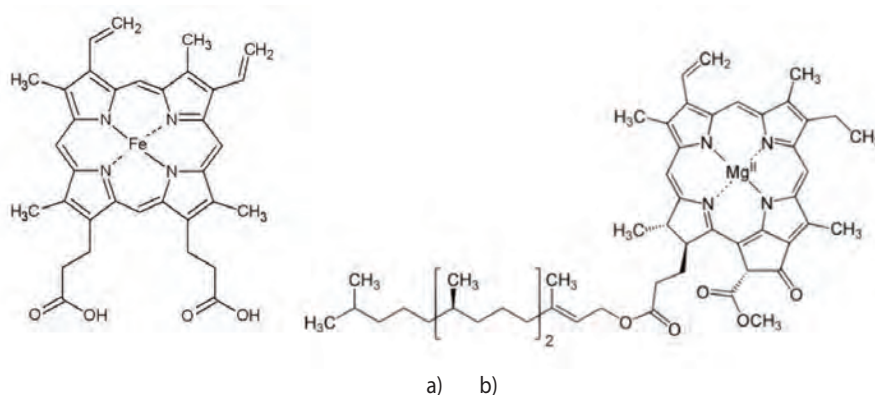


Figura 9. Estructura de sistemas con porfirina: a). hemoglobina, y b). clorofila
Fuente: Los autores.

En la biosíntesis de las porfirinas interviene la concentración intracelular de ATP, hay un efecto significativo en la síntesis de tetrapirroles (Rouault y Tong, 2005); para organismos con porfiria inducida por ciertos agentes porfirinogénicos, los niveles de ATP se observan disminuidos (Briggs y Christie, 2002).

A nivel electrónico las moléculas biológicas tienden a absorber energía en las regiones UV- Vis. Los sistemas moleculares con dobles enlaces conjugados absorben a longitudes de onda en la región del visible, como consecuencia del efecto de resonancia electrónica (Awschalom y Flatté, 2007). La estructura tetrapirrólica de las porfirinas presenta espectros electrónicos en la región del espectro visible. Se observan generalmente una banda Soret intensa cercana a los 400 nm y cuatro picos de absorción adicionales de menor intensidad, entre 500 y 650 nm para las porfirinas no queladas con metales (Kan, Li, Yang y Hou 2008). Una vez se lleva a cabo el proceso de excitación electrónica, las moléculas pueden presentar dos estados: singlete, con vida media corta y capacidad de relajarse a estados más estables y un estado triplete con vida media mucho más larga (Chen *et al.*, 2010). Los estados excitados tienden a pasar a configuraciones basales estables disipando la energía absorbida, ya sea por emisión de luz observando efectos fluorescentes, calor, o transfiriendo la energía a otra molécula.

Las porfirinas actúan como fotosensibilizadores eficientes en sistemas biológicos. Esta interacción se debe a que estructuralmente los aminoácidos conformados por grupos tioles apaciguan el estado triplete de estos sistemas insaturados. Se han reportado efectos importantes en la degradación fotoquímica de lentes de contacto como consecuencia de acoplamiento fotodinámico. Roberts (1984), observó la fotopolimerización marcada y destrucción de histidina en la proteína de un lente fotolizada en presencia de diferentes sustituciones del anillo porfirínico. Esto sugiere, que componentes tipo porfirina permiten *in situ* posibles daños fotooxidativos. Es el caso de Mesotetra (p-sulfonatofenil) porfina (TPPS), la cual se une a las proteínas del lente. Esta característica aumenta el tiempo de residencia del sensibilizador en el lente y, por lo tanto, aumenta la probabilidad de inducir un daño fotooxidativo al tejido *in vivo*. La unión de TPPS disminuye la fluorescencia de las proteínas del lente, provoca un desplazamiento en el espectro de absorción – fluorescencia del estado fundamental y un aumento en la vida del estado de triplete de TPPS (Chen *et al.*, 2010; Zhang, Wu, Guo y Zeng, 2010).

En presencia de oxígeno el anillo de porfirina desencadena procesos fotosensibilizadores de oxígeno singlete. La luz es absorbida por las porfirinas que al activarse reaccionan con el oxígeno, producen especies reactivas de oxígeno. Las sustituciones periféricas de porfirinas reflejan cambios en el rendimiento cuántico, tiempo de vida de los estados singlete y triplete, y efecto en la producción de oxígeno singlete molecular, Figura 10 (Drain *et al.*, 2002). La reactividad del oxígeno molecular y de las distintas especies originadas por reducción son esenciales en los sistemas biológicos. La inercia del oxígeno molecular frente a sustratos orgánicos es consecuencia de su estado triplete en su configuración electrónica más estable.

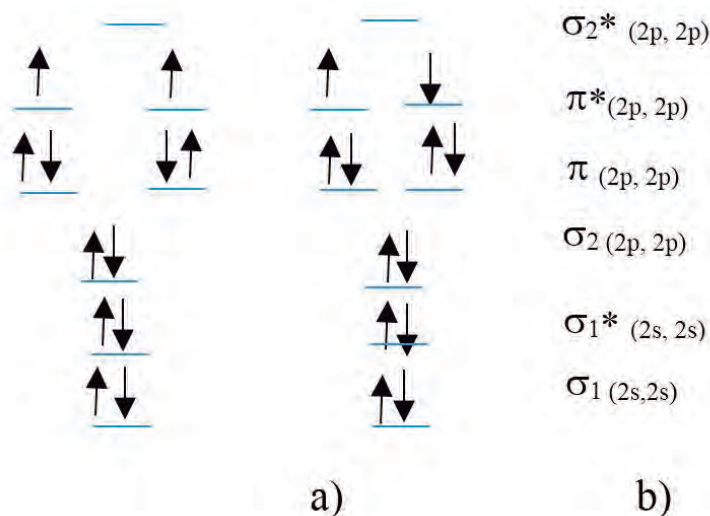


Figura 10. Estados electrónicos basales de la molécula de oxígeno: a) Triplete, b). Singlete.
Fuente: Los Autores.

Este efecto es importante en la hipoxia corneal, extendiendo una relación entre la cantidad de oxígeno corneal y la tinción de la sangre de la misma. Esto representa la deposición de hemoglobina y sus productos de descomposición. Evidencias patológicas de estas córneas han revelado típicamente células endoteliales degeneradas y queratocitos. Estos cambios degenerativos se han atribuido típicamente a la toxicidad de los desechos eritrocitarios. Sin embargo, otro mecanismo posible para esta lesión es la fotosensibilidad inducida por la porfirina. El examen de secciones congeladas de una córnea humana con sangre ha demostrado fluorescencia en todas las capas de la córnea, similar a la observada con el derivado de hematoporfirina. La producción de especies de oxígeno citotóxicas dentro de la córnea manchada de sangre expuesta a la luz puede contribuir a la degeneración endotelial y de queratocitos. La limitación de la exposición a la luz de las córneas con sangre podría reducir teóricamente la toxicidad inducida por la luz y la porfirina.

El transporte de oxígeno en la córnea conlleva a efectos significativos en su funcionalidad y estructura. Se ha observado que durante el proceso de desgaste de los lentes de contacto se altera el consumo de O_2 de la córnea, lo cual tiene implicaciones en el transporte iónico (Purrello, Monsu'Scolaro, Bellacchio, Gurrieri, y Romeo, 1998). Este transporte involucra la movilidad de iones como los protones H^+ . Existe un efecto significativo del pH en el proceso de desgaste. Cuando el pH cambia de 7,5 a 6,7-7,3, el consumo de O_2 aumenta en un factor de $1,80 \pm 0,11$. Este aumento es secundario a la activación de los mecanismos reguladores del pH, incluyendo el intercambio de Na^+/H^+ , que luego estimula la actividad $Na^+/K^+ - ATPasa$.

Conclusiones

La termodinámica y la cinética química han sido los dos pilares en que se sustenta la descripción físico-química de la respiración aeróbica y anaeróbica de los procesos fisiológicos. El oxígeno como vía en la producción de ATP se origina en los heterótrofos, consiguiéndose una mayor eficiencia en el metabolismo de las células. Se ha señalado en este artículo de revisión el tipo de reacciones químicas que en la glicólisis anaeróbica y la oxidativa sustentan la fisiología de los órganos y tejidos de los animales. Especialmente se ha mencionado, la utilización del ATP en las paredes de las células para establecer un intercambio intra- y extra-celular del transporte activo, como lo es la bomba de sodio-potasio y el mecanismo de la motilidad del músculo esquelético. Así mismo, se ha destacado la oxigenación de la córnea, donde se da una transición aeróbica-anaeróbica cuando la presión parcial de oxígeno es de aproximadamente 100 mmHg en la interface córnea-lágrima. En efecto, desde el análisis de los valores experimentales mostrados en la Figura 7, obtenidos mediante el modelo metabólico existen dos procesos que no ocurren simultáneamente. Esto es debido a que cuando la presión de oxígeno

disminuye (entre 130 y 105 mmHg), el consumo de oxígeno en la córnea se incrementa con la acidosis, lo que conlleva a una transición anaeróbica con una disminución del consumo de oxígeno. Cuando la presión parcial de oxígeno en la interface córnea-lágrima se encuentra en el intervalo entre 30 y 105 mmHg, aproximadamente, el consumo de oxígeno es dependiente de la concentración de glucosa. Una singularidad se observa como dependencia del consumo de oxígeno con respecto a la tensión en la córnea. A bajas y moderadas presiones, otros fenómenos diferentes de los ya mencionados pueden ocurrir, tales como: hinchamiento corneal, acidosis, pérdida de transparencia, keratitis, neovascularización y limbal hiperemia, entre otros, que pueden ser descritos por una función no-lineal con la presión. A nivel molecular el proceso de desgaste de los lentes de contacto altera el consumo de O₂ de la córnea, lo cual tiene implicaciones en el transporte iónico. Este transporte involucra la movilidad de iones como los protones, lo cual tiene un efecto significativo del pH en el proceso de desgaste.

Agradecimientos

Autores agradecen al proyecto PAPIIT-UNAM número IG 100618 e IN-114818. CC. Agradece al Grupo de Investigación en Desarrollo de Materiales y Productos GIDEMP del Astin-SENA. YPAT. Agradece al Grupo de Investigación en Química de Coordinación y Organometálica de la UTP, proyecto 9-17-3.

Referencias

- Alvord, L. A., Hall, W. J., Keyes, L. D., Morgan, C. F., y Winterton, L. C. (2007). Corneal oxygen distribution with contact lens wear. *Cornea*, 26(6), 654-664. doi: <https://doi.org/10.1097/ICO.0b013e31804f5a22>
- Awschalom, D. D., y Flatté, M. E. (2007). Challenges for semiconductor spintronics. *Nature Physics*, 3(3), 153-159. doi: <https://doi.org/10.1038/nphys551>
- Baum, J. P., Maurice, D. M., y McCarey, B. E. (1984). The active and passive transport of water across the corneal endothelium. *Experimental Eye Research*, 39(3), 335-342. doi: [https://doi.org/10.1016/0014-4835\(84\)90021-6](https://doi.org/10.1016/0014-4835(84)90021-6)
- Bennett, H. S. (1981). Muscle contraction and enzymatic action: Challenges to quantum chemistry. *International Journal of Quantum Chemistry*, 20(S8), 317-329. doi: <https://doi.org/10.1002/qua.560200729>
- Bonanno, J. A., Clark, C., Pruitt, J., y Alvord, L. (2009). Tear oxygen under hydrogel and silicone hydrogel contact lenses in humans. *Optometry and vision science: official publication of the American Academy of Optometry*, 86(8), E936.
- Bonanno, J. A., Stickel, T., Nguyen, T., Biehl, T., Carter, D., Benjamin, W. J., y Soni, P. S. (2002). Estimation of human corneal oxygen consumption by noninvasive measurement of tear oxygen tension while wearing hydrogel lenses. *Investigative ophthalmology & visual science*, 43(2), 371-376.
- Brennan, N. A. (2005). Beyond flux: total corneal oxygen consumption as an index of corneal oxygenation during contact lens wear. *Optometry & Vision Science*, 82(6), 467-472. doi: <https://doi.org/10.1097/01.opx.0000168560.10861.ae>
- Brennan, N. A. (2005a). Corneal oxygenation during contact lens wear: comparison of diffusion and EOP-based flux models. *Clinical and Experimental Optometry*, 88(2), 103-108. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1444-0938.2005.tb06675.x>
- Briggs, W. R., y Christie, J. M. (2002). Phototropins 1 and 2: versatile plant blue-light receptors. *Trends in plant science*, 7(5), 204-210. doi: [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(02\)02245-8](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(02)02245-8)

- Cavagna, G. A., Heglund, N. C., y Taylor, C. R. (1977). Mechanical work in terrestrial locomotion: two basic mechanisms for minimizing energy expenditure. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 233(5), R243-R261. doi: <https://doi.org/10.1152/ajpregu.1977.233.5.R243>
- Chen, W., Li, Y., Yu, G., Li, C. Z., Zhang, S. B., Zhou, Z., y Chen, Z. (2010). Hydrogenation: a simple approach to realize semiconductor– half-metal– metal transition in boron nitride nanoribbons. *Journal of the American Chemical Society*, 132(5), 1699-1705. doi: <https://doi.org/10.1021/ja908475v>
- Chhabra, M., Prausnitz, J. M., y Radke, C. J. (2009). Modeling corneal metabolism and oxygen transport during contact lens wear. *Optometry & Vision Science*, 86(5), 454-466. doi: <https://doi.org/10.1097/OPX.0b013e31819f9e70>
- Chhabra, M., Prausnitz, J. M., y Radke, C. J. (2009a). Diffusion and Monod kinetics to determine in vivo human corneal oxygen-consumption rate during soft contact-lens wear. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 90(1), 202-209. doi: <https://doi.org/10.1002/jbm.b.31274>
- Compañ, V., Aguilera-Arzo, M., Del Castillo, L. F., Hernández, S. I., y Gonzalez-Meijome, J. M. (2017). Analysis of the application of the generalized monod kinetics model to describe the human corneal oxygen-consumption rate during soft contact lens wear. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 105(8), 2269-2281.
- Compañ, V., Andrio, A., Lopez-Aleman, A., Riande, E., y Refojo, M. F. (2002). Oxygen permeability of hydrogel contact lenses with organosilicon moieties. *Biomaterials*, 23(13), 2767-2772. doi: [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(02\)00012-1](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(02)00012-1)
- Compañ, V., Oliveira, C., Aguilera-Arzo, M., Mollá, S., Peixoto-de-Matos, S. C., y González-Méijome, J. M. (2014). Oxygen Diffusion and Edema With Modern Scleral Rigid Gas Permeable Contact Lenses Oxygen Flux Behind Scleral RGP Lenses. *Investigative ophthalmology & visual science*, 55(10), 6421-6429. doi: <https://doi.org/10.1167/iovs.14-14038>
- Del Castillo, L. F., da Silva, A. R. F., Hernández, S. I., Aguilera, M., Andrio, A., Mollá, S., Compañ, V. (2015). Diffusion and Monod kinetics model to determine in vivo human corneal oxygen-consumption rate during soft contact lens wear. *Journal of optometry*, 8(1), 12-18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optom.2014.06.002>
- Drain, C. M., Batteas, J. D., Flynn, G. W., Milic, T., Chi, N., Yablon, D. G., y Sommers, H. (2002). Designing supramolecularporphyrin arrays that self-organize into nanoscale optical and magnetic materials. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(suppl 2), 6498-6502. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.012521899>
- Fonn, D., Sweeney, D., Holden, B. A., y Cavanagh, D. (2005). Corneal oxygen deficiency. *Eye & contact lens*, 31(1), 23-27. doi: <https://doi.org/10.1097/01.ICL.0000151949.30730.9D>
- Giasson, C., y Bonanno, J. A. (1994). Facilitated transport of lactate by rabbit corneal endothelium. *Experimental eye research*, 59(1), 73-81. doi: <https://doi.org/10.1006/exer.1994.1082>
- Graham, A. D., Fusaro, R. E., Polse, K. A., Lin, M. C., y Giasson, C. J. (2001). Predicting extended wear complications from overnight corneal swelling. *Investigative ophthalmology & visual science*, 42(13), 3150-3157.
- Guyer, J. E., Wheeler, D., y Warren, J. A. (2009). FiPy: partial differential equations with python. *Computing in Science & Engineering*, 11(3). doi: <https://doi.org/10.1109/MCSE.2009.52>

- Harvitt, D. M., y Bonanno, J. A. (1998). pH dependence of corneal oxygen consumption. *Investigative ophthalmology & visual science*, 39(13), 2778-2781.
- Harvitt, D. M., y Bonanno, J. A. (1999). Re-evaluation of the oxygen diffusion model for predicting minimum contact lens Dk/t values needed to avoid corneal anoxia. *Optometry & Vision Science*, 76(10), 712-719. doi: <https://doi.org/10.1097/00006324-199910000-00023>
- Hill, R. M., y Fatt, I. (1964). Oxygen measurements under a contact lens. *Optometry & Vision Science*, 41(6), 382-387. doi: <https://doi.org/10.1097/00006324-196406000-00004>
- Holden, B. A., Sweeney, D. F., Vannas, A., Nilsson, K. T., y Efron, N. (1985). Effects of long-term extended contact lens wear on the human cornea. *Investigative ophthalmology & visual science*, 26(11), 1489-1501.
- Huxley, A. F. y Simmons R. M. S. (1971), Propose mechanism of force generation in striated muscle. *Nature*, 233(5321), 533-538. doi: <https://doi.org/10.1038/233533a0>
- Kan, E. J., Li, Z., Yang, J., y Hou, J. G. (2008). Half-metallicity in edge-modified zigzag graphenenanoribbons. *Journal of the American Chemical Society*, 130(13), 4224-4225. doi: <https://doi.org/10.1021/ja710407t>
- Kushmerick, M., y Davies, R. E. (1969). The chemical energetics of muscle contraction. II. The chemistry, efficiency and power of maximally working sartorius muscles. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 174(1036), 315-347. doi: <https://doi.org/10.1098/rspb.1969.0096>
- Larrea, X., y Büchler, P. (2009). A transient diffusion model of the cornea for the assessment of oxygen diffusivity and consumption. *Investigative ophthalmology & visual science*, 50(3), 1076-1080. doi: <https://doi.org/10.1167/iovs.08-2479>
- Leach, R. M., y Treacher, D. F. (1998). ABC of oxygen: Oxygen transport-2. Tissue hypoxia. *BMJ: British Medical Journal*, 317(7169), 1370. doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.317.7169.1370>
- Lee, K. L. Y., Nguyen, D. P. A., Edrington, T. B., y Weissman, B. A. (2015). Calculated in situ tear oxygen tension under hybrid contact lenses. *Eye & contact lens*, 41(2), 111-116. doi: <https://doi.org/10.1097/ICL.0000000000000075>
- Leung B. K., Bonanno J. A., y Radke C. J. (2011), Oxygen-deficient metabolism and corneal edema. *Progress in Retinal and Eye Research*, 30, 471-492. doi: <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2011.07.001>
- Lin, M. C., Graham, A. D., Polse, K. A., McNamara, N. A., y Tieu, T. G. (2000). The effects of one-hour wear of high-Dk soft contact lenses on corneal pH and epithelial permeability. *The CLAO journal: official publication of the Contact Lens Association of Ophthalmologists, Inc*, 26(3), 130-133.
- Lodish, H., Berk, A., Zipursky, S. L., Matsudaira, P., Baltimore, D., y Darnell, J. (1995). *Molecular cell biology* (Vol. 3). New York: Scientific American Books.
- Mandell, R. B., y Farrell, R. (1980). Corneal swelling at low atmospheric oxygen pressures. *Investigative ophthalmology & visual science*, 19(6), 697-702.
- Morel, J. E. (2015). *Molecular and Physiological Mechanisms of Muscle Contraction*. CRC Press. doi: <https://doi.org/10.1201/b19067>
- Muñiz, J., Marin, J. L., Yeomans, L., Acuña, H., Del Castillo, L. F., Cruz, S. A., Trujillo, X. y Huerta, M. (1996). Electrostatic forces as a possible mechanism underlying skeletal muscle contraction. *Gen PhysiolBiophys*, 15, 141-449.

- Nicholls, D. G., Ferguson S. J. (2013). *Bioenergetics* 4, Academic-Press, Amsterdam 4 the edition.
- Nicholls, J. J., y King-Smith, P. E. (2003). Thickness of the pre-and post-contact lens tear film measured in vivo by interferometry. *Investigative ophthalmology & visual science*, 44(1), 68-77. doi: <https://doi.org/10.1167/iovs.02-0377>
- Papas, E. B. (2003). The role of hypoxia in the limbal vascular response to soft contact lens wear. *Eye & contact lens*, 29(1), S72-S74. doi: <https://doi.org/10.1097/00140068-200301001-00020>
- Pérez, J. G., Méijome, J. M. G., Jalbert, I., Sweeney, D. F., y Erickson, P. (2003). Corneal epithelial thinning profile induced by long-term wear of hydrogel lenses. *Cornea*, 22(4), 304-307. doi: <https://doi.org/10.1097/00003226-200305000-00005>
- Polse, K. A., y Mandell, R. B. (1970). Critical oxygen tension at the corneal surface. *Archives of ophthalmology*, 84(4), 505-508. doi: <https://doi.org/10.1001/archopht.1970.00990040507021>
- Purrello, R., Monsu'Scolaro, L., Bellacchio, E., Gurrieri, S., y Romeo, A. (1998). Chiral H-and J-type aggregates of meso-tetrakis (4-sulfonatophenyl) porphine on -helical polyglutamic acid induced by cationic porphyrins. *Inorganic chemistry*, 37(14), 3647-3648. doi: <https://doi.org/10.1021/ic971432m>
- Rayment, I., Holden, H. M., Whittaker, M., Yohn, C. B., Lorenz, M., Holmes, K. C., y Milligan, R. A. (1993). Structure of the actin-myosin complex and its implications for muscle contraction. *Science*, 261(5117), 58-65. doi: <https://doi.org/10.1126/science.8316858>
- Roberts, J. E. (1984). The photodynamic effect of chlorpromazine, promazine, and hematoporphyrin on lens protein. *Investigative ophthalmology & visual science*, 25(6), 746-750.
- Rouault, T. A., y Tong, W. H. (2005). Iron-sulphur cluster biogenesis and mitochondrial iron homeostasis. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 6(4), 345-351. doi: <https://doi.org/10.1038/nrm1620>
- Sarver, M. D., Baggett, D. A., Harris, M. G., y Louie, K. (1981). Corneal edema with hydrogel lenses and eye closure: effect of oxygen transmissibility. *Optometry & Vision Science*, 58(5), 386-392. doi: <https://doi.org/10.1097/00006324-198105000-00007>
- Smelser, G. K., y Ozanics, V. (1952). Importance of atmospheric oxygen for maintenance of the optical properties of the human cornea. *Science*, 115, 140. doi: <https://doi.org/10.1126/science.115.2980.140>
- Smith, A. G., Raven, E. L., y Chernova, T. (2011). The regulatory role of heme in neurons. *Metallomics*, 3(10), 955-962. doi: <https://doi.org/10.1039/c1mt00085c>
- Sweeney, D. F. (1992). Corneal exhaustion syndrome with long-term wear of contact lenses. *Optometry & Vision Science*, 69(8), 601-608. doi: <https://doi.org/10.1097/00006324-199208000-00002>
- Sweeney, D. F. (2003). Clinical signs of hypoxia with high-Dk soft lens extended wear: is the cornea convinced?. *Eye & contact lens*, 29(1), S22-S25. doi: <https://doi.org/10.1097/00140068-200301001-00007>
- Takahashi, G. H., Fatt, I., y Goldstick, T. K. (1966). Oxygen consumption rate of tissue measured by a micropolarographic method. *The Journal of general physiology*, 50(2), 317-335. doi: <https://doi.org/10.1085/jgp.50.2.317>
- Takatori, S. C., de la Jara, P. L., Holden, B., Ehrmann, K., Ho, A., y Radke, C. J. (2012). In Vivo Oxygen Uptake into the Human Cornea In Vivo Oxygen Uptake into the Human Cornea. *Investigative ophthalmology &*

visual science, 53(10), 6331-6337. doi: <https://doi.org/10.1167/iovs.12-10059>

Wang, J., Fonn, D., y Simpson, T. L. (2003). Topographical thickness of the epithelium and total cornea after hydrogel and PMMA contact lens wear with eye closure. *Investigative ophthalmology & visual science*, 44(3), 1070-1074. doi: <https://doi.org/10.1167/iovs.02-0343>

Weissman, B. A. (1984). Oxygen consumption of whole human corneas. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, 61(4), 291-292. doi: <https://doi.org/10.1097/00006324-198404000-00012>

Weissman, B. A. (1986). Calculating areal average thickness of rigid gas-permeable contact lenses. *Optometry and Vision Science*, 63(11), 922-926. doi: <https://doi.org/10.1097/00006324-198611000-00010>

Zhang, Z., Wu, X., Guo, W., y Zeng, X. C. (2010). Carrier-tunable magnetic ordering in vanadium– naphthalene sandwich nanowires. *Journal of the American Chemical Society*, 132(30), 10215-10217. doi: <https://doi.org/10.1021/ja1029057>

Concepciones sobre el aprendizaje y su relación con las prácticas pedagógicas

Conceptions about learning and their relation with the pedagogical practices

María Rocio Malagón Patiño¹

¹Colombiana. Estudiante Doctorado Interinstitucional en Educación. Universidad Francisco José de Caldas, Colombia. e-mail: malagon@sena.edu.co

Recibido: 04-03-2018 Aceptado: 10-05-2018

Resumen

Las prácticas pedagógicas vienen siendo objeto de múltiples estudios, y a veces fuertes críticas y presiones, dada su relación con los aprendizajes alcanzados por los estudiantes, los procesos de desarrollo profesional de los profesores, e incluso, por su papel en la implementación de nuevas políticas curriculares, entre otras incidencias. Este artículo, como un aporte al estudio sobre las prácticas pedagógicas, expone los argumentos de algunas perspectivas teóricas para explicar el aprendizaje, con fuerte o débil relación con la escuela y el aula de clase en particular. Para conseguirlo, se trazará un mapa entre cuatro perspectivas: como transmisión de saberes, como un procesamiento de la información, como una construcción social, cultural e históricamente situada y desde una perspectiva sociopolítica. Pero, ¿cuál es la importancia de reconocer diferentes perspectivas para explicar el aprendizaje en el estudio de las prácticas pedagógicas? Inicialmente se proponen dos razones: en primer lugar, evitar asumir el aprendizaje como un factor transparente no problemático, esto es, ¿se pueden estudiar las prácticas pedagógicas sin considerar el aprendizaje como fuente de conflictos, toma de decisiones, incluso, de necesidad de cambios o transformaciones en ellas?, cuestión discutible si se asume que el aprendizaje es un aspecto fundamental de cualquier práctica humana. Segundo, evitar asumir que existe una sola verdad frente al aprendizaje y desde ésta interpretar y tomar decisiones en relación con las prácticas pedagógicas. El artículo expone en un principio argumentos desde los discursos escritos de un contexto educativo específico - el Servicio Nacional de Aprendizaje SENA - para, posteriormente, presentar las apuestas desde la literatura de la investigación en el campo. Se pretende, en resumen, generar elementos teóricos contextualizados para la discusión frente al tema, principalmente en los programas de desarrollo profesional de los profesores.

Palabras clave: Aprendizaje; enseñanza; práctica pedagógica; constructivismo; construcción del conocimiento.

Abstract

The pedagogical practices have become the subject of multiple studies, and have received strong pressure and criticism due to the relationship of the knowledge achieved by the students, the professional development process of the teachers, and even, for its role in the implementation of new curricular policies, among other incidents. This article, as a contribution to the study the pedagogical practices, exposes some arguments about the theoretical perspective used to explain learning, with strong or weak relation with the school and the classroom in particular. To achieve it, four perspectives must be outlaid: As transmission of knowledge, as a way to process information and as a situated historical, social and cultural set up and from a sociopolitics perspective. But, what's the importance about recognizing the different perspectives to explain learning in the study of the pedagogical practices? It could be two reasons. In first place, don't think that learning is a

Cómo citar: Malagón Patiño, M. R. (2018). Concepciones sobre el aprendizaje y su relación con las prácticas pedagógicas. *Informador Técnico*, 82(1), 108-119. doi: <http://doi.org/10.23850/22565035.1391>

transparent factor, as in, can you study pedagogical practices without considering learning as a source of conflicts, decision making, even the need for changes or transformations in them? A fundamental problematic aspect about learning of any human practice. Second, don't believe there is only one true way about learning and from this interpretation, take decisions in relation with the pedagogical practices. The article initially exposes arguments from the written discourses of a specific educational context – El Servicio Nacional de Aprendizaje SENA - to subsequently present the proposals from the literature of research in the field. In summary, it is intended to generate contextualized theoretical elements for the discussion of the topic, mainly in the professional development programs of the professors.

Keywords: Learning; teaching; pedagogical practice; constructivism; knowledge construction.

Introducción

Las prácticas pedagógicas se han definido de múltiples formas en la investigación educativa, pero un elemento coincidente en cualquier asunción es que las concepciones y creencias que tienen los profesores sobre cómo los estudiantes aprenden es uno de sus componentes esenciales. Sobre esta base los profesores toman decisiones y gestionan las actividades en el aula, evalúan los aprendizajes alcanzados, determinan las rutas a seguir cuando hay dificultades, entre otros escenarios de incidencia sobre esta concepción.

De hecho, desde diferentes disciplinas científicas se ha abordado el problema del aprendizaje. Los estudios en el marco de estas disciplinas aportan elementos teóricos y metodológicos que incorporados específicamente en el conocimiento que circula en la escuela o en el aula, configuran herramientas para pensar y definir acciones que aportan al logro de los aprendizajes de los estudiantes, e incluso de los mismos profesores.

En este artículo se exponen cuatro perspectivas para acercarse al tema, sin descontar que hay otras diversas vías para hacerlo. Esta forma de organización es un mecanismo analítico que tiene como propósito generar elementos para la reflexión y discusión con profesores y demás interesados en el tema dentro de la comunidad educativa, convirtiéndose a la vez en un pretexto que conduzca a acciones frente a la construcción de saberes pedagógicos al respecto.

El aprendizaje desde la epistemología genética de Piaget

En principio, se asume que la teoría genética de Piaget sobre el aprendizaje, con amplia influencia en las décadas de los años 60's a los 80's, constituye un instrumento teórico para indagar sobre estos procesos en el aula, así como lo son las otras teorías que soportan la estructura de este artículo.

Esta postura del aprendizaje es considerada epistemológica, en tanto, la cuestión está en cómo el sujeto avanza en el conocimiento del mundo, a través de interacciones sobre él, que permiten una construcción progresiva de nociones y formas de pensamiento cada vez más estructuradas. En síntesis, los sustentos teóricos se ubican en ámbitos psicológicos que le apuestan a una relación dual, directa e insoluble entre la acción del sujeto cognoscente (individual, interno) y el objeto de conocimiento (externo). Aquí, los elementos del contexto o de la cultura existen, pero no configuran el aprendizaje; como lo explica Coll:

Si bien es cierto que Piaget insiste una y otra vez en la necesidad de tener en cuenta a los otros y a las instituciones sociales en la explicación del desarrollo, es innegable que los factores sociales no son para él, en ningún caso, mecanismos formadores o estructurantes. (1988, p.5).

Internamente esta postura es coherente. Si bien, al considerar que el mundo sólo es accesible a través de las interacciones de los sujetos con él, entonces no es posible pensar en un mundo independiente y por fuera de los resultados de estas acciones.

Esta postura frente al aprendizaje ha tenido un gran arraigo durante décadas en las instituciones educativas, algunas como parte de su cultura oral y otras por medios documentales. En este segundo caso encontramos varios registros del

Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). Por ejemplo, Barrera y Lora (1976), en un documento de referencia para la formación profesional en esta institución, afirma que:

La esencia del aprender no consiste entonces en repetir mecánicamente textos de libros, ni en escuchar atentamente las instrucciones, sino en la “actividad mental intensiva” a los que los alumnos se dedican en el manejo directo de los datos de la materia”. (p.45).

Explicitando la relación sujeto cognoscente - acciones sobre el mundo (objeto de conocimiento). En otro documento de esta misma institución, Bustos (1986) propone un desarrollo de estrategias didácticas que den cuenta de los factores que provocan el paso de un nivel inferior de conocimiento a uno superior, en alusión a esta epistemología genética; la experiencia física, la experiencia social, el conflicto o desequilibrio entre los nuevos hechos, los esquemas conceptuales previos y los procesos de maduración al interior del sujeto que conoce, son estos factores. Más adelante, en otro documento institucional se encuentra definido que: “El proceso de aprendizaje implica la comprensión, asimilación y aplicación de conocimientos, habilidades, destrezas y actitudes que hacen a la persona competente (...)” (SENA, 1997, p. 32)., explicitando posteriormente que “la asimilación, es el proceso de representación interna del conocimiento en las personas; y la aplicación, es la posibilidad de identificar, plantear y solucionar problemas mediante los saberes asimilados” (p.32), en coherencia con la misma postura que se viene hilando frente al aprendizaje.

Como colofón en este apartado se expone un documento institucional de los últimos años que dictamina:

Las teorías expuestas por Jean Piaget sobre el aprendizaje como un proceso de construcción de conocimiento de carácter interno, activo y personal son las características propias del Constructivismo y se constituyen en el punto de partida en el SENA, con el fin de estructurar la concepción del conocimiento de la Formación Profesional Integral (F.P.I.) (SENA, 2015, p. 19).

Muy al estilo piagetiano, en este texto se infiere la responsabilidad del estudiante en la construcción de su propio conocimiento. Un avance en este punto es el hecho de no considerar la “transmisión” del conocimiento como una posibilidad de la enseñanza, puesto que éste no es algo que alguien construya o posea y se lo pase a otro, el conocimiento es el resultado de la experiencia personal con un estrecho margen de la intervención de “los otros” y de la cultura y sus artefactos en el proceso, es un tipo de “posesión personal”; este último escenario deja una línea reducida para la toma de decisión y la acción del profesor en las prácticas de aula (Tynjala, Mason, y Lonka, 2001, 2001).

En suma, con las citas expuestas se evidencia cómo los discursos institucionales continúan privilegiando las mismas posturas en relación con la enseñanza y el aprendizaje desde hace más de 40 años, independiente que la investigación educativa avance, las políticas pedagógicas se transformen y la misma institución genere cambios internos en sus prácticas pedagógicas. En el siguiente apartado se aborda otra perspectiva frente al aprendizaje que permite avanzar en la conceptualización propuesta en el artículo.

El aprendizaje visto como resultado del procesamiento de la información

Aunque es poco común encontrar literatura desde la perspectiva del *procesamiento de la información* donde se aborde explícitamente el problema del aprendizaje, y menos en el terreno de las prácticas escolares, en algunos casos está asociado con estudios de la memoria (a corto plazo, largo plazo, asociativa, entre otras), por tanto, relacionado con las funciones mentales de los sujetos. Por ejemplo, Pozo (1989) lo describe en relación con operaciones simbólicas (codificar, comparar, almacenar, etc.) que dan cuenta de la inteligencia humana y especialmente, de la capacidad de construir conocimiento.

El *procesamiento de la información*, como una posibilidad de explicar el funcionamiento del razonamiento y la construcción de conocimiento humano, ha sido desarrollado desde la “ciencia cognitiva”. Gardner (1987) afirma: “defino la ciencia cognitiva como un empeño contemporáneo de base empírica por responder a interrogantes epistemológicos de antigua data, en particular los vinculados a la naturaleza del conocimiento, sus elementos componentes, sus fuentes, evolución y difusión” (p.21).

El núcleo de esta ciencia es la relación (analogía/metáfora) entre razonamiento humano y sistemas computacionales artificiales. Aunque no todos los expertos aceptan el modelo de la mente como una computadora, sí hay un amplio número de quienes la defienden o al menos, han aceptado su influencia (Gardner, 1987). En esta dirección, Vasco (1993) explica las dificultades que ha presentado esta metáfora, dado que por ejemplo, privilegia lo individual sobre lo social, lo cognoscitivo frente a lo afectivo y, lo intelectual sobre lo psicomotriz, pero reconoce que “mientras más se refinan los programas que pretenden simular los comportamientos considerados como inteligentes, más claramente se perciben las diferencias entre los computadores así programados y la manera como proceden los niños, los adolescentes y los expertos” (p. 10). Por otro lado, algunos detractores de esta crítica resaltan la relación que se ha mostrado entre la lógica borrosa (informática) y la apreciación estética, o incluso el papel de la cultura en la cognición vista como procesamiento (Vásquez, 1991).

Es así como en las últimas dos décadas la ciencia cognitiva se ha esforzado por distanciarse de la postura clásica que imperó en sus primeros años, postura que privilegió una cognición individual, de modelos y representaciones internas, situándola ahora en un mundo complejo y cambiante, deslocalizada del individuo o lo individual, extendiéndola y distribuyéndola en los componentes del mundo pensado como un sistema (social, por ejemplo), incorporando el cuerpo, el entorno y la situación en este nuevo espacio de la cognición (Bedia y Castillo, 2010).

Por otro lado, si bien no hay un acuerdo explícito sobre cuáles son las ciencias o disciplinas que hacen parte de la ciencia cognitiva, el mismo término “cognición” implica un conocimiento alcanzado mediante el ejercicio de las facultades mentales, por tanto, la psicología tiene un papel natural e indiscutible en esta ciencia. Además, la informática expresada en la analogía fundante entre las funciones cognitivas de las personas (entre ellas las relacionadas con el aprendizaje) y los mecanismos de procesamiento de la información en los artefactos computacionales, reclaman su participación; de hecho, la inteligencia artificial ha conseguido la construcción de artefactos computacionales que se comportan o piensan inteligentemente, bajo el supuesto de dar respuestas comparables a las que darían las personas ante ciertas circunstancias o frente a ciertos problemas, llegando estos artefactos, por ejemplo, al autoaprendizaje corrigiendo sus propios errores o a la creación de piezas similares al arte (trozos de poesía o de música); la cuestión ahora es el papel que cumplen la sensibilidad humana y la cultura en esta comparación con las inteligencias artificiales.

Pero, en la ciencia cognitiva también cumplen un rol importante otras ciencias como la filosofía, la neurología, la antropología y la lingüística (Gardner, 1987; Vásquez, 1991; Vasco, 1993; Fierro, 2011; Ramos, 2014). Con el tiempo se han ido incorporando nuevas áreas formadas por dos o más campos como la neurofisiología o la neurolingüística, en conjunto con ciencias que era impensable ubicarlas inicialmente como la sociología o la economía, y que, al asumir la cognición como un proceso externo al sujeto, les otorga su protagonismo.

Si bien, en la perspectiva anterior se enmarcó el aprendizaje en una relación dual (acción de aprendiz sobre el objeto de aprendizaje), en la ciencia cognitiva éste continúa siendo un proceso interno e individual, centrado ahora en las formas de razonamiento y de creación y comunicación de saberes, con un cuestionamiento actual clave: ¿cómo produce la “inteligencia humana” estos razonamientos, saberes y formas de comunicación? ¿qué de esta producción puede ser lograda, o incluso superada, por un cerebro artificial?; las respuestas a esta cuestión modificarán definitivamente los propósitos de la escuela en las próximas décadas. En el siguiente apartado se revisa la mirada frente al aprendizaje desde una perspectiva deslocalizada de la mente, ya no como transmisión ni como una construcción subjetiva: la perspectiva sociocultural.

El aprendizaje como una construcción social e históricamente situada

Una mirada distinta del aprendizaje está en las teorías socioculturales. La aceptación de que las facultades humanas se desarrollan a través de la participación de los sujetos en prácticas sociales (Lave y Wenger, 1991; Lave, 1996; Rogoff, 1997; Rodríguez y Alemán, 2009; Lave, 2009a; Lave 2009b J., Lave, 2010) o a través de la labor conjunta con otros (Radford 2013, 2017), constituyen premisas claves en esta perspectiva. En este nuevo escenario se cambia la dualidad sujeto-objeto de conocimiento por una trama más compleja de actores, medios o recursos y relaciones.

Para Lave y Packer (2011), el aprendizaje es concebido como una construcción social, esto es, como un aspecto de la participación en prácticas sociales histórica y culturalmente situadas, con la intervención de los sujetos en las experiencias

de una comunidad, de tal manera que logra configurarse como miembro y participar de su producción. Éstos afirman que: “una visión mucho más seria, amplia y profunda del aprendizaje es posible cuando partimos del reconocimiento de que tiene sus raíces en la práctica, y en el ser, más que en el saber” (p. 19). De esta afirmación se puede inferir que, trascendiendo la preocupación por la enseñanza, lo fundamental es el proceso social que tiene lugar en el aula y que permite a los profesores y estudiantes negociar su participación en las prácticas y en la producción de conocimiento.

Lo anterior significa que el aprendizaje es más que participar en las actividades de las comunidades a las que pertenece el estudiante, es la construcción de subjetividades e identidades respecto a esas comunidades. De hecho, en la misma vía Wenger (2001) afirma que la participación trasciende el compromiso con ciertas actividades o personas, teniendo un alcance mayor:

[...] consistente en participar de una manera activa en las *prácticas* de las comunidades sociales y en construir *identidades* en relación con estas comunidades. Por ejemplo, formar parte de una pandilla durante el recreo o formar parte de un equipo de trabajo es al mismo tiempo un tipo de acción y una forma de afiliación. Esta participación no sólo da forma a lo que hacemos, sino que también conforma quiénes somos y cómo interpretamos lo que hacemos. (p. 3).

El aprendizaje así considerado es un aspecto de la dinámica participación de las personas en prácticas cambiantes. Al respecto Rogoff afirma “Durante el aprendizaje los recién llegados a una comunidad de práctica progresan en su destreza y comprensión a través de la participación en actividades culturalmente organizadas” (1997, p. 4), ese *progreso* es el objeto mismo del aprendizaje. Desde esta perspectiva, el aprendizaje es considerado como:

La reconstrucción de la forma en que un sujeto se involucra con el mundo, de tal forma que el sujeto mismo es reconfigurado, y, al mismo tiempo, hay una reconfiguración de la producción y reproducción de objetos, ya sean textos, otras personas, eventos sociales o instituciones. (Lave y Packer, 2011, p. 21).

En este escenario, el aprendizaje no se puede desligar del contexto de las situaciones donde éste se desarrolla. Quiénes integran el colectivo (grupo), dónde y cuándo tiene lugar la práctica, los discursos que comparten sobre el mundo, entre otros aspectos, determinan las relaciones históricas, sociales, culturales e incluso psicológicas que están presentes y dan forma al aprendizaje. Esto es, las situaciones y el aprendizaje se constituyen mutuamente.

Desde otra mirada en la perspectiva socio cultural, Radford (2013) señala que los fines de la educación deben apuntar a que los estudiantes se conviertan en “alguien” dentro de la comunidad, además de “conocer” algo. Para comprender la noción de aprendizaje en el marco de la Teoría de la Objetivación, apuesta teórica de Radford, es necesario precisar tres conceptos claves: saber, actividad y consciencia. Porque incluso, es en esos conceptos donde se entiende la crítica que le hace Radford a la postura del aprendizaje como un aspecto de la “participación” en prácticas sociales que sostienen Lave, Wenger, Rogoff, en la misma línea de esta perspectiva, y que ya fueron citados en este artículo. Esta postura eminentemente social, critica Radford (2017), no abandona completamente la posición piagetiana del aprendizaje como adaptación, sólo que en este caso es una “adaptación a las prácticas sociales”.

Para Radford el saber no es un objeto que pueda ser transferido, ni poseído por alguien, el saber es un “sistema codificado de procesos corpóreos, sensibles y materiales de acción y reflexión constituidos histórica y culturalmente” (2017, p.102). Los denomina corpóreos, sensibles y materiales como una forma de afirmar que no es un asunto cognitivo, mental o interno. El saber así entendido es la síntesis histórica y culturalmente codificada de formas de reflexionar y actuar frente a determinados problemas específicos. Pero, desde esta misma dirección, es a través de la actividad (histórica y culturalmente situada) que los individuos producen saberes. Es decir, los saberes no son un asunto platónico de verdades generales, es el producto de actividades conjuntas de producción cultural.

Para diferenciar el concepto de *actividad*, tal como lo usan otras corrientes teóricas, Radford (2013, 2014, 2017) lo cambia por el término hegeliano de *labor*. Para este investigador, la labor es más que la satisfacción de necesidades básicas, “[...] es una *forma social de acción conjunta* que incluye nociones de expresión del sujeto que labora” (2014, p. 6). En una conferencia en Barranquilla exclamó “La labor no es solamente hacer o producir algo. La labor tiene una dimensión fundacional en la producción de la existencia humana, en la producción de cada uno de nosotros y nuestras vidas” (2013).

Desde la teoría de la objetivación, el saber tiene dos dimensiones: en su forma potencial y en su forma actual. Inicialmente, el saber es la potencia o capacidad para hacer algo. En este estado, el saber existe como producto en la cultura, pero, por ejemplo, en la escuela, todavía no es objeto de pensamiento o interpretación por parte del estudiante. Sólo y a través del desarrollo de actividades conjuntas profesor-estudiantes, es que el saber se vuelve actual, ya no es sólo posibilidad, ahora el estudiante toma *consciencia* de ese saber y trabaja con él. Es en la acción conjunta profesor (a) y estudiantes que se da el espacio para tomar *consciencia* de una manera colectiva de los saberes constituidos históricamente. Ahora, en su estado actual, el saber puede ser objeto de pensamiento e interpretación por parte del estudiante. “La transformación del saber en objeto de consciencia es lo que llamamos aprendizaje”, afirma Radford (2013).

Un producto del nexo entre los conceptos de saber y labor en la Teoría de la Objetivación es la concepción que asume del proceso de enseñanza y aprendizaje. Desde aquí este proceso es una unidad a través de la cual se van a producir saberes (objetivación) y a constituir sujetos (subjektivación). No existen entonces actividades de enseñanza dirigidas por un profesor separadas de las actividades de aprendizaje desarrolladas por unos estudiantes, son una sola actividad donde los sujetos se constituyen de forma mutua (Radford, 2014). Desde esta posición, hablar de prácticas pedagógicas es hablar de un esfuerzo conjunto y de una construcción conjunta de significados no sólo entre estudiantes sino entre estudiantes y profesor, el profesor se hace profesor en la práctica pedagógica y el estudiante se configura como tal en la misma práctica. D’Amore complementa:

Cuando decimos que la acción del docente y del alumno no son “dos acciones” sino que es “la misma acción”, encontramos precisamente este punto de vista; la labor, lo que se produce, la persona que lo produce, los varios agentes, son todos componentes al unísono de una única actividad que, con una sola palabra, podemos llamar la labor. (2015, p. 6).

Así, en contraposición a las posturas cognitivas anteriores, desde este posicionamiento teórico se puede hablar de *un* proceso de enseñanza y aprendizaje, con el desarrollo de actividades conjuntas que posibilitan una permanente transformación de los sujetos y de la producción colectiva de conocimientos. Supera la dualidad: interno – externo.

El aprendizaje en el marco de una perspectiva sociopolítica en el aula

Al considerar, tal como lo hizo Aristóteles hace más de dos mil años, que la política tiene que ver con autoridad, gobierno y poder, se podría afirmar inicialmente que una perspectiva sociopolítica de la educación pone en la mesa de discusión los conflictos producto de las desiguales relaciones de poder en la escuela y en el aula de clase y que terminan no sólo definiendo los aprendizajes alcanzados por los estudiantes, también las subjetividades e identidades de los estudiantes y profesores que se involucran en tales prácticas, como se tratará de argumentar en este apartado.

Específicamente, se deben considerar las relaciones estrechas entre los procesos de enseñanza y aprendizaje con las estructuras sociales, políticas e históricas donde éstos se desarrollan. Parafraseando a Valero (2002), incorporar la imagen del profesor y del estudiante como sujetos políticos, no sólo cognitivos, permite considerar la enseñanza y el aprendizaje como una actividad sociopolítica que se crea y recrea en diversas esferas de acción social que involucran además del contexto del aula, las estructuras sociales, económicas, políticas y culturales donde ésta se inscribe. Para ahondar en esta perspectiva se recomienda leer a Foucault (1982), Gorgorió y Planas (2000), Bernal y Martín (2001), Valero (2012), entre otros.

El tema en cuestión es qué tanto aporta la educación, y las prácticas de aula en particular, a la construcción de espacios que les permita a los estudiantes y profesores actuar e interactuar en contextos de producción colectiva de saberes y subjetividades, pero también de intervención equitativa en diferentes órdenes de la sociedad, desde lo político, lo económico, lo científico, sin diferencias de clase, raza o género.

Tal como se planteó en el apartado anterior, en diversos lugares de la investigación social y educativa se ha trascendido una concepción individualista del aprendizaje, ubicándolo en el terreno de lo social o de lo histórico cultural, pero es de común encuentro que las prácticas pedagógicas sigan girando en torno al individuo y a lo individual con un predominio de un saber disciplinar homogéneo como meta de aprendizaje, con aprendices universales, dejando por fuera la posibilidad de una educación para sociedades más democráticas o inclusivas.

Desde una perspectiva sociopolítica de la educación, Ball y Tayson (2011) plantean la necesidad de preparar a los docentes para que puedan asumir el reto de aportar ambientes de aprendizaje donde se visibilice la realidad vulnerable de los jóvenes en la actualidad y donde se les ofrezcan experiencias de crecimiento para abordar las formas de inequidad, aparentemente insolubles, que deben vivir en su cotidianidad. Lo interesante de esta apuesta está en qué tipo de formación docente es la que se necesita, dado que, dicen los investigadores, ésta no atraviesa sólo por lo pedagógico o lo didáctico, sino que reconoce la necesidad de implicar campos como salud pública, psicología comunitaria, epidemiología social y sociología médica, entre otros; dado una salida más medicalizada que social a esta problemática.

Ball y Tayson (2011), exponen la alta complejidad de las prácticas pedagógicas en clases con jóvenes que, como afirman, viven en “entornos socialmente tóxicos” resultado del racismo, la pobreza, la discriminación de género, entre otras formas de opresión. Un niño o joven que está sometido a múltiples formas de violencia (física o institucional) o a visibles desigualdades (sociales o económicas), no podrá abandonar esa condición cuando cruza las puertas de la escuela o del salón de clase, esa es una situación a la que el profesor debe ser receptivo; visto así, no se puede pensar en aprendizajes universales con estudiantes desde ideales de éxito académico, como tampoco en prácticas con ambientes homogéneos o exentos de conflictos, escenarios que presuponen las perspectivas cognitivas del aprendizaje.

El contexto anterior puede mal ser interpretado como la búsqueda de justificaciones para una enseñanza deficiente o para el fracaso de los estudiantes. Contrario a esto, el reto está en dotar a los profesores de habilidades para que logren ofrecer experiencias en el aula que generen esperanzas en los jóvenes de poder contrarrestar estas dificultades. Lo expresó Freire en su *Pedagogía de la esperanza*:

“Sin un mínimo de esperanza no podemos ni siquiera comenzar el embate, pero sin el embate la esperanza, como necesidad ontológica, se desordena, se tuerce y se convierte en desesperanza que a veces se alarga en trágica desesperación. De ahí que sea necesario educar la esperanza”. (1993, p. 19).

Para Freire (1993) se requiere no sólo que los profesores identifiquen y estudien las condiciones de opresión que viven sus estudiantes, también demanda a la pedagogía para que ofrezca derroteros que permitan escenarios escolares donde desarrollar y evaluar proyectos educativos que respondan a esas condiciones. De igual forma, el reto está no sólo en el diseño de tareas de aprendizaje, también en la conformación de formas de discusión e interacción en el aula que promuevan posibilidades de “rupturas” del *statu quo* por donde se puedan filtrar nuevas formas de construir mundos posibles para estos estudiantes. Como afirman Ball y Tayson:

“Eventually, many students come to perceive a significant gap between their most pressing needs and the things being emphasized in the schooling these educators offer them (test scores, grades, college). When they figure out that the teacher is unwilling or unable to close this gap, their hope that school would be relevant in the context of their everyday lives is deferred”. (2011, p. 317).

El texto sirve de argumento para reiterar que una perspectiva sociopolítica de la educación, como la que se describe en este último apartado, se centra en la necesidad de considerar el entorno cotidiano específico de los estudiantes (racial, social, cultural y de diversidad lingüística, principalmente) en el contexto de aula, trascendiendo posturas homogenizantes – y por tanto excluyentes – frente al aprendizaje y asumiendo a diferencia, que estos entornos son factores constitutivos de los mismos. Esta perspectiva, con especial énfasis en la naturaleza de la formación docente requerida, puede ser completada con lecturas de Freire (1972, 1994), Bartolo y Smyth (2009), Burns y Shadoian-Gersing (2010), García y Valero (2013), García y Romero (2018), entre otros.

Desde una mirada relacionada con lo expuesto, Popkewitz (1994, 2006) cuestiona la posibilidad que tiene la escuela en sí misma para la construcción de sociedades más justas e inclusivas. Se confronta con el esperanzador propósito otorgado a la escuela de formar un niño o joven pensante, atento y reflexivo, pero que a la vez convive con el temor que existe de no conseguirlo, producto de los impedimentos que surgen por la participación de “otros” estudiantes por fuera de las condiciones consideradas como aptas para el aprendizaje y el buen desempeño escolar; esos “otros” son precisamente denominados como “estudiantes en riesgo o desventaja” por provenir de poblaciones en extrema pobreza, de raza negra, discapacidades o de familias disfuncionales. Estas condiciones por sí los excluyen del rótulo tácito de “estudiantes normales”

y por tanto requieren un tratamiento especial, remedial, de “reparación y rescate”, puesto que son diferentes de aquellos que tienen atributos motivacionales o cognitivos “naturales” para lograr el éxito escolar. Al respecto exclama: “La práctica de la enseñanza y el aprendizaje construyen continuum de valores que comparan, dividen y simultáneamente excluyen tanto como incluyen” (Popkewitz, 2006, p. 5).

En este orden de ideas, en el caso colombiano, Valoyes (2017) reclama la escasez de estudios que aborden cómo las situaciones de inequidad por condiciones de género, clase o raza se instalan en las prácticas de aula en el país y menos, para tratar de comprender las razones para el fracaso en el aprendizaje de los estudiantes marginalizados históricamente. Según esta investigadora, los discursos oficiales anticipan el fracaso de los estudiantes pobres otorgándoles un carácter esencialista o “inherente a las identidades sociales de los estudiantes” (p. 4) con lo cual, según ella, se libera al Estado de su responsabilidad frente a este fenómeno. En ese orden de ideas, pero desde las políticas educativas, Dussel denuncia:

“Nos parece todavía más urgente esta revisión, cuando la respuesta que la escuela articula frente a estos excluidos se limita a pensar nuevas estrategias de motivación, nuevos test para detectar y clasificar los comportamientos, o nuevas técnicas de segregación de quienes emergen como conflictivos. La hegemonía de la psicología educacional, en una versión particular que esencializa estos desarrollos, ha despolitizado y deshistorizado dramáticamente la cuestión de la inclusión y la exclusión, planteando que lo único que debemos hacer los educadores es encontrar soluciones técnicas y diseños institucionales [sic] o curriculares actualizados”. (2000, p. 19).

Como cierre, se colige de lo escrito en este apartado que la perspectiva sociopolítica no determina definiciones ni modos para describir el aprendizaje ni las prácticas pedagógicas, tal como lo expresa Valero (2013), esta perspectiva (pensada en la Educación Matemática específicamente) es:

“...un conjunto de investigaciones que toman elementos de teorías antropológicas, sociológicas y filosóficas para abordar problemas definidos en las relaciones entre las distintas prácticas de las matemáticas y el funcionamiento de mecanismos de poder —y por lo tanto de inclusión y exclusión— en la sociedad”. (pp. 7-8)

Definición que puede ser útil no sólo para la investigación en un área de formación particular, también permite comprender la perspectiva en el aparato educativo, social y político en general. Para ampliar más sobre el tema se sugiere revisar a Gentili (2002), García (2015, 2016), Valero (2017), Popkewitz (2010), Valoyes (2015).

Reflexión final

Un escenario como el que demarca el siglo XXI, con innumerables fuentes de información, con desarrollos tecnológicos que impactan las rutinas diarias de cualquier comunidad y que, a su vez, transforman roles personales, sociales y profesionales, debe llevar a las autoridades educativas y profesores a generar propuestas acordes con esta visión. Propender por escenarios de clase ordenados, silenciosos, donde prime el trabajo individual, que prevalezca la voz explicativa del maestro en contraprestación a la acción creadora e imaginativa de los aprendices integrados en tareas conjuntas, es posible que sea discordante con la época.

Un cambio en la línea expuesta lo tiene el SENA. Tal como se mostró en los registros documentales, en la institución parece prevalecer aún el concepto de aprendizaje como un proceso individual e interno, pero la realidad es otra. Desde hace varios años se reconoce en la institución que: (1) las fuentes de información son abundantes, amplias y cambiantes, (2) el trabajo colaborativo es la principal fuente de desarrollo de las facultades humanas (SENA, 1985, Artículo 2), en la dirección que propone Radford sobre *labor* y que se expuso en este artículo, (3) la actividad del aprendiz es el vehículo para el desarrollo de sus competencias y (4) el contexto es fuente estructurante y constitutiva del aprendizaje. Una materialización de esta asunción es el cambio, a nivel casi general, de los puestos individuales para los aprendices por mesas de trabajo colaborativo y ambientes de aprendizaje pluritecnológicos. Es común observar hoy día en la institución, desde la estrategia de formación por proyectos, el trabajo colectivo entre los aprendices y de los aprendices con sus instructores.

Finalmente, dos aspectos por mencionar. El primero está en relación con el propósito del artículo, reiterando que éste se ubica en una mínima coherencia entre las prácticas pedagógicas y la concepción de aprendizaje que subyace, con un contexto de fondo: las realidades sociales y culturales que se viven en y fuera de la escuela. Un profesor podrá valorar positivamente una clase ordenada, con una alta disciplina de los estudiantes, donde se privilegia el silencio y el trabajo individual. Allí está inmersa una valoración del aprendizaje como la expuesta en las dos primeras perspectivas. Pero, para otro profesor será necesario el que haya una amplia dinámica colectiva en el aula, con debates permanentes, con grupos de estudiantes desarrollando actividades distintas entre sí, que incluso tienen autonomía para incidir en la gestión de la clase, etc., como lo demarcan las dos últimas perspectivas. En ambos casos, se espera que el profesor sea consciente de esa concepción sobre el aprendizaje, de sus alcances y limitaciones, como una forma de interpretar los sucesos que se presentan o incluso transformarla cuando sea necesario.

Un segundo aspecto está en las restricciones y condiciones que impone la institución escolar en estas relaciones. Los profesores no son sujetos individuales, son sujetos de una comunidad: la institución educativa, lo que implica que un alto porcentaje de lo que promueve en aula de clase está determinado por la cultura institucional. El margen de decisión y actuación está reducido y, por tanto, al estudiar las prácticas docentes que promueven también hay que estudiar la cultura institucional al respecto.

En conclusión, es un panorama amplio y complejo para comprender las prácticas pedagógicas y su incidencia en los aprendizajes alcanzados o no. Queda por tanto abierta la reflexión sobre esta relación desde los procesos de desarrollo profesional del profesor o desde la investigación en el campo.

Referencias bibliográficas

- Ball, A. F. y Tyson, C. A. (eds.) (2011). *Studying diversity in teacher education*, Washington, D.C.: American Educational Research Association
- Barrera, M., y Lora J. (1976). *Metodología de la Formación: Fundamentos generales*. Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA. Colombia.
- Bartolo, P.A., y Smyth, G. (2009). Teacher education for diversity. In A. Swennen, & M. van der Klink (Eds.), *Becoming a teacher educator* (pp. 117-132). Netherlands: Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8874-2_9
- Bedia, M. G., y Castillo Ossa, L. F. (2010). Hacia una teoría de la mente corporizada: La influencia de los mecanismos sensomotores en el desarrollo de la cognición. *Ánfora*, 17(28).
- Bernal, A. O., y Martín, J. P. (2001). La dialéctica saber/poder en Michel Foucault: un instrumento de reflexión crítica sobre la escuela. *Aula abierta*, (77), 99-110.
- Burns, T., y Shadoian-Gersing, V. (2010). The importance of effective teacher education for diversity. OECD (ed.), *Educating Teachers for Diversity. Meeting the Challenge* (pp. 19-40). OECD Publishing. doi: <https://doi.org/10.1787/9789264079731-4-en>
- Bustos, F. (1986). *Estrategias didácticas para la formación profesional*. Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA. Colombia.
- Coll, C. (1998). La teoría genética y los procesos de construcción del conocimiento en el aula. En JA Castorina, C. Coll y otros, *Piaget en la educación. Debate en torno a sus aplicaciones*, México, Paidós.
- D'Amore, B. (2015). Saber, conocer, labor en didáctica de la matemática: Una contribución a la teoría de la objetivación. In L. Branchetti (Ed.), *Teaching and learning mathematics. Some past and current approaches to*

- mathematics education* (pp. 151–171). University of Urbino Carlo Bo: Isonomia. Recuperado de <http://isonomia.uniurb.it/epistemologica>
- Dussel, I. (2000). *La producción de la exclusión en el aula. Una revisión de la escuela moderna en América Latina*. Conferencia presentada en X Jornadas LOGSE. Granada, España.
- Fierro, M. (2011). El desarrollo conceptual de la ciencia cognitiva. Parte I. *Revista Colombiana de Psiquiatría*, 40(3). doi: [https://doi.org/10.1016/S0034-7450\(14\)60144-X](https://doi.org/10.1016/S0034-7450(14)60144-X)
- Foucault, M. (1982). The subject and power. *Critical Inquiry*, 8(4), 777-795. doi: <https://doi.org/10.1086/448181>
- Freire, P. (1972). Education: domestication or liberation? *Prospects*, 2(2), 173-181. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02195789>
- Freire, P. (1993). *Pedagogía de la esperanza: un reencuentro con la pedagogía del oprimido*. Siglo XXI.
- Freire, P. (1994). *La naturaleza política de la educación*. Planeta-Agostini.
- García, G. (2015). Aproximación a los procesos de exclusión e (in) exclusión en el aula de matemáticas. In *Avances y realidades de la educación matemática* (pp. 55-72). España: Graó Editores.
- García, G. (2016). Prácticas culturales de consumo: limitaciones y posibilidades en la movilización de la relación diversidad, educación matemática y subjetividades juveniles. *Educação Unisinos*, 20 (3), 339 – 347.
- García, G. y Romero, J. (2018). Matemáticas para todos en tiempos de la inclusión como imperativo. Un estudio sobre el programa Todos a Aprender. *Revista Colombiana de Educación*, (74), 289-310.
- García, G., y Valero, P. (2013). *De la igualdad, la equidad y la (in) exclusión en el currículo de matemáticas: una revisión en el contexto colombiano*. In: *Procesos de inclusión/exclusión: Subjetividades en educación matemática* (1 udg., s. 17 – 2). Bogotá, Colombia: Universidad Pedagógica de Colombia. Fondo Editorial.
- Gardner, H. (1987). *La nueva ciencia de la mente: historia de la revolución cognitiva*. Barcelona, España: Editorial Paidós.
- Gentili, P. (2002): *La exclusión y la escuela: el apartheid educativo como política de ocultamiento*. Ponencia presentada el 20 de setiembre en el Paraninfo de la Universidad de Sao Paulo. Brasil.
- Gorgorió, N. y Planas, N. (2000). Researching multicultural classes: A collaborative approach. In J.F. Matos & M. Santos (Eds), *Proceedings of the Second International Mathematics Education and Society Conference*, (pp. 265-274). Lisboa: Centro de Investigação em Educação da Faculdade de Ciências da Universidad de Lisboa.
- Lave, J., (1996). "Teaching, as learning, in practice." *Mind, Culture and Activity*, 3(3), 149-164. doi: https://doi.org/10.1207/s15327884mca0303_2
- Lave, J. (2009a). The practice of learning. *Contemporary theories of learning: Learning theorists... in their own words*, 200-208. Recuperado de: <https://pdfs.semanticscholar.org/1085/b8aaeee9d65dcbe930dca5fe6034bbaeb4d.pdf#page=209>
- Lave, J. (2009b). Fait sur mesure. *Techniques & Culture*, (1), 180-213. Recuperado de: <http://journals.openedition.org/tc/4644#entries>
- Lave, J. (2010). Math lessons from Liberia. *Anthropological Theory*, 10(1-2), 186-191. doi: <https://doi.org/10.1177/1463499610365385>

- Lave, J., y Packer, M. (2011). Hacia una ontología social del aprendizaje. *Revista de estudios sociales*, (40), 12-22.
- Lave, J., y Wenger, E. (1991). *Situated learning: Legitimate peripheral participation*. New York, EEUU: Cambridge University Press
- Popkewitz, T. S. (1994). Política, conocimiento y poder: algunas cuestiones para el estudio de las reformas educativas. *Revista de educación*, 305, 103-137.
- Popkewitz, T. (2006). La escolaridad y la exclusión social. *Anales de la educación común*, 2(4), 78-94. Recuperado de: http://servicios.abc.gov.ar/lainstitucion/revistacomponents/revista/archivos/anales/numero04/ArchivosParaImprimir/8_popkewitz_st.pdf
- Popkewitz, T. S. (2010). Inclusión y exclusión como gestos dobles en política y ciencias de la educación. *Propuesta Educativa*, (33), 11-27.
- Pozo, J. I. (1989). *Teorías cognitivas del aprendizaje*. Madrid, España: Ediciones Morata.
- Radford, L. (Octubre, 2013). *La enseñanza – aprendizaje desde una perspectiva histórico-cultural: la teoría de la objetivación*. Ponencia presentada en 14° Encuentro Colombiano de Matemática Educativa, Barranquilla, Colombia.
- Radford, L. (2014). De la teoría de la objetivación. *Revista Latinoamericana de Etnomatemática, Perspectivas socioculturales de la Educación Matemática*, 7(2), 132- 150. Recuperado de: <http://www.revista.etnomatematica.org/index.php/RLE/article/view/123>
- Radford, L. (2017). Aprendizaje desde la perspectiva de la Teoría de la Objetivación. En *Enseñanza y aprendizaje de las matemáticas: problemas semióticos, epistemológicos y prácticos* (pp. 115-134). Bogotá, Colombia: Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Ramos, L. A. (2014). Psicología cognitiva e inteligencia artificial: mitos y verdades. *Avances en Psicología*, 22(1), 21-27.
- Rodríguez, W. C., y Alemán, A. A. (2009). El enfoque sociocultural en el diseño y construcción de una comunidad de aprendizaje. *Revista electrónica actualidades investigativas en educación*, 9, 1-21.
- Rogoff, B. (1997). Los tres planos de la actividad sociocultural: apropiación participativa, participación guiada y aprendizaje. *La mente sociocultural. Aproximaciones teóricas y aplicadas*, 111-128. Recuperado de: http://www.terras.edu.ar/biblioteca/6/6TA_Rogoff_Unidad_5.pdf
- Servicio Nacional de Aprendizaje. (1985). *Unidad Técnica*. Bogotá: Colombia.
- Servicio Nacional de Aprendizaje. (1997). *Estatuto de la Formación Profesional Integral*. Bogotá: Colombia.
- Servicio Nacional de Aprendizaje. (2015). *Proyecto Educativo Institucional*. Bogotá: Colombia.
- Tynjala, P., Mason, L., y Lonka, K. (Eds.) (2001). "Writing as a Learning Tool" Presented at the annual meeting of the American Educational Research Association, April 10–14, Seattle, WA
- Valero, P. (2002). Consideraciones sobre el contexto y la educación matemática para la democracia. *Quadrante*, 11(1), 33-40.
- Valero, P. (2009). Entre la realidad y la utopía: investigación socio-política en educación matemática. *Escenarios de aprendizaje de las matemáticas*, 18 - 29.

- Valero, P. (2012). Perspectivas sociopolíticas en la educación matemática. En P. Valero y O. Skovsmose (Eds.), *Educación matemática crítica: Una visión sociopolítica del aprendizaje y enseñanza de las matemáticas* (pp. 195-216). Bogotá: Ediciones Uniandes.
- Valero, P. (2013). *Investigación en educación matemática, currículo escolar y constitución de la subjetividad*. Trabajo presentado en VII CIBEM, Montevideo, Uruguay.
- Valero, P. (2017). El deseo de acceso y equidad en la educación matemática. *Revista Colombiana de Educación*, (73), 97-126. doi: <https://doi.org/10.17227/01203916.73rce97.126>
- Valoyes Chávez, L. (Junio, 2015). *Racial and class tensions in Colombian mathematics classrooms*. Conferencia presentada en 8th Mathematics Education and Society, Portland, Estados Unidos.
- Valoyes Chávez, L. (2017). Inequidades raciales y educación matemática. *Revista Colombiana de Educación*, (73), 127-150. doi: <https://doi.org/10.17227/01203916.73rce127.150>
- Vasco, C. E. (1993). La metáfora del cerebro como computador en la ciencia cognitiva. *Revista Informática Educativa*, 6 (2), 109 - 119.
- Vásquez, G. (1991). La pedagogía como ciencia cognitiva. *Revista Española de Pedagogía*, 49(188), 123-146. Recuperado de: <http://www.jstor.org/stable/23764358>
- Wenger, E. (2001). *Comunidades de práctica: aprendizaje, significado e identidad*. Barcelona, España: Paidós.

Indice de Autores

Authors

Ana Cecilia Caro Zapata. Colombiana. MSc. Ciencias Químicas. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro Textil y de Gestión Industrial. Grupo de Investigación aplicada a la industria textil y química. (GIAITEQ). E-mail: acarosena@sena.edu.co

Andrés Herrera. Colombiano. Candidato a MSc. Cuencas Hidrográficas. Contratista Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos – UAESP, Bogotá, Colombia. E-mail: anheag@gmail.com

Carlos Alberto Rico. Colombiano. Licenciado en Educación, Especialista en Educación ambiental. Universidad Santiago de Cali, Colombia. E-mail: carlosalbertoricoc@gmail.com

Carlos H. Valencia. Colombiano. PhD. en Ciencias Biomédicas. Universidad Santiago de Cali, Colombia. E-mail: carlos.valencia@usc.edu.co

Carolina Caicedo. Colombiana. PhD. Servicio Nacional de Aprendizaje-SENA, Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria, Grupo de investigación GIDEMP, Colombia. E-mail: ccaicedo60@misena.edu.co

Daniela Echeverri-Cárdenas. Colombiana. Ingeniera de Diseño de Producto. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Colombia. E-mail: danaeca@gmail.com

Daniela Eugenia Angulo Ramírez. Colombiana. PhD en Ingeniería. Universidad del Valle, Grupo de Materiales Compuestos (CENM), Cali, Colombia. E-mail: daniela.eugenia.angulo@correounivalle.edu.co

Diego Fernando Caicedo Cano. Colombiano. MSc. ESE Hospital Departamental Tomas Uribe Uribe de Tuluá, Empresa Social del Estado, Colombia. E-mail: difer821@hotmail.com

Ivonne Adams. Colombiana. MSc. en Derecho médico. Universidad Santiago de Cali, Colombia. E-mail: ivonneadams@usc.edu.co

Javier Augusto Barros Leal. Colombiano. MSc. Universidad Internacional Iberoamericana, México E-mail: jaubale07@hotmail.com

Jefferson Guillermo Henao Alpidio. Colombiano. Tecnólogo en Mecánica Dental. Universidad Santiago de Cali, Colombia. E-mail: jeffersonhenao0411@gmail.com

Jherson Eveiro Díaz Rosero. Colombiano. PhD. Universidad del Valle, Colombia. E-mail: jhersondiaz@hotmail.com

Jhoan Sebastian Ramos Puerto. Colombiano. Tecnólogo en Mecánica Dental. Universidad Santiago de Cali, Colombia. E-mail: sebas.ramos_14@hotmail.com

Jhosep Aguiar Santa. Colombiano. Tecnólogo Químico Textil. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro Textil y de Gestión Industrial. Grupo de Investigación aplicada a la industria textil y química. (GIAITEQ). E-mail: jhosepsanta@gmail.com

Juan Manuel Escandón. Colombiano. MSc. en Ciencia y tecnología de polímeros. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Colombia. E-mail: jmescandon@misena.edu.co

Juanibeth G. Ramírez-Calderón. Mexicana. Física. Departamento de Polímeros, Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, México. E-mail: summersbunbury@hotmail.com

Julio César Martínez Espinosa. Mexicano. PhD. Universidad Internacional Iberoamericana, México. E-mail: julio.martinez@unini.edu.mx

Lili Vega. Colombiana. Candidata a MSc. Ingeniería Mecánica. Contratista Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, Colombia. E-mail: ltvegac@unal.edu.co

Luis F. Del Castillo. Mexicano. PhD. Departamento de Polímeros, Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, México. E-mail: lfelipe@unam.mx

María Clara Ortiz Cortés. Colombiana. Ingeniera de Materiales. Universidad del Valle, Colombia. E-mail: maclaor27@gmail.com

María Rocío Malagón P. Colombiana. Estudiante de Doctorado Interinstitucional en Educación. Universidad Francisco José de Caldas, Colombia. E-mail: malagon@sena.edu.co

Natalia Andrea Gómez Rave. Colombiana. Tecnóloga química aplicada a la industria. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro Textil y de Gestión Industrial. Grupo de Investigación aplicada a la industria textil y química. (GIAITEQ). E-mail: nagomez49@misena.edu.co

Ruby Mejía De Gutiérrez. Colombiana. PhD en Ciencias Químicas. Profesora Titular de la Universidad del Valle, Grupo de Materiales Compuestos (CENM), Cali, Colombia. E-mail: ruby.mejia@correounivalle.edu.co

Vicente Compañ Moreno. Español. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Termodinámica Aplicada. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII), España. E-mail: vicommo@ter.upv.es

William Gustavo Valencia Saavedra. Colombiano. Estudiante de Doctorado en Ingeniería de Materiales Universidad del Valle, Grupo de Materiales Compuestos (CENM), Cali, Colombia. E-mail: william.gustavo.valencia@correounivalle.edu.co

Yenny Ávila-Torres. Colombiana. PhD. Universidad Tecnológica de Pereira, Escuela de Química, Grupo de Investigación QCOAMMSB, Colombia. E-mail: yennypatricia.avila@utp.edu.co



IV Simposio DE MATERIALES POLIMÉRICOS



**13 y 14 Septiembre
2018**

- Ponencias Magistrales
- Curso
- Conversatorio
- Presentación de resultados de Investigación

EVENTO GRATUITO
Cupo Limitado



Inscripciones hasta 10 de Agosto
insc.simposiopolimeros@gmail.com

LUGAR

Auditorio Quincha

Universidad Autónoma de Occidente
Calle 25 No. 115-85
Cali - Colombia

PBX Gidemp:

431 5800 IP: 22839 / 312 272 9606

www.gidemp.blogspot.com



Organiza

*"Sé el cambio
que quieres ver
en el mundo"*

Mahatma Gandhi



SEA
Semilleros de
Emprendimiento ASTIN



Empresas de Emprendedores



**Laboratorios
L'Sant**



**Ralph
Studios**



iproject



**Maestría
Mecánica**



**CENTRO NACIONAL DE ASISTENCIA
TÉCNICA A LA INDUSTRIA ASTIN**

Calle 52 No. 2Bis - 15

Teléfonos: 57 (2) 431 5847 Ext. 22667 - 22695

Fax: (2) 4471075 - 4467182

www.sena.edu.co

<http://centroastinsena.blogspot.com/>

E-mail: astin@sena.edu.co

INFORMADOR TÉCNICO

Calle 52 No. 2Bis - 15

Teléfonos: 57 (2) 431 5800 Ext. 22694

Email: revistaitastin@sena.edu.co

<http://informadortecnico.senaastin.com>

http://biblioteca.sena.edu.co/paginas/revistas_info.html

Cali, Valle del Cauca, Colombia