



INFORMADOR TÉCNICO



Volumen 81 Número 1 Enero - Junio 2017 • ISSN 0122-056X • e-ISSN 2256 - 5035



60
AÑOS
CONSTRUYENDO PAZ

ISSN 0122-056X

e-ISSN 2256 - 5035

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

Tarifa Postal Reducida No. 2017 - 179 4-72,
vence 31 de Dic. 2017

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 2017

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>

Comite Editor

María Andrea Nieto Romero
Director general del SENA

Cesar Alveiro Trujillo Solarte
Director SENA Regional Valle

Aura Elvira Narváez Agudelo
Subdirectora Centro Nacional de
Asistencia Técnica a la Industria –ASTIN
y Directora de la revista

Carolina Caicedo
Investigadora y Editora

Miguel Angel Solís Molina
Coordinador del Servicio de Información y
Divulgación Tecnológica –SIDT

Julia Emma Zúñiga Rivera
Coordinadora Revista

Elizabeth Enriquez Quintero
Diagramación y diseño

Ana María Cortés Rosero
Apoyo logístico

Comite Editorial

Eric Campos Cantón
Ph.D. en Matemáticas Aplicada, Instituto Potosino de Investigación
Científica y Tecnológica A.C.
San Luis Potosí, S.L.P., México

Gilberto Bejarano Gaitán
Ph.D. en Ingeniería con énfasis en Materiales.
Docente investigador Departamento de Ingeniería Metalúrgica
y de Materiales. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Henry A. Colorado Lopera
Ph.D. en Ingeniería de Materiales.
University of California, Los Angeles, EE.UU.

Héctor Fabio Zuluaga Corrales
Ph.D. en Química. Jefe Departamento de Química,
Universidad del Valle, Cali, Colombia

José Luis Munuera Alemán
Ph.D. en Ciencias Económicas y Empresariales
Universidad de Murcia, España

José Ignacio Huertas
Ph.D. en Ciencias, M.Sc. en Ingeniería Mecánica.
Director del CIMA, Instituto Tecnológico y Estudios Superiores
de Monterrey, México

Juan Muñoz Saldaña
Ph.D. Profesor Investigador, Centro de Investigación
y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional
- Cinvestav - Unidad Querétaro - México

Pedro José Arango Arango
Ph.D. en Ingeniería y Tecnología de Materiales.
Director Laboratorio de Física de Plasma, Universidad Nacional
de Colombia, Sede Manizales, Colombia

Roberto Briones Gallardo
Ph.D. en Ciencias Físicoquímicas del Medio Ambiente,
Universidad Autónoma de San Luis Potosí – México

Ruby Mejía de Gutiérrez
Ph.D. 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

ISSN: 0122-056X
e-ISSN: 2256-5035
DOI: <https://dx.doi.org/10.23850/issn.2256-5035>

Impresión y acabados
Ingeniería Gráfica

Tiraje
100 ejemplares
Enero - Junio de 2017

Revista Informador Técnico

Misión: La Revista Informador Técnico es una publicación semestral del Servicio de Aprendizaje Nacional, SENA - Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria (ASTIN), y publica artículos de alta calidad en las áreas de plásticos, materiales, metalmecánica, recubrimientos duros, gestión (industrial, medioambiental, tecnológica, de calidad, del conocimiento y de la innovación), 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: La Revista 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 en las modalidades de canje, donación, depósito legal, suscripciones gratuitas a comunidades educativas, autores, árbitros y empresarios de los sectores de la cadena productiva; 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: Pubindex (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: plastics, material, metal-mechanic, hard coating, industrial management (industrial, environmental, technology, quality, knowledge and innovation).

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 formats in the modalities of exchange, donation, legal deposit, free subscription to educational communities, authors, judges and businessmen from the production chain the sectors; 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: Pubindex (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.

Guía abreviada para la presentación de los artículos

Tipos y características de los documentos

La revista 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)
Complejo Salomia
Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria (ASTIN)
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)
Complejo Salomia
Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria (ASTIN)
Calle 52 No. 2 Bis -15
Cali – Colombia
Phone: +57 (2) 4315855 / 4315800 ext. 22694

INFORMADOR TÉCNICO

Volumen 81 • Número 1 • Enero-Junio 2017 • ISSN 0122-056X • e-ISSN 2256-5035

TABLA DE CONTENIDO

EDITORIAL	8
ARTICULOS DE GESTIÓN DE LA INNOVACIÓN	
Impacto del SENA en la innovación de las empresas manufactureras en Colombia: Una mirada desde la Ambidestreza Organizacional	9
<i>Impact of SENA on innovation of manufacturing companies in Colombia: From the Ambidextrous Organizational perspective</i>	
Miguel Ángel Solís-Molina, Miguel Hernández-Espallardo, Augusto Rodríguez-Orejuela	
ARTICULOS DE DISEÑO	
Diseño de una suela para calzado femenino casual bajo parámetros de liviandad	24
<i>Design of a female shoe sole under lightweight parameters</i>	
Juliana Vélez López, Sebastián Valderrama Mejía, Patricia Castaño Rivera, Camilo Andrés Páramo Velasquez	
Diseño e Implementación de un sistema de control cascada en la planta de intercambio térmico - PIT000	32
<i>Design and implementation of a cascade control system the heat exchange plant</i>	
Juan Gonzalo Álvarez Díaz, Jorge Enrique Moreno Serrano, Edwin Fernando Murillo	
ARTICULOS DE MATERIALES COMPUESTOS	
Influencia del residuo de mampostería (RM) como material cementicio suplementario en la elaboración de Morteros	44
<i>Influence of masonry residue (RM) as supplementary cementitious material in the production of Mortars</i>	
Yimmy Fernando Silva Urrego, Marisol Gordillo, Silvio Delvasto Arjona	
Pulvimetalurgia: Proceso sostenible para la fabricación de carburos cementados en Colombia	55
<i>Powder metallurgy: Sustainable process for the manufacture of cemented carbides in Colombia</i>	
Luis Carlos Ardila Téllez, Andres Fernando Gil Plazas, Victor Guillermo Barrientos Sossa, Liz Karen Herrera Quintero	
ARTICULOS DE QUÍMICA	
Síntesis de ligantes Imino-Amida como modelos de ligantes orgánicos asociados a actividad factor tolerante a la glucosa	66
<i>Synthesis of Imino-Amide ligands as Models of associated organic ligands To glucose tolerant factor activity</i>	
Jhon Fernando Guateque, Gustavo Adolfo Rojas, Marcos Flórez-Álamo, Edwin Flórez-López, Yenny Patricia Ávila-Torres	
Extracción termomecánica y caracterización fisicoquímica del aceite de aguacate (Persea americana Mill. cv. Hass)	75
<i>Thermomechanical extraction and physico-chemical characterization of avocado oil (Persea americana Mill. cv. Hass)</i>	
Diana Paola Yepes Betancur, Laura Sánchez Giraldo, Carlos Julio Márquez Cardozo	
Conservación de Uchuva (Physalis Peruviana) mediante la aplicación de un recubrimiento a base de Quitosano y áloe vera, utilizando el método de aspersión	86
<i>Conservation of Uchuva (Physalis Peruviana) by applying a coating based on Chitosan and aloe vera, using the spray method</i>	
Ana Muñoz, Angie Barbosa, Daniela Bustos, Yenifer Ramírez, Yesenia Vásquez, Jaqueline García, Marcelo Guancha	

Editorial

El SENA durante sus 60 años le aporta a la ciencia, la tecnología y la innovación del país, mediante la contribución a la competitividad de las empresas en Colombia. Desde su creación, el SENA se ha caracterizado por la transferencia de conocimiento a las empresas desde la formación profesional, los servicios tecnológicos y la investigación aplicada. Para ello, en los últimos años ha implementado programas tales como: Tecnoparque, Tecnoacademia, grupos y semilleros de investigación aplicada, servicios tecnológicos de laboratorio y asistencia técnica, y revistas científicas, todos ellos escenarios que permiten la construcción de capacidades para la innovación, en el marco del sistema de investigación, innovación y desarrollo tecnológico denominado SENNOVA. En este sentido, el SENA ha sido la entidad que mayores relaciones de apoyo brindó a las empresas para la realización de actividades de ciencia, tecnología e innovación – ACTI en el período 2009-2014.

El Comité Editorial de la revista científica Informador Técnico, se complace en presentar el volumen 81(1), con el que se permite demostrar a su audiencia una vez más el cumplimiento de los criterios de mérito y calidad exigidos por PUBLINDEX-Colciencias para la publicación de sus artículos, resultado de un proceso de investigación. El Servicio Nacional de Aprendizaje SENA a través de SENNOVA es el encargado de fortalecer la revista brindando el apoyo de acuerdo con los requerimientos dictados en los términos de referencia de la convocatoria para Indexación de Revistas Científicas Colombianas Especializadas. Entre las fases que afrontamos se encuentran: la declaración de cumplimiento del proceso de gestión editorial, la validación del proceso de evaluación y de la visibilidad, y finalmente, el impacto de la revista científica nacional centrado en la diferenciación de cada una de las áreas de conocimiento e incorporación del factor H para el cual se encuentra un valor estimado igual a siete (7) para el Informador Técnico. Como parte del compromiso, la revista en este nuevo número ha implementado el uso del identificador de objetos digitales (*digital object identifier*, DOI) considerado como el código de barras de la propiedad intelectual. El DOI contribuye a la visibilidad y facilita el enlace entre los usuarios y los suministradores de información, de tal forma que estudiantes, investigadores y profesionales en el campo de los materiales y la gestión logren un acceso rápido y seguro a los artículos aquí publicados.

Para este número les presentamos los resultados experimentales de un estudio de la colaboración entre las empresas manufactureras y el SENA, utilizando la Teoría de la firma basada en el conocimiento, la Teoría de recursos y capacidades, y la Teoría de los costos de transacción, con el fin de conocer el impacto en las capacidades de innovación de las empresas producto de esta colaboración con el SENA. Por otro lado, en el primer caso, se muestran investigaciones sobre el diseño e implementación de materiales útiles en la industria del calzado. El estudio logra el desarrollo de una suela en

caucho expandido teniendo como parámetro la liviandad para el calzado femenino. El segundo caso, trata de una planta didáctica de intercambio térmico dispuesta por un sistema de control basado en una estrategia cascada temperatura-flujo. Por otra parte, se presentan resultados que conducen al empleo de residuos de mampostería como material alternativo a las puzolanas, y con ello la sustitución del cemento Portland generando un gran beneficio ambiental. Asimismo, se describe el desarrollo de un metal duro convencional compuesto a partir de una fase cerámica y una fase metálica el cual es fabricado utilizando el proceso de sinterización en vacío. La implementación de este proceso pulvimetalúrgico confirma ser potencialmente más eficiente y limpio. Desde la química de los materiales, se aborda la metodología de síntesis de nuevos ligantes que son potenciales como bases de Lewis en la coordinación a cromo (III), estabilizando sistemas biomiméticos a factor tolerante a la glucosa. Adicionalmente, se muestra la estandarización del proceso de extracción del aceite de aguacate y la caracterización a partir de los principales índices fisicoquímicos. Por último, se presentan los resultados de investigación de la evaluación de un recubrimiento de quitosano y Aloe Vera sobre el tiempo de vida útil de la uchuva (*Physalis peruviana*) utilizando el método de aplicación por aspersión. En esta edición participaron instituciones a nivel nacional e internacional entre las que se encuentran: la Universidad de Murcia (España), la Universidad Nacional Autónoma de México (México), la Universidad del Valle, la Universidad Autónoma de Occidente, la Universidad Tecnológica de Pereira, la Universidad Santiago de Cali, la Universidad Nacional de Colombia; y por el Servicio Nacional de Aprendizaje SENA participaron: el Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria - ASTIN, el Centro de Diseño y Manufactura del Cuero, el Centro de Electricidad y Automatización Industrial, el Centro de Materiales y Ensayos, el Centro Textil y Gestión Industrial.

El Informador Técnico, 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 30, 31 de agosto y 1 de septiembre al **III 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 continúe fortaleciendo el trabajo en red con el fin de potenciar el desarrollo de proyectos de investigación aplicada. La revista Informador Técnico agradece a los autores 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

Impacto del SENA en la innovación de las empresas manufactureras en Colombia: Una mirada desde la ambidestreza organizacional¹

Impact of SENA on innovation of manufacturing companies in Colombia: From the Ambidextrous Organizational perspective

Recibido: 27- 01 - 2017 Aceptado: 25-05-2017

Miguel Solís-Molina^{2*}
Miguel Hernández-Espallardo³
Augusto Rodríguez-Orejuela⁴

¹ Esta investigación contó con el apoyo financiero de los proyectos C.I. 8112 (Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Valle - Colombia), 0288- 2013 (SENA Centro ASTIN-Colombia) y ECO2013-47969-P (Ministerio de Economía y Competitividad - España).

² Colombiano, Ph.D. en Administración. Profesional G06 Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria ASTIN, integrante del Grupo de Investigación en Innovación, Gestión Tecnológica y del Conocimiento INGETEC-ASTIN y del Grupo de Investigación en Marketing de la Universidad del Valle. Calle 52 #2bis-15 Salomia, Cali, Colombia. E-mail: masolis@misena.edu.co.

³ Español, Ph.D. en Ciencias Económicas y Empresariales. Sección Empresa. Profesor Titular de Universidad. Universidad de Murcia, Facultad de Economía y Empresa, Departamento de Comercialización e Investigación de Mercados. Campus de Espinardo, 30100 Murcia, España. E-mail: migher@um.es.

⁴ Colombiano, Ph.D. en Ciencias de la Empresa. Profesor Titular. Universidad del Valle, Facultad de Ciencias de la Administración, Departamento de Administración y Organizaciones, Director del Grupo de Investigación en Marketing. Calle 4B No 36-00 Cali, Colombia. E-mail: augusto.rodriguez@correounivalle.edu.co.

Resumen

El Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA es una entidad de formación profesional integral de tecnólogos y técnicos laborales en Colombia. También lleva a cabo la prestación de servicios tecnológicos y participa en proyectos de innovación. En este sentido, la presente investigación aborda si la colaboración con el SENA en proyectos de innovación tiene efectos significativos en las capacidades y desempeño de las empresas manufactureras, mediante un estudio empírico a partir de una muestra de 281 empresas. Para ello, se usa como marco de referencia el paradigma de la ambidestreza organizacional, el cual plantea que las organizaciones pueden llevar a cabo actividades de innovación de explotación y exploración simultáneamente para obtener un mejor desempeño. En el presente estudio se utiliza la Teoría de la firma basada en el conocimiento, la Teoría de recursos y capacidades, y la Teoría de los costos de transacción para estudiar la colaboración. Los resultados obtenidos sugieren que las empresas que colaboran para innovar en actividades de explotación con el SENA tienen mayores capacidades en exploración, capacidad de alianzas, co-explotación, co-exploración y desempeño en términos de rentabilidad que las que no. En cuanto a aquellas empresas que colaboran para innovar en actividades de exploración con el SENA tienen mayores capacidades de exploración, capacidad de alianzas, co-explotación, co-exploración y desempeño en términos de rentabilidad y ventas que las que no. Esto es relevante, ya que las empresas pueden considerar las alianzas de colaboración para innovar con el SENA como una alternativa para mejorar sus capacidades y desempeño.

Palabras clave: Proyectos de innovación; SENA; empresas de manufactura; ambidestreza organizacional; explotación; exploración; co-explotación; co-exploración.

Abstract

The National Training Service (Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA) is an entity of integral professional training of technologists and labor technicians in Colombia. SENA also provides technological services and participates in innovation projects with companies. In this sense, this research is about whether collaboration with SENA in innovation projects has significant effects on capabilities and performance of manufacturing companies, by means of an empirical study from a sample of 281 companies. To do this, it is used as a frame of reference the paradigm of organizational ambidexterity, which states that organizations can carry out exploitation and exploration innovation activities simultaneously to improve their performance. In the present study, we use the knowledge-based theory of the firm, resource-based theory of the firm, and transaction costs theory to study the collaboration. The results obtained suggest that companies that collaborate to innovate in exploitation activities with SENA have higher levels of exploration, alliance capability, co-exploitation, co-exploration, and performance in terms of profitability than the ones that do not. As for those companies that collaborate to innovate in exploration activities with SENA have higher levels of exploration, alliance capability, co-exploitation, co-exploration, and performance in terms of profitability and sales than those that do not. This is relevant since companies can consider the collaborative partnerships to innovate with SENA, as an alternative to improve their capabilities and performance.

Keywords: Innovation projects; SENA; manufacturing companies; organizational ambidexterity; exploitation; exploration; co-exploitation; co-exploration.

Introducción

De acuerdo con la Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica en la Industria Manufacturera de Colombia 2009-2010 - EDIT V (DANE, 2011) y 2011-2012 - EDIT VI (DANE, 2013), 35 actividades industriales según la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU) revisión tres adaptada para Colombia tienen entre un 30% y un 10% de empresas innovadoras en sentido amplio, es decir, que en el período de referencia obtuvieron al menos: 1) un bien o servicio nuevo o significativamente mejorado en el mercado nacional, o 2) un bien o servicio nuevo o mejorado para la empresa, o 3) un proceso nuevo o significativamente mejorado para la línea de producción o para las líneas de producción complementarias, o 4) una forma organizacional o de comercialización nueva. Para

ello, las empresas recurrieron a sus unidades de innovación, o contrataron a otras empresas, o desarrollaron alianzas de colaboración mediante proyectos de innovación o una mezcla de las anteriores. En este sentido, el SENA ha sido la entidad que mayores relaciones de apoyo brindó a las empresas para la realización de actividades de ciencia, tecnología e innovación - ACTI en los períodos 2009-2010, 2011-2012 y 2013-2014, según las Encuestas de Desarrollo e Innovación Tecnológica en la industria manufacturera - EDIT V, EDIT VI y EDIT VII (DANE, 2011, 2013, 2015).

El SENA en Colombia, tiene la función de promover la educación superior para el trabajo de tecnólogos y técnicos laborales, mediante una oferta que incluye aprendizaje titulado y complementario bajo la modalidad presencial o virtual. Asimismo, la entidad realiza la prestación de servicios tecnológicos de investigación aplicada, asistencia técnica, fabricaciones especiales, ensayos y calibraciones de laboratorio, servicios de información y divulgación tecnológica, y financia proyectos de innovación y desarrollo tecnológico bajo el sistema de investigación, innovación y desarrollo tecnológico denominado SENNOVA.

En este sentido, esta investigación se constituye en un estudio empírico, al abordar el hecho de que la empresa haya utilizado al SENA para complementar sus esfuerzos internos de innovación. Los resultados obtenidos permiten conocer si el SENA tiene un efecto sobre el desempeño de las firmas que lo utilizan para co-desarrollar actividades de innovación. Tener un mayor entendimiento de este fenómeno permitirá a los directivos contar con mejores criterios para gestionar las relaciones inter-organizacionales de colaboración para la innovación, de manera que se obtengan mayores beneficios para sus firmas (e.g. rentabilidad, ventas, productividad) (Quinn & Rohrbaugh, 1983), y en sus capacidades relacionadas con las actividades de innovación (e.g. capacidad de absorción, capacidad de alianzas).

Ambidestreza organizacional e inter-organizacional

Para llevar a cabo este estudio se utilizó como marco de referencia el concepto de ambidestreza organizacional (Papachroni, Heracleous, & Paroutis, 2014) en el contexto de las relaciones inter-organizacionales (Rossignoli & Ricciardi, 2015; Solís-Molina, Hernández-Espallardo, & Rodríguez-Orejuela, 2015) y de la organización que aprende (López Zapata, García Muiña, & García Moreno, 2012), lo que supone el desarrollo simultáneo de actividades de innovación de explotación y exploración, apoyándose

en relaciones de colaboración para la innovación con otras organizaciones (Kauppila, 2010). Este concepto está relacionado con la propuesta de March (1991) según la cual la explotación es “refinamiento, producción, eficiencia, selección, implementación, ejecución” (p. 71) para cumplir con las necesidades de clientes actuales (Benner & Tushman, 2003, 2015), y la exploración es “búsqueda, variación, toma de riesgos, experimentación, juego, flexibilidad, descubrimiento, innovación” (p. 71) para cumplir con las expectativas de clientes futuros (Benner & Tushman, 2015; Levinthal & March, 1993). En este sentido, las empresas pueden beneficiarse tanto de la explotación para obtener recursos a partir de sus productos o servicios existentes, como de la exploración para desarrollar nuevas iniciativas en las cuales invertir los recursos obtenidos como producto de la explotación en un ciclo virtuoso (Lavie, Stettner, & Tushman, 2010). A este respecto, una empresa se caracteriza por ser ambidiestra organizacionalmente cuando logra mantener altos niveles de explotación y exploración de manera simultánea (He & Wong, 2004).

La literatura sobre ambidestreza organizacional se nutre de las teorías sobre aprendizaje organizacional (Levitt & March, 1988), la Teoría de la firma basada en el conocimiento (Grant, 1996; Kogut & Zander, 1992, 1996), la Teoría de la firma basada en recursos y capacidades (Barney, 1991; Wernerfelt, 1984), la Teoría de las capacidades dinámicas (Easterby-Smith & Prieto, 2008; Teece, Pisano, & Shuen, 1997) y la Teoría de los costos de transacción (Williamson & Ouchi, 1980), entre otras. La ambidestreza organizacional como paradigma en la Teoría organizacional busca dar respuesta a la necesidad de las organizaciones de mantener un desempeño superior al promedio de la industria en el corto plazo y sostenido en el largo plazo (Raisch, Birkinshaw, Probst, & Tushman, 2009). Este concepto ha sido abordado teóricamente (e.g., Gupta et al., 2006; O'Reilly III & Tushman, 2008; O'Reilly III & Tushman, 2013; Raisch & Birkinshaw, 2008; Raisch et al., 2009; Simsek, Heavey, Veiga, & Souder, 2009; Tushman & O'Reilly III, 1996) y empíricamente (e.g., Adler, Goldoftas, & Levine, 1999; Andriopoulos & Lewis, 2009; Atuahene-Gima, 2005; He & Wong, 2004; Jansen, Tempelaar, van den Bosch, & Volberda, 2009; Jansen, Van Den Bosch, & Volberda, 2006; Lubatkin, Simsek, Ling, & Veiga, 2006) para establecer su relación con el desempeño de las organizaciones. Los resultados encontrados soportan que la ambidestreza organizacional tiene un efecto positivo sobre el accionar de la firma, pero aún hay interrogantes sobre cuándo y cómo este efecto es positivo y bajo qué contextos es esto posible (Junni, Sarala, Taras & Tarba, 2013).

En el marco de los proyectos colaborativos de innovación Simsek, Heavey, Veiga y Souder (2009) presentan el contexto para el desarrollo del concepto de ambidestreza inter-organizacional, que incluye el valor añadido de las actividades de explotación y de exploración que se llevan a cabo de manera conjunta con otras organizaciones. La ambidestreza inter-organizacional contempla el desarrollo simultáneo de la explotación y la exploración basándose en relaciones inter-organizacionales (Kauppila, 2010). A este respecto, Parmigiani y Rivera-Santos (2011) introducen los conceptos de co-explotación y co-exploración como elementos de toda relación inter-organizacional. Por un lado, definen la co-explotación como un acuerdo cooperativo para utilizar y expandir el conocimiento existente, mientras que la co-exploración corresponde a un acuerdo cooperativo para crear nuevo conocimiento. Esto está en línea con los trabajos realizados por Biao Yi-Ju (2014) y Kauppila (2015) sobre los beneficios de efectuar actividades de co-explotación y co-exploración para mejorar el desempeño.

Kristal, Huang y Roth (2010) en el marco de la cadena de suministro, encuentran que las firmas que tienen una estrategia ambidiestra de prácticas de exploración y explotación logran afectar positivamente el desempeño (i.e. participación en el mercado y nivel de utilidades). Asimismo, Kauppila (2010) reconoce que las relaciones inter-organizacionales representan un recurso potencial importante para el desarrollo de la ambidestreza organizacional, y que las firmas pueden crear ambidestreza a partir de una combinación de antecedentes de estructura y contexto, tanto en el nivel organizacional como en el inter-organizacional. A este respecto, el uso de la co-exploración y co-explotación puede ayudar a que las relaciones inter-organizacionales contribuyan a crear ambidestreza organizacional. De igual manera, Kauppila (2010) hace notar la importancia de la capacidad de absorción y la capacidad de alianzas para que efectivamente las relaciones inter-organizacionales se traduzcan en una contribución a la ambidestreza organizacional y en un mejor desempeño. Por un lado, las relaciones de co-explotación contribuyen con el acceso a activos complementarios para actividades de producción en las industrias manufactureras (Kauppila, 2010). Por otro, las relaciones de co-exploración aportan conocimientos nuevos en áreas no familiares para la empresa con potencial innovador (Kauppila, 2015).

Según O'Reilly & Tushman (2013) entre los temas futuros de interés relacionados con la ambidestreza organizacional se plantea hacer la transición de la firma como unidad de análisis hacia una unidad de análisis

expandida que contemple el ecosistema en que ella se desenvuelve. Es decir, pasar de una focalización de exploración y explotación al interior de la firma e interfirmas hacia una conciencia de una comunidad más amplia para expandir los límites de la firma y la comunidad, al adoptar estructuras organizacionales híbridas y legitimarlas en contextos institucionales. En este sentido, la presente investigación busca contribuir con una unidad de análisis ampliada que contemple a la firma y a una relación inter-organizacional con un actor específico, que corresponde, en este caso, al SENA, una entidad gubernamental del tipo interface con presencia en todo el territorio colombiano y en todos los sectores de la industria manufacturera en Colombia.

Colaboración inter-organizacional para la innovación

De acuerdo con Zeng, Xie y Tam (2010), los actores con los que las firmas pueden establecer colaboraciones para innovar pueden ser principalmente: firmas (e.g. proveedores, clientes y/o competidores), agencias del gobierno (e.g. servicios de información, innovación y/o supervisión), intermediarios (e.g. de tecnología por transferencia o venta, o asociaciones industriales) y organizaciones de investigación y desarrollo (e.g. universidades, centros de investigación e institutos técnicos). En su estudio sobre pequeñas y medianas industrias (SMEs) en China, Zeng, Xie y Tam (2010) encontraron efectos positivos y significativos de las relaciones de cooperación inter-organizacional con otras firmas, los intermediarios y las organizaciones de investigación y desarrollo, y el desempeño de la innovación de las empresas pequeñas y medianas. Sin embargo, estos autores no hallaron relaciones positivas y significativas entre las agencias del gobierno y el desempeño de la innovación de las empresas pequeñas y medianas, pero sí entre las agencias del gobierno y los intermediarios, y las agencias del gobierno y las organizaciones de investigación y desarrollo.

El SENA, como tal, podría considerarse como un híbrido entre una agencia del gobierno y un intermediario o interface en las actividades de innovación ya que, si bien es una entidad adscrita al Ministerio de Trabajo con funciones de educación superior, lo que la vincula con el Ministerio de Educación por la implementación de los registros calificados para la aprobación de los programas de formación, también tiene presupuestos orientados a financiar programas de investigación, desarrollo tecnológico e innovación para las empresas bajo el nombre de SENNOVA. Por esta razón, se espera que las actividades

del SENA puedan tener impactos positivos sobre las capacidades y desempeño de las empresas.

En cuanto a las actividades de co-explotación, el SENA realiza la prestación de servicios tecnológicos de laboratorio, asistencia técnica y proyectos de investigación aplicada, relacionados con los programas de formación para ampliar la base del conocimiento existente en las empresas. De este modo, planteamos las siguientes hipótesis:

H_{1a1} : Las empresas que realizan actividades de innovación de co-explotación con el SENA tienen una mayor capacidad de explotación.

H_{1a2} : Las empresas que realizan actividades de innovación de co-explotación con el SENA tienen una mayor capacidad de exploración.

H_{1a3} : Las empresas que realizan actividades de innovación de co-explotación con el SENA tienen una mayor capacidad de absorción.

H_{1a4} : Las empresas que realizan actividades de innovación de co-explotación con el SENA tienen una mayor capacidad de alianzas.

H_{1a5} : Las empresas que realizan actividades de innovación de co-explotación con el SENA tienen una mayor capacidad de co-explotación.

H_{1a6} : Las empresas que realizan actividades de innovación de co-explotación con el SENA tienen una mayor capacidad de co-exploración.

Con respecto a las actividades de co-exploración, el SENA participa en proyectos de investigación con las empresas y las universidades, y mediante el programa SENNOVA co-financia proyectos de innovación y desarrollo tecnológico para incorporar conocimiento nuevo en las empresas. Por ello, planteamos las siguientes hipótesis:

H_{1b1} : Las empresas que realizan actividades de innovación de co-exploración con el SENA tienen una mayor capacidad de explotación.

H_{1b2} : Las empresas que realizan actividades de innovación de co-exploración con el SENA tienen una mayor capacidad de exploración.

H_{1b3} : Las empresas que realizan actividades de innovación de co-exploración con el SENA tienen una mayor capacidad de absorción.

H_{1b4} : Las empresas que realizan actividades de innovación de co-exploración con el SENA tienen una mayor capacidad de alianzas.

H_{1b5}: Las empresas que realizan actividades de innovación de co-exploración con el SENA tienen una mayor capacidad de co-explotación.

H_{1b6}: Las empresas que realizan actividades de innovación de co-exploración con el SENA tienen una mayor capacidad de co-exploración.

A partir de los servicios tecnológicos asociados con los programas de formación y el programa SENNOVA se espera que las empresas que colaboran para innovar con el SENA puedan tener un mayor desempeño. En este sentido, planteamos las siguientes hipótesis:

H_{2a}: Las empresas que realizan actividades de innovación de co-explotación con el SENA tienen un mayor desempeño.

H_{2b}: Las empresas que realizan actividades de innovación de co-exploración con el SENA tienen un mayor desempeño.

De otra parte, Mishra y Shah (2009) encontraron que la competencia colaborativa tiene un impacto directo en el desempeño de los proyectos; sin embargo, su impacto en el desempeño del mercado es indirecto mediado por el desempeño del proyecto. En este sentido, los resultados sugieren que alcanzar un desempeño superior en el mercado producto de la implicación inter e intra-organizacional es acorde con obtener un desempeño superior en el proyecto. Por ello, planteamos las siguientes hipótesis:

H₃: Las empresas que realizan actividades de innovación en colaboración con otras tienen un mayor desempeño en los proyectos de innovación con participación del SENA.

H_{3a}: Las empresas que realizan actividades de innovación de co-explotación tienen un mayor desempeño en los proyectos de innovación con participación del SENA.

H_{3b}: Las empresas que realizan actividades de innovación de co-exploración tienen un mayor desempeño en los proyectos de innovación con participación del SENA.

Metodología

La literatura empírica sobre la dialéctica entre exploración y explotación ha analizado en ocasiones los portafolios de todas las relaciones de las empresas (Kauppila, 2015), en otras las relaciones con grupos específicos de socios (Zeng et al., 2010) e incluso un tipo de relación en particular (Im & Rai, 2008). En nuestro estudio, se analiza un tipo de relación en particular, por considerar

que puede tener una mayor especificidad sobre los factores que afectan la ambidestreza organizacional frente al portafolio global de las relaciones de la firma. En este sentido, la muestra corresponde a empresas de sectores industriales que hayan tenido en los últimos tres años acuerdos colaborativos inter-organizacionales de carácter formal o informal para ejecutar proyectos de innovación de producto, proceso, mercadotecnia u organización (OCDE, 2005). Las relaciones inter-organizacionales deben haber permitido compartir o co-desarrollar conocimiento para complementar esfuerzos internos de innovación (Faems, Janssens, & Neyens, 2012). De acuerdo con la Clasificación Industrial Uniforme de todas las actividades económicas adaptadas para Colombia (i.e. CIIU Revisión 4 A.C.), los códigos de las empresas a encuestar correspondieron a la sección C de industrias manufactureras divisiones 10 a la 33 (e.g. elaboración de productos alimenticios, elaboración de bebidas, química y farmacéuticos, fabricación de productos de caucho y plástico, fabricación de productos elaborados de metal, fabricación de vehículos, entre otras). Los datos de contacto de las empresas se obtuvieron mediante el Sistema de Información y Reporte Empresarial - SIREM (Sociedades, 2012). De las 27.032 empresas reportadas 4.622 correspondían a empresas de manufactura. En total se creó un directorio con 4.287 empresas. Las otras 335 empresas no presentaban información de contacto o tenían un nivel de ventas de cero.

El proceso de recolección de datos de la muestra de empresas se llevó a cabo mediante las siguientes etapas: 1) contacto telefónico, 2) envío de invitación a participar en el estudio, 3) concertación de la cita y 4) realización de la entrevista. De las 4.287 empresas fueron contactadas 2.996. En 268 casos, las empresas se negaron a participar del estudio para una tasa de rechazo del 9%. En el primer contacto telefónico se obtuvo información sobre si las empresas habían realizado proyectos de innovación de producto, procesos productivos, procesos administrativos y/o gestión o mercadeo en los últimos tres años. En 426 de los 2.728 casos no fue posible establecer la condición innovadora de la empresa. Posteriormente, a las empresas innovadoras se les preguntaba si los proyectos los habían hecho en colaboración con otras organizaciones. De este modo, se identificaron 1.622 empresas no innovadoras, 462 empresas innovadoras por sí solas y 218 empresas con proyectos de innovación en colaboración con otras organizaciones. Durante la llamada telefónica se obtenían los datos de contacto de la persona a contactar que conociera sobre el proyecto de innovación. En 580 de las 680 empresas innovadoras se logró contactar a la persona indicada. En la segunda fase se le enviaba un correo

electrónico a la persona referida, con una carta invitándola a participar de la investigación. En una tercera fase, una vez se contó con una respuesta afirmativa, se llamó a la persona para concertar la cita. Para la cuarta fase, se utilizaron tres métodos para la recolección de los datos: 1) entrevista presencial, 2) entrevista telefónica y 3) cuestionario virtual. El trabajo de campo inició en julio de 2014 y terminó en febrero de 2015.

En total se obtuvieron 330 encuestas. De ellas, se anularon 49, 23 presenciales y telefónicas y 26 virtuales. 16 correspondían a empresas micro de 10 o menos empleados, en las que las características personales se pueden confundir con las características de la empresa. 15 concernían a empresas que habían manifestado ser innovadoras o innovadoras en colaboración, pero al realizar la encuesta no lo eran según las preguntas filtro del cuestionario. 15 estaban repetidas ya que fueron respondidas por dos o más personas de la misma empresa, 10 de ellas virtuales, de las cuales se escogieron las que habían sido respondidas por la persona de mayor rango jerárquico en la empresa. Adicionalmente, tres empresas pertenecían a sectores cuya actividad principal no era la manufactura. En resumen, se obtuvieron datos de 281 empresas, 134 encuestas mediante entrevista presencial, 116 de manera telefónica y 31 virtuales. Al comparar los datos obtenidos por medio de entrevista presencial con los telefónicos y virtuales, mediante un análisis de varianza de las medias de las variables de explotación ($F=2,490$, $p=0,116$), exploración ($F=0,365$, $p=0,546$) y desempeño ($F=0,393$, $p=0,531$), no se encontraron diferencias significativas. Por ello, se utilizaron las observaciones de los tres métodos de recolección de datos al estimar que el método de recogida no introducía sesgos relevantes.

El 38% fueron empresas pequeñas en número de empleados (≤ 50), 41% empresas medianas (>50 y ≤ 200) y 21% empresas grandes (>200). Las entrevistas estuvieron dirigidas a los gerentes y directivos de las empresas en las principales ciudades de Colombia (Bogotá D.C., Medellín, Cali, Barranquilla, Cartagena D.T., Bucaramanga, entre otras). El conocimiento sobre los aspectos tratados en el cuestionario de las personas a entrevistar se controló al preguntar por su tiempo de permanencia en la empresa, el cual fue en promedio de 10 años. Por su parte, el promedio de permanencia en el sector fue de 14 años. Además, los encuestados calificaron su grado de conocimiento sobre los temas consultados con un promedio de 8 en una escala de cero a diez.

En la investigación se preguntó a las empresas si habían utilizado o se habían apoyado en el SENA para

realizar las innovaciones de explotación y/o exploración. Para medir los diferentes conceptos se utilizaron escalas tipo Likert. La escala empleada para medir el desempeño de la firma está basada en el modelo de efectividad de objetivos racionales propuesto por Quinn y Rohrbaugh (1983) y en las dimensiones propuestas por Kumar, Stern y Achrol (1992). En esta escala se preguntó por el grado de satisfacción con el desempeño de la empresa durante los últimos tres años, siendo cero completamente insatisfecho y diez completamente satisfecho. Para medir las capacidades de innovación de explotación y exploración se utilizaron las escalas planteadas por Atuahene-Gima (2005), siendo cero en ninguna medida y diez en grado máximo. La escala de capacidad de absorción está basada en la operacionalización realizada por Chen et al. (2009) y las dimensiones propuestas por Zahra y George (2002). La escala de capacidad de alianzas está basada en las dimensiones propuestas por Hernández-Espallardo et al. (2011) a partir de Draulans y Volberda (2003), siendo cero total desacuerdo y diez total acuerdo (ver Tabla 1).

Por su parte, las escalas utilizadas para medir los conceptos de interés referidos al proyecto de innovación colaborativa sobre el que se pregunta también se deducen de la literatura existente. Así, la escala de desempeño está basada en las dimensiones de satisfacción del proyecto propuestas por Bstieler (2006). Las escalas de adaptación de la colaboración y de la satisfacción y disposición a continuar una vez concluida la colaboración están sustentadas en las dimensiones propuestas por Heide (1994) y Rindfleisch y Heide (1997), siendo cero total desacuerdo y diez total acuerdo (ver Tabla 2).

Los resultados obtenidos sugieren un buen ajuste de los modelos de medición de las dimensiones en el nivel de la firma y del proyecto de innovación, lo que indica la unidimensionalidad de los conceptos medidos (Anderson & Gerbing, 1988). Los valores fiabilidad representados por el Alfa de Cronbach superan el valor de 0,70 recomendado por Hair, Black, Babin y Anderson (2010). Al realizar un análisis factorial confirmatorio se verificó la fiabilidad y validez convergente y discriminante de las escalas utilizadas. Los valores de fiabilidad compuesta de las escalas (*Scale Composite reliability* -SCR) superan en todos los casos el mínimo recomendado de 0,70 (Bagozzi & Yi, 2012). La totalidad de los ítems que componen los conceptos tienen cargas factoriales altamente significativas y las cargas factoriales estandarizadas de un mismo factor son iguales o superiores a 0,5 y, en algunos casos, iguales o superiores a 0,7, lo que sugiere validez convergente (Hair et al., 2010).

Tabla 1. Fiabilidad de las escalas de la firma

Descripción del ítem	Coeficientes estandarizados (valor de t) sub-muestra		Fiabilidad explotación/exploración
	explotación	exploración	
Desempeño de objetivos racionales			
Expresa su grado de satisfacción con el desempeño de su empresa durante los 3 últimos años en:			
P13_1. Rentabilidad	0,81 (15,16)	0,88 (16,41)	$\alpha = 0,86/0,86$ SCR=0,86/0,86
P13_2. Ventas	0,89 (17,37)	0,89 (16,81)	
P13_3. Cuota de mercado	0,77 (14,16)	0,73 (12,52)	
P13_4. Productividad	0,63 (10,87)	0,59 (9,53)	
Explotación			
Expresa en qué medida su empresa ha realizado las siguientes actividades durante los últimos 3 años			
P6_1. Ha buscado nuevos mercados para sacar provecho de sus productos y/o tecnologías actuales.	0,57 (8,85)	0,55 (7,85)	$\alpha = 0,74/0,70$ SCR=0,74/0,70
P6_2. Ha actualizado sus conocimientos en productos y tecnologías a partir de experiencias previas.	0,68 (10,87)	0,56 (8,03)	
P6_3. Ha invertido en mejorar la productividad de las operaciones apoyándose en tecnología ya dominada por la empresa.	0,63 (9,98)	0,60 (8,62)	
P6_4. Para los problemas de sus clientes ha buscado soluciones que están próximas a las ya existentes.	0,56 (8,67)	0,55 (7,89)	
P6_5. Ha desarrollado nuevos productos en áreas en los que la empresa posee una experiencia significativa.	0,58 (9,00)	0,57 (8,16)	
Exploración			
P8_1. Ha explorado productos y/o mercados hasta ese momento desconocidos para la empresa.	0,70 (12,09)	0,70 (12,09)	$\alpha = 0,84/0,77$ SCR=0,84/0,78
P8_2. Ha adquirido habilidades organizativas y de gestión absolutamente nuevas.	0,68 (11,70)	0,68 (11,70)	
P8_3. Ha desarrollado productos y/o tecnologías hasta ese momento desconocidos por la empresa.	0,80 (14,45)	0,80 (14,45)	
P8_4. Ha fortalecido sus habilidades de innovación en áreas donde no tenía una experiencia previa.	0,84 (15,56)	0,84 (15,56)	
Capacidad de absorción			
Expresa su acuerdo o desacuerdo con las siguientes afirmaciones:			
P12_1. Identificar y adquirir el conocimiento externo que necesita.	0,86 (16,72)	0,83 (15,14)	$\alpha = 0,88/0,87$ SCR=0,89/0,87
P12_2. Entender, analizar e interpretar el nuevo conocimiento externo.	0,91 (18,25)	0,91 (17,45)	
P12_3. Combinar su conocimiento interno con el nuevo conocimiento externo.	0,82 (15,73)	0,80 (14,47)	
P12_4. Realizar una aplicación comercial a partir del nuevo conocimiento externo.	0,65 (11,30)	0,63 (10,36)	
Capacidad de alianzas			
Expresa su acuerdo o desacuerdo con las siguientes afirmaciones:			
P10_1. Su empresa tiene una larga tradición de colaboración en innovaciones con otras organizaciones.	0,67 (11,78)	0,67 (11,16)	$\alpha = 0,87/0,87$ SCR=0,87/0,87
P10_2. Tiene organizaciones a las que considera sus socios estratégicos para innovar.	0,74 (13,46)	0,77 (13,40)	
P10_3. Usted y/o su personal es experto en tratar con socios a la hora de desarrollar e implementar innovaciones.	0,86 (16,74)	0,87 (16,03)	
P10_4. Su empresa analiza continuamente lo que hace bien y mal en sus alianzas con socios.	0,76 (13,97)	0,75 (13,02)	
P10_5. Su empresa traslada lo aprendido en unas relaciones de colaboración para innovar a la forma de trabajo en otras relaciones.	0,77 (14,07)	0,75 (12,96)	

Estadísticos del modelo de medición de 22 indicadores para 5 constructos:

Sub-muestra explotación $\chi^2_{(199)}=434,87$; GFI=0,87; RMSEA=0,069; SRMR=0,056; CFI=0,95; NNFI=0,94.
Sub-muestra exploración $\chi^2_{(199)}=407,72$; GFI=0,87; RMSEA=0,066; SRMR=0,055; CFI=0,94; NNFI=0,93.

Fuente: Los autores.

Tabla 2. Fiabilidad de las escalas del proyecto de innovación

Descripción del ítem	Coeeficientes estandarizados	Valor de t	Fiabilidad
En la colaboración con el socio principal del proyecto, manifieste su grado de acuerdo o desacuerdo con las siguientes afirmaciones:			
Satisfacción de la colaboración			$\alpha = 0,91$
P24_1. Los resultados y beneficios obtenidos cumplieron las expectativas.	0,78	13,24	SCR=0,91
P24_2. Se alcanzaron las metas que se establecieron.	0,75	12,68	
P24_3. El tiempo y esfuerzo invertido en el desarrollo y mantenimiento de la relación de colaboración valió la pena.	0,80	13,92	
P24_4. La relación de colaboración con el socio fue productiva.	0,88	15,99	
P24_5. La empresa quedó satisfecha con esta relación de colaboración.	0,87	15,72	
Adaptación de la colaboración			$\alpha = 0,89$
P19_15. Las actividades se adaptaban en todo momento a los cambios en las circunstancias del proyecto.	0,60	9,93	SCR=0,75
P19_16. Se trabajaba conjuntamente para resolver cualquier circunstancia inesperada que pudiera suceder.	0,75	15,57	
P19_17. La otra parte estaba muy abierta a comprender las particularidades de su empresa y actuar en consecuencia.	0,90	16,24	
P19_18. Se podría decir que el nivel de flexibilidad de la colaboración para afrontar los cambios era alto.	0,89	16,00	
Satisfacción y disposición a continuar			$\alpha = 0,81$
P23_1. Aumentó el interés por seguir colaborando con el mismo socio.	0,81	12,25	SCR=0,87
P23_2. Aumentó el interés por colaborar con otros socios del mismo tipo.	0,67	9,87	
P23_3. Aumentó el interés por colaborar para innovar con cualquier tipo de organización.	0,64	9,30	
Estadísticos del modelo de medición de 12 indicadores para 3 constructos: $\chi^2_{(51)}=142,65$; GFI=0,90; RMSEA=0,091; SRMR=0,058; CFI=0,97; NNFI=0,96.			

Fuente: Los autores.

De acuerdo con Anderson y Gerbing (1988), si el intervalo de confianza (± 2 veces el error estándar) al 95% para las correlaciones entre los constructos no incluye el valor de uno, existirá validez discriminante. Al adoptar un criterio más restrictivo para la comprobación de la validez discriminante, a partir de la estimación del valor superior del intervalo de confianza de la mayor correlación entre dos constructos al 99% (i.e. tres veces el error estándar del máximo ϕ), el mayor nivel superior de los intervalos de confianza no incluyó el uno en ningún caso, por lo que se concluyó que existe validez discriminante (Anderson & Gerbing, 1988).

Para medir la co-explotación y co-exploración se utilizó un solo ítem, en el cual se preguntaba a las

empresas por la medida en que habían colaborado con otras organizaciones para desarrollar conjuntamente las innovaciones de explotación y/o exploración, siendo cero en ninguna medida y diez en grado máximo. La utilización de medidas de un solo ítem se basa en el procedimiento C-OAR-SE (*Construct definition, Object classification, Attribute classification, Rater identification, Scale formation, and Enumeration and reporting*) propuesto por Rossiter (2002), que plantea que un solo ítem es suficiente si en la mente de los evaluadores o encuestados el elemento es singular y concreto, uniforme y fácil de imaginar. En estos casos, se sugiere que un buen ítem aporta más información que varios de inferior calidad sinónimos del principal (Bergkvist & Rossiter, 2007). En nuestro caso, se entiende que una vez está claro que la empresa hace explotación

(o exploración), la co-explotación (o co-exploración) es un concepto lo suficientemente claro, concreto y singular para dar respuesta mediante un solo ítem sin dar lugar a ambigüedades. Creemos que la información obtenida no habría sido más completa añadiendo más ítems al constructo. Así se comprobó en el pre-test del cuestionario.

A continuación, para el contraste de las hipótesis se analiza el desempeño de la firma y del proyecto a partir de un tipo de relación (co-exploración y/o co-explotación) con un actor específico denominado SENA, que representa a una entidad gubernamental del tipo interface frente al desempeño obtenido con otros actores.

Resultados

Co-explotación con el SENA

261 empresas reportaron actividades de explotación para el desarrollo de innovaciones basadas en conocimientos existentes. De ellas, un 54% llevó a cabo actividades de colaboración con el SENA para complementar sus esfuerzos internos de innovación en actividades de explotación. Las comparaciones de las medias de las variables se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. ANOVA Co-explotación Empresas y SENA

Variable	Media SENA	Media Otros	Diferencia medias	Valor (F)	Valor (p)		Hipótesis	Resultado
Explotación	7,78	7,68	0,10	0,472	0,493		H _{1a1}	No soportada
Exploración	6,31	5,67	0,64	6,148	0,014	*	H _{1a2}	Soportada
Capacidad de absorción	7,63	7,53	0,10	0,349	0,555		H _{1a3}	No soportada
Capacidad de alianzas	5,78	4,61	1,17	16,975	0,000	**	H _{1a4}	Soportada
Co-explotación	5,23	3,82	1,41	17,755	0,000	**	H _{1a5}	Soportada
Co-exploración	5,11	4,12	0,99	8,387	0,004	**	H _{1a6}	Soportada
Desempeño/rentabili- dad	7,43	6,98	0,45	4,474	0,035	*	H _{2a}	Soportada

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$

Fuente: Los autores.

Los resultados indican que aquellas empresas que co-explotan con el SENA tienen mayores niveles de exploración, capacidad de alianzas, co-explotación, co-exploración y desempeño en términos de rentabilidad que aquellas que no. En cuanto a la explotación y capacidad de absorción no se encontraron diferencias significativas a nivel del concepto global a favor del SENA, pero sí en aspectos relacionados con buscar soluciones próximas a las ya existentes para los problemas de sus clientes y con realizar una aplicación comercial a partir del nuevo conocimiento externo. Estos aspectos denotan el carácter de investigación aplicada del SENA.

Co-exploración con el SENA

En total 239 empresas reportaron actividades de exploración para el desarrollo de innovaciones basadas en conocimientos nuevos para la empresa. De ellas, un 54% llevó a cabo actividades de colaboración con el SENA para complementar sus esfuerzos internos de innovación en actividades de exploración. Las comparaciones de las medias de las variables se presentan en la Tabla 4.

Los resultados sugieren que aquellas empresas que co-exploran con el SENA tienen mayores niveles de exploración, capacidad de alianzas, co-explotación, co-exploración y desempeño en términos de rentabilidad y ventas que aquellas que no. En cuanto a la explotación y la capacidad de absorción no se encontraron diferencias significativas a favor del SENA, sólo en aspectos relacionados con adquirir habilidades organizativas y de gestión, desarrollar productos y/o tecnologías desconocidas hasta ese momento para la empresa, y la identificación y adquisición del conocimiento externo que necesita. Estos aspectos evidencian el rol del SENA en la incorporación de conocimiento nuevo en las organizaciones.

Proyectos de innovación con el SENA

En la muestra de 281 empresas no se observaron diferencias significativas en el desempeño de los proyectos de innovación en los que participó el SENA (27 proyectos de 223, 12%) y en los que no. Asimismo, en cuanto al desempeño de los proyectos de innovación de las empresas que co-explotaron con el SENA no se observaron diferencias

significativas (22 de 209, 10%). Sin embargo, con respecto al desempeño de los proyectos de innovación de las empresas que co-exploraron con el SENA, se observaron diferencias

significativas a favor de las otras empresas (20 de 194, 10%). En todos los casos no se soportan las hipótesis referidas al desempeño de los proyectos de innovación (ver Tabla 5).

Tabla 4. ANOVA Co-exploración Empresas y SENA

Variable	SENA	Otros	Diferencia medias	Valor (F)	Valor (p)		Hipótesis	Resultado
Explotación	7,87	7,83	0,04	0,069	0,793		H _{1b1}	No soportada
Exploración	6,58	6,10	0,48	4,730	0,031	*	H _{1b2}	Soportada
Capacidad de absorción	7,74	7,63	0,11	0,421	0,517		H _{1b3}	No soportada
Capacidad de alianzas	5,90	4,87	1,03	12,414	0,001	**	H _{1b4}	Soportada
Co-explotación	5,15	4,13	1,02	8,241	0,004	**	H _{1b5}	Soportada
Co-exploración	5,08	4,21	0,87	6,473	0,012	*	H _{1b6}	Soportada
Desempeño/rentabilidad	7,49	7,13	0,36	4,417	0,037	*	H _{2b}	Soportada
Desempeño/ventas	7,66	7,17	0,49	5,975	0,015	*	H _{2b}	Soportada

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$

Fuente: Los autores.

Tabla 5. ANOVA Proyectos de innovación Empresas y SENA

Variable	SENA	Otros	Diferencia medias	Valor (F)	Valor (p)	Hipótesis	Resultado
Desempeño proyectos de innovación	8,24	8,50	-0,26	1,142	0,286	H ₃	No soportada
Desempeño proyectos/co-explotación	8,02	8,44	-0,42	2,331	0,128	H _{3a}	No soportada
Desempeño proyectos/co-exploración	8,02	8,47	-0,45	2,745	0,099	* H _{3b}	No soportada

* $p < 0,1$

Fuente: Los autores.

En un análisis post-hoc de los proyectos de innovación con respecto a las empresas que co-explotan con el SENA, se observaron diferencias significativas a favor del SENA en aspectos relacionados con considerar que la relación de colaboración con el socio fue productiva ($\mu_{\text{SENA}}=8,92$, $\mu_{\text{OtrosT}}=8,56$; $F=4,831$, $p=0,029$). Asimismo, en las variables forma de cooperación con el socio principal que indica un mayor nivel de participación del personal de la empresa ($\mu_{\text{SENA}}=0,85$, $\mu_{\text{OtrosT}}=0,75$; $F=3,355$, $p=0,068$), y en la satisfacción y disposición a continuar una vez concluida la colaboración ($\mu_{\text{SENA}}=8,04$, $\mu_{\text{OtrosT}}=7,65$; $F=3,345$, $p=0,069$). En contraste, la adaptación de la colaboración es menor en los proyectos en los que participa el SENA ($\mu_{\text{SENA}}=8,02$, $\mu_{\text{OtrosT}}=8,32$; $F=3,220$, $p=0,074$). Los resultados indican que aquellas empresas que llevan a cabo proyectos de innovación y que usualmente co-explotan con el SENA tienen una relación de colaboración productiva, cooperan más significativamente con las empresas que colaboran,

tienen una mayor satisfacción y disposición a continuar colaborando con otros socios del mismo tipo. Por el contrario, presentan una menor adaptación a los cambios en la relación de colaboración.

En relación con los proyectos de innovación de las empresas que co-exploran con el SENA, se notaron diferencias significativas a favor del SENA en la forma de cooperación con el socio principal con mayor participación de los empleados de la empresa ($\mu_{\text{SENA}}=0,86$, $\mu_{\text{OtrosR}}=0,734$; $F=4,823$, $p=0,029$), y siendo menor para el SENA en la adaptación de la colaboración ($\mu_{\text{SENA}}=7,99$, $\mu_{\text{OtrosR}}=8,38$; $F=5,602$, $p=0,019$). Los resultados sugieren que aquellas empresas que llevan a cabo proyectos de innovación y que usualmente co-exploran con el SENA, cooperan más significativamente con las empresas que colaboran, y presentan una menor adaptación a los cambios de la relación de colaboración, lo cual podría contribuir a explicar el

menor desempeño en los proyectos de co-exploración que requieren más ajustes en el transcurso de la colaboración.

Discusión y conclusiones

La presente investigación busca determinar si las entidades gubernamentales como el SENA pueden tener un impacto significativo sobre las capacidades y desempeño de las firmas, en este caso, en empresas del sector manufacturero que desarrollan proyectos de innovación en colaboración con otras organizaciones. En el caso particular de las organizaciones que colaboran para desarrollar innovaciones de explotación y/o exploración con el SENA y aquellas que no, encontramos diferencias significativas a favor del SENA en los aspectos relacionados con: la capacidad de realizar actividades de innovación de exploración, la capacidad de alianzas, la co-explotación, la co-exploración y el desempeño.

Específicamente en las empresas que desarrollan actividades de co-explotación con el SENA se encontró un mayor desempeño en términos de rentabilidad, y en las empresas que desarrollan actividades de co-exploración con el SENA se observó un mayor desempeño en términos de rentabilidad y ventas. Con relación a los proyectos de innovación si bien no se hallaron diferencias significativas en cuanto al desempeño de los proyectos en general y de co-explotación, si se observaron diferencias a favor de la colaboración con otras empresas en el desempeño de los proyectos de co-exploración. Además, se evidenciaron diferencias a favor del SENA en términos de una cooperación con el socio principal con mayor participación del personal de la empresa. Asimismo, se observó una menor capacidad de adaptación de la colaboración en las empresas que co-explotan y co-exploran con el SENA. Esto podría explicarse por los trámites administrativos que experimentan las empresas al tener que realizar cambios en los proyectos con entidades gubernamentales que tienen procedimientos estrictos y que requieren de la aprobación de diversas instancias. Esto hace que sea difícil adaptar la colaboración a los cambios que se puedan presentar durante la ejecución del proyecto de innovación, en especial, cuando se trata de proyectos de co-exploración, donde la incertidumbre y la probabilidad de que se susciten cambios es mayor. En cuanto a la satisfacción y disposición a continuar al finalizar la colaboración, se obtuvieron resultados significativos a favor del SENA en las empresas que co-explotan con esta entidad.

Los resultados de este estudio concuerdan con los obtenidos por Zeng, Xie y Tam (2010), si se considera al

SENA más que como una entidad gubernamental con funciones de servicios de información, innovación y/o supervisión, como una interface o intermediario de tecnología por transferencia, o como una organización de investigación y desarrollo del tipo de centro de investigación aplicada o instituto técnico. Con respecto a la ambidestreza organizacional las relaciones de colaboración con el SENA contribuyen principalmente con la capacidad de exploración. A nivel inter-organizacional colaborar con el SENA favorece la co-explotación, la co-exploración y la capacidad de alianzas. De este modo, se soportan los resultados obtenidos previamente por Kauppila (2010; 2015) sobre los beneficios de establecer relaciones de colaboración inter-organizacionales para crear ambidestreza organizacional y mejorar el desempeño. En este sentido, se contribuye con el conocimiento sobre cuándo y cómo es posible incrementar el desempeño mediante las actividades de explotación y exploración realizadas en colaboración con otras organizaciones (Junni, Sarala, Taras & Tarba, 2013), y además, con una unidad de análisis ampliada que incorpora parte del ecosistema de la firma según lo sugerido por O'Reilly III y Tushman (2013).

En cuanto a las limitaciones, con respecto a los proyectos de innovación habría sido deseable contar con un mayor número de proyectos de innovación con participación del SENA. Esto debido a que la muestra utilizada corresponde a una muestra nacional de empresas e incluye a las demás entidades con las que se puede colaborar para innovar. En cuanto a las diferencias de medias encontradas no significan necesariamente una relación de causalidad. Futuros proyectos de investigación pueden centrarse en explicar las diferencias encontradas y sus causas, mediante modelos que vinculen las variables utilizadas. Asimismo, en determinar en qué tipos de empresas según su tamaño o sector productivo se obtienen los mejores resultados de la colaboración con el SENA en actividades de innovación.

Agradecimientos

Los autores agradecen el aporte económico de la Universidad del Valle, Colombia (proyecto número: C.I. 8112), Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Colombia, Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria ASTIN, Colombia (proyecto número: 0288-2013), Ministerio de Economía y Competitividad de España, y la Universidad de Murcia (proyecto número: ECO2013-47969-P). Asimismo, los comentarios de los revisores anónimos que permitieron mejorar la calidad del artículo.

Referencias

- Adler, P. S., Goldoftas, B., & Levine, D. I. (1999). Flexibility versus efficiency? A case study of model changeovers in the Toyota production system. *Organization science*, 10(1), 43-68. doi: <https://doi.org/10.1287/orsc.10.1.43>
- Anderson, J. C., & Gerbing, D. W. (1988). Structural equation modeling in practice: A review and recommended two-step approach. *Psychological Bulletin*, 103(3), 411-423. doi: <https://doi.org/10.1037/0033-2909.103.3.411>
- Andriopoulos, C., & Lewis, M. W. (2009). Exploitation-Exploration Tensions and Organizational Ambidexterity: Managing Paradoxes of Innovation. *Organization Science*, 20(4), 696-717. doi: <https://doi.org/10.1287/orsc.1080.0406>
- Atuahene-Gima, K. (2005). Resolving the capability—rigidity paradox in new product innovation. *Journal of Marketing*, 69(4), 61-83. doi: <https://doi.org/10.1509/jmkg.2005.69.4.61>
- Bagozzi, R. P., & Yi, Y. (2012). Specification, evaluation, and interpretation of structural equation models. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 40(1), 8-34. doi: <https://doi.org/10.1007/s11747-011-0278-x>
- Barney, J. (1991). Firm Resources and Sustained Competitive Advantage. *Journal of Management*, 17(1), 99-120. doi: <https://doi.org/10.1177/014920639101700108>
- Benner, M. J., & Tushman, M. L. (2003). Exploitation, exploration, and process management: The productivity dilemma revisited. *Academy of Management Review*, 28(2), 238-256. doi: <https://doi.org/10.5465/AMR.2003.9416096>
- Benner, M. J., & Tushman, M. L. (2015). Reflections on the 2013 decade-award --"Exploitation, exploration, and process management: the productivity dilemma revisited" Ten years later. *Academy of Management Review*, 40(4), 497-514. doi: <https://doi.org/10.5465/amr.2015.0042>
- Bergkvist, L., & Rossiter, J. R. (2007). The predictive validity of multiple-item versus single-item measures of the same constructs. *Journal of marketing research*, 44(2), 175-184. doi: <https://doi.org/10.1509/jmkr.44.2.175>
- Biao, S., & Yi-Ju, L. (2014). Achieving alliance ambidexterity through managing paradoxes of cooperation. *European Journal of Innovation Management*, 17(2), 144-165. doi: <https://doi.org/10.1108/EJIM-01-2013-0011>
- Bstieler, L. (2006). Trust Formation in Collaborative New Product Development*. *Journal of Product Innovation Management*, 23(1), 56-72. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1540-5885.2005.00181.x>
- Chen, Y.-S., Lin, M.-J. J., & Chang, C.-H. (2009). The positive effects of relationship learning and absorptive capacity on innovation performance and competitive advantage in industrial markets. *Industrial Marketing Management*, 38(2), 152-158. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2008.12.003>
- DANE. (2011). Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica en la Industria Manufacturera 'EDIT V' 2009-2010. Bogotá D.C. : DANE Recuperado de https://formularios.dane.gov.co/Anda_4_1/index.php/catalog/218.
- DANE. (2013). Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica en la Industria Manufacturera 'EDIT VI' 2011-2012. Bogotá D.C.: DANE Recuperado de https://formularios.dane.gov.co/Anda_4_1/index.php/catalog/357.
- DANE. (2015). *Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica en la Industria Manufacturera 'EDIT VII' 2013-2014*. Bogotá D.C. Retrieved from https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/edit/boletin_EDIT_Manufacturera_2013_2014.pdf
- Draulans, J., & Volberda, H. W. (2003). Building alliance capability: Management techniques for superior alliance performance. *Long Range Planning*, 36(2), 151-166. doi: [https://doi.org/10.1016/S0024-6301\(02\)00173-5](https://doi.org/10.1016/S0024-6301(02)00173-5)

- Easterby-Smith, M., & Prieto, I. M. (2008). Dynamic Capabilities and Knowledge Management: an Integrative Role for Learning?*. *British Journal of Management*, 19(3), 235-249. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8551.2007.00543.x>
- Faems, D., Janssens, M., & Neyens, I. (2012). Alliance Portfolios and Innovation Performance Connecting Structural and Managerial Perspectives. *Group & Organization Management*, 37(2), 241-268. doi: <https://doi.org/10.1177/1059601112441246>
- Grant, R. M. (1996). Toward a knowledge-based theory of the firm. *Strategic Management Journal*, 17(S2), 109-122. doi: <https://doi.org/10.1002/smj.4250171110>
- Gupta, A. K., Smith, K. G., & Shalley, C. E. (2006). The interplay between exploration and exploitation. *Academy of Management Journal*, 49(4), 693-706. doi: <https://doi.org/10.5465/AMJ.2006.22083026>
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2010). *Multivariate data analysis* (Seventh ed.): Pearson Prentice Hall.
- He, Z. L., & Wong, P. K. (2004). Exploration vs. exploitation: An empirical test of the ambidexterity hypothesis. *Organization science*, 15(4), 481-494. doi: <https://doi.org/10.1287/orsc.1040.0078>
- Heide, J. B. (1994). Interorganizational governance in marketing channels. *The Journal of Marketing*, 58(1), 71-85. doi: <https://doi.org/10.2307/1252252>
- Hernández-Espallardo, M., Sánchez-Pérez, M., & Segovia-López, C. (2011). Exploitation-and exploration-based innovations: The role of knowledge in inter-firm relationships with distributors. *Technovation*, 31(5), 203-215. doi: <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2011.01.007>
- Im, G., & Rai, A. (2008). Knowledge Sharing Ambidexterity in Long-Term Interorganizational Relationships. *Management Science*, 54(7), 1281-1296. doi: <https://doi.org/10.1287/mnsc.1080.0902>
- Jansen, J. J. P., Tempelaar, M. P., van den Bosch, F. A. J., & Volberda, H. W. (2009). Structural Differentiation and Ambidexterity: The Mediating Role of Integration Mechanisms. *Organization Science*, 20(4), 797-811. doi: <https://doi.org/10.1287/orsc.1080.0415>
- Jansen, J. J. P., Van Den Bosch, F. A. J., & Volberda, H. W. (2006). Exploratory Innovation, Exploitative Innovation, and Performance: Effects of Organizational Antecedents and Environmental Moderators. *Management Science*, 52(11), 1661-1674. doi: <https://doi.org/10.1287/mnsc.1060.0576>
- Junni, P., Sarala, R., Taras, V., & Tarba, S. (2013). Organizational Ambidexterity and Performance: A Meta-Analysis. *The Academy of Management Perspectives*. doi: <https://doi.org/10.5465/amp.2012.0015>
- Kauppila, O.-P. (2010). Creating ambidexterity by integrating and balancing structurally separate interorganizational partnerships. *Strategic organization*, 8(4), 283-312. doi: <https://doi.org/10.1177/1476127010387409>
- Kauppila, O.-P. (2015). Alliance Management Capability and Firm Performance: Using Resource-based Theory to Look Inside the Process Black Box. *Long Range Planning*, 48(3), 151-167. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2013.08.006>
- Kogut, B., & Zander, U. (1992). Knowledge of the firm, combinative capabilities, and the replication of technology. *Organization science*, 3(3), 383-397. doi: <https://doi.org/10.1287/orsc.3.3.383>
- Kogut, B., & Zander, U. (1996). What firms do? Coordination, identity, and learning. *Organization science*, 7(5), 502-518. doi: <https://doi.org/10.1287/orsc.7.5.502>
- Kristal, M. M., Huang, X., & Roth, A. V. (2010). The effect of an ambidextrous supply chain strategy on combinative competitive capabilities and business performance. 28(5), 415-429. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jom.2009.12.002>

- Kumar, N., Stern, L. W., & Achrol, R. S. (1992). Assessing Reseller Performance From the Perspective of the Supplier. *Journal of Marketing Research*, 29(2), 238-253. doi: <https://doi.org/10.2307/3172573>
- Lavie, D., Stettner, U., & Tushman, M. L. (2010). Exploration and Exploitation Within and Across Organizations. *Academy of Management Annals*, 4(1), 109-155. doi: <https://doi.org/10.1080/19416521003691287>
- Levinthal, D. A., & March, J. G. (1993). The myopia of learning. *Strategic Management Journal*, 14(S2), 95-112. doi: <https://doi.org/10.1002/smj.4250141009>
- Levitt, B., & March, J. G. (1988). Organizational Learning. *Annual Review of Sociology*, 14, 319-340. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.so.14.080188.001535>
- Lubatkin, M. H., Simsek, Z., Ling, Y., & Veiga, J. F. (2006). Ambidexterity and performance in small-to medium-sized firms: The pivotal role of top management team behavioral integration. *Journal of Management*, 32(5), 646-672. doi: <https://doi.org/10.1177/0149206306290712>
- López Zapata, E., García Muiña, F. E., & García Moreno, S. M. (2012). De la organización que aprende a la organización ambidiestra: evolución teórica del aprendizaje organizativo. *Cuadernos de Administración*, 25(45), 11-37.
- March, J. G. (1991). Exploration and Exploitation in Organizational Learning. *Organization Science*, 2(1), 71-87. doi: <https://doi.org/10.1287/orsc.2.1.71>
- Mishra, A. A., & Shah, R. (2009). In union lies strength: Collaborative competence in new product development and its performance effects. *Journal of Operations Management*, 27(4), 324-338. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jom.2008.10.001>
- O'Reilly III, C. A., & Tushman, M. L. (2008). Ambidexterity as a dynamic capability: Resolving the innovator's dilemma. *Research in Organizational Behavior*, 28, 185-206. doi: <https://doi.org/10.1016/j.riob.2008.06.002>
- O'Reilly III, C. A., & Tushman, M. L. (2013). Organizational Ambidexterity: Past, Present, and Future. *Academy of Management Perspectives*, 27(4), 324-338. doi: <https://doi.org/10.5465/amp.2013.0025>
- OCDE, E. (2005). Manual de Oslo: Guía para la recogida e interpretación de datos sobre innovación. Recuperado de http://www.conacyt.gob.sv/Indicadores%20Sector%20Academcio/Manual_de_Oslo%2005.pdf 5D. doi: <https://doi.org/10.1787/9789264013124-fr>
- Papachroni, A., Heracleous, L., & Paroutis, S. (2014). Organizational Ambidexterity Through the Lens of Paradox Theory: Building a Novel Research Agenda. *The Journal of Applied Behavioral Science*. doi: <https://doi.org/10.1177/0021886314553101>
- Parmigiani, A., & Rivera-Santos, M. (2011). Clearing a Path Through the Forest: A Meta-Review of Interorganizational Relationships. *Journal of Management*, 37(4), 1108-1136. doi: <https://doi.org/10.1177/0149206311407507>
- Quinn, R. E., & Rohrbaugh, J. (1983). A Spatial Model of Effectiveness Criteria: Towards a Competing Values Approach to Organizational Analysis. *Management Science*, 29(3), 363-377. doi: <https://doi.org/10.1287/mnsc.29.3.363>
- Raisch, S., & Birkinshaw, J. (2008). Organizational Ambidexterity: Antecedents, Outcomes, and Moderators. *Journal of Management*, 34(3), 375-409. doi: <https://doi.org/10.1177/0149206308316058>
- Raisch, S., Birkinshaw, J., Probst, G., & Tushman, M. L. (2009). Organizational Ambidexterity: Balancing Exploitation and Exploration for Sustained Performance. *Organization Science*, 20(4), 685-695. doi: <https://doi.org/10.1287/orsc.1090.0428>
- Rindfleisch, A., & Heide, J. B. (1997). Transaction cost analysis: past, present, and future applications. *Journal of Marketing*, 61(4), 30-54. doi: <https://doi.org/10.2307/1252085>

- Rossignoli, C., & Ricciardi, F. (2015). *Inter-Organizational Relationships: Towards a Dynamic Model for Understanding Business Network Performance*: Springer International Publishing. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11221-3>
- Rossiter, J. R. (2002). The C-OAR-SE procedure for scale development in marketing. *International Journal of Research in Marketing*, 19(4), 305-335. doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-8116\(02\)00097-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8116(02)00097-6)
- Simsek, Z., Heavey, C., Veiga, J. F., & Souder, D. (2009). A Typology for Aligning Organizational Ambidexterity's Conceptualizations, Antecedents, and Outcomes. *Journal of Management Studies*, 46(5), 864-894. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1467-6486.2009.00841.x>
- Solís-Molina, M., Hernandez-Espallardo, M., & Rodríguez-Orejuela, A. (2015). Ambidestreza organizacional y desempeño: el papel de las relaciones inter-organizacionales. *Revista Informador Técnico*, 79(1), 74-92. doi: <https://doi.org/10.23850/22565035.138>
- Teece, D. J., Pisano, G., & Shuen, A. (1997). Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal*, 18(7), 509-533. doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199708\)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199708)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z)
- Tushman, M. L., & O'Reilly III, C. A. (1996). *Ambidextrous Organizations: Managing Evolutionary and Revolutionary Change*. *California Management Review*, 38(4), 8-30. doi: <https://doi.org/10.2307/41165852>
- Wernerfelt, B. (1984). A resource-based view of the firm. *Strategic Management Journal*, 5(2), 171-180. doi: <https://doi.org/10.1002/smj.4250050207>
- Williamson, O. E., & Ouchi, W. G. (1980). The markets and hierarchies program of research: Origins, implications, prospects: University of Pennsylvania, Center for the Study of Organizational Innovation.
- Zahra, S. A., & George, G. (2002). Absorptive Capacity: A Review, Reconceptualization, and Extension. *Academy of Management Review*, 27(2), 185-203. doi: <https://doi.org/10.5465/AMR.2002.6587995>
- Zeng, S. X., Xie, X., & Tam, C. (2010). Relationship between cooperation networks and innovation performance of SMEs. *Technovation*, 30(3), 181-194. doi: <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2009.08.003>

Diseño de una suela para calzado femenino casual bajo parámetros de liviandad

Design of a female shoe sole under lightweight parameters

Recibido: 30-12-2016 Aceptado: 27-05-2017

Juliana Vélez López^{1*}
Sebastián Valderrama Mejía²
Patricia Castaño Rivera³
Camilo Andrés Páramo Velásquez⁴

¹ Colombiana. Tecnóloga en diseño de calzado y marroquinería Servicio Nacional de Aprendizaje SENA del Centro de Diseño y Manufactura del Cuero del SENA. Aprecia e investigadora Grupo BIOMATIC.
* Autora de correspondencia jvelezlopez@gmail.com.

² Colombiano. M.Sc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA del Centro de Diseño y Manufactura del Cuero del SENA Instructor e investigador Biomecánica. Bioingeniero. Grupo BIOMATIC.

³ Colombiana. Ph.D. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA del Centro de Diseño y Manufactura del Cuero del SENA. Instructora e investigadora Ciencia y Tecnología, mención: materiales. Grupo BIOMATIC.

⁴ Colombiano. Diseñador Industrial Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Gestor de la línea de Ingeniería y Diseño en Tecnoparque. Ingeniero Biomédico.

Resumen

La mujer actual se desarrolla en diferentes ámbitos, en los cuales se conjuga la excelencia profesional con la presentación personal. En este último aspecto el calzado es un elemento fundamental e indispensable. Con el propósito de ofrecer a la mujer no sólo un calzado estéticamente aceptable, sino también liviano y flexible, se desarrolló este trabajo en dos etapas: la primera validó la necesidad de diseñar zapatos cómodos y estéticos para la mujer actual, por medio de una encuesta a 50 mujeres de diferentes profesiones, que realizan largos desplazamientos en su rutina diaria y a las cuales se les contabilizó el número de pasos que regularmente ejecutan en el día, por medio de una banda de ajuste inteligente. Como resultado, se identificó que la altura del tacón del calzado y el número de pasos en el día son los factores relevantes que influyen en el nivel de dolor de los pies de estas mujeres al final de la jornada. De esta forma, en una segunda etapa se diseñó un calzado casual femenino ergonómico, que mitigue el dolor y que combine el desarrollo de una suela novedosa y un zapato característico de una empresa comercial

Palabras clave: Mujer; ergonomía; confort; liviandad; suela.

Abstract

Women nowadays develop in different areas, in which professional excellence is combined with the personal presentation. In this last aspect, the footwear is a fundamental and indispensable element. With the purpose to offer women not only an aesthetically Acceptable footwear, but also light and flexible, this Work was developed in two stages: the first validated the need to design comfortable and esthetic shoes for the woman of today, By means of a survey of 50 women of different Professions, which travel long distances in their Daily

routine and to which were counted the number Of steps that they regularly execute in the day, through an intelligent adjustment band. As a result, it was identified that the heel height and the number of steps in a day are the relevant factors that influence in the pain level of these women's feet at the end of the working day. In this way, in a second stage Ergonomic women's casual shoes were designed to relieve pain and combine the development of a new sole and a Characteristic shoe of a commercial company.

Keywords: Woman; ergonomic; comfort; lightness; sole

Introducción

El pie es uno de los órganos más complejos que tiene el cuerpo humano, es parte fundamental del sistema motor y por lo tanto es receptor, sostén y propulsor durante la marcha, amortiguador y aporta balance corporal (Carreña & Cabrera, 2014). En este sentido, la elección del calzado es vital porque puede alterar el control del sistema motor y el balance corporal (Cronin, 2014). La principal función del calzado es la protección de los pies; sin embargo, se prioriza la estética sobre este aspecto (American Academy of Orthopaedic Surgeons, 2012). Por lo tanto, para asegurar la protección del pie, el diseño de los zapatos debe contener criterios ergonómicos y de confort. Para lograrlo se deben considerar los siguientes aspectos: amortiguación, estabilidad, durabilidad, flexibilidad y ligereza (Jones, 2014).

La flexibilidad de un zapato está relacionada con el esfuerzo necesario para doblarlo por la parte más ancha del antepié. La liviandad implica una disminución del peso total del zapato y depende en gran medida del material empleado para su fabricación. Se ha demostrado que el componente que más aporta peso al calzado es la suela (Vicén, Garrigós, González, & Salinero, 2012). Con un calzado poco flexible y pesado es mayor el gasto energético para flexionar el pie y la fatiga al caminar, dificultando la marcha y aumentando las presiones plantares (Puigcerver et al., 2012).

Dado lo anterior, se ha reducido o eliminado material en zonas de la suela que no se encuentran en contacto directo con la superficie y que no comprometen la estabilidad y el apoyo del usuario. También se han utilizado materiales de menor densidad como caucho y/o látex espumado, poliuretano termoplástico espumado, acetato de vinilo (EVA), dynafoam, spenco (espuma de neopreno), estireno, entre otros (Barnes, Connell, Elder, Fagergren, &

Peters, 2017; Dhanapal & Raja, 2016; Doerer & Schauster, 2014; Nunes et al., 2016; Prakash, Passi, Prakash, Bhatti, & Deane, 2014). Además se han empleado microesferas de expancel para la fabricación de suelas. Estas son pequeñas partículas esféricas de plástico que se pueden adicionar como agente de soplado y reductor de peso en un material termoplástico (AkzoNobel, 2013).

En la actualidad, la normatividad aplicada al calzado es definida por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas de Certificación ICONTEC. La norma aplicable es la NTC 2396 – 1 (ICONTEC, 2002) y se enfoca primordialmente en el calzado de seguridad, que debe afirmar la protección a personas con profesiones de alto riesgo (Sáenz, 2008). Como se puede apreciar, se carece de normatividad asociada con la ergonomía y confort en el calzado, lo que demuestra una vez más que estos conceptos son subvalorados en el sector.

El calzado casual es comúnmente denominado zapato informal. Para el público femenino este calzado puede tener características entre sandalias y zapato cubierto con suela plana o con tacón, y puede variar entre 3 y 10 cm. (American Podiatric Medical Association APMA, 2014). Diversos estudios sobre el uso de zapatos de tacón han demostrado las problemáticas o patologías que estos causan (Barkema, Derrick, & Martin, 2012; Cronin, 2014; Wang et al., 2016). El tacón modifica la posición del pie y del resto del cuerpo, lo que produce una alteración postural en posición estática y una modificación de la distribución de cargas y presiones plantares en el pie, relacionadas con alteraciones en el patrón de la marcha y en la forma de contacto con el suelo (Collado, Pascual, Álvarez, & Rodríguez, 2003). Estas patologías son causadas porque este tipo de zapato no es precisamente el más cómodo o ergonómico. Algunos especialistas en ergonomía recomiendan que los tacones sean usados por lapsos cortos (Blanchette, Brault, & Powers, 2011). A pesar de los efectos en la salud corporal por el uso de zapatos de tacón, siguen siendo artículo de moda (Lin & Chen, 2015). Es decir, la solución para evitar o disminuir patologías del pie está idealmente en el diseño ergonómico. En este punto, cabe destacar que aunque son muchos los parámetros de diseño de calzado ergonómico, sobre todo para el calzado que es utilizado durante largos periodos de marcha, la suela es un componente clave, porque ella influye directamente en las características de peso y flexibilidad, en consecuencia, interviene en la aparición de molestias en los pies durante la marcha.

Por otro lado, la mujer profesional de hoy, desempeña entre sus funciones la atención al cliente y la participación

en reuniones y eventos. Estas actividades en general se desarrollan interactuando con otras personas. Por lo tanto, es indudable que además de desempeñarse como excelentes profesionales requieren de una muy buena presentación personal y, según los códigos sociales de vestuario, el zapato casual es fundamental.

Según el DANE (2016), en Colombia, la participación laboral de las mujeres se concentra de manera importante, sobrepasando el 30%, en el comercio, hoteles y restaurantes, mientras que en servicios sociales, comunales y personales participan con el 32% (El Espectador, 2010).

El desempeño de estos oficios implica en la mayoría de los casos, sobrecarga en los miembros inferiores debido a *factores intrínsecos o extrínsecos*. Entre los primeros se encuentran: el género, la edad, la personalidad, las emociones, factores fisiológicos, características antropométricas, traumatismos, patología neurológica, fisiología, etc. Mientras que en los segundos están: el terreno, el tipo de calzado y el tipo de vestido (Collado et al., 2003).

Con lo expuesto, se vislumbra un gran escenario para el diseño de calzado casual femenino que sea cómodo, liviano y flexible, para la mujer profesional de la actualidad. De esta forma, los dolores o daños causados al pie y otras partes del cuerpo por el uso de zapatos no ergonómicos disminuirían. Para lograrlo, se empleó como material de fabricación una mezcla de caucho con microesferas expandidas. El componente innovador de este proyecto radica en que las microesferas usualmente son utilizadas en materiales termoplásticos y no en elastoméricos para tal finalidad.

Este trabajo hace parte de esta línea y fue desarrollado en dos etapas. En la primera, se realizó un estudio en mujeres ejecutivas para identificar la necesidad que tienen de emplear zapatos ergonómicos en su jornada laboral. En la segunda etapa, se definieron los requerimientos de un diseño novedoso que combine la geometría y el material de una suela para obtener un prototipo de calzado casual, liviano y flexible que atienda las necesidades de confort para la mujer ejecutiva actual.

Metodología

Con base en una encuesta previa realizada a las clientes, donde se les preguntó el tipo de calzado de preferencia, cómo se enteraron de la empresa y comentarios acerca del calzado ofrecido por una empresa comercial, se

obtuvieron respuestas donde según requerimientos de la mayoría de clientes de la empresa, lo ideal en su diseño sería que el calzado fuese más liviano, debido a esto, la empresa comercial comenzó a buscar alternativas en su diseño para que el calzado tuviera criterios de liviandad, debido a esto la investigación se llevó a cabo en dos etapas, la primera consistió en seleccionar un grupo de 50 mujeres pertenecientes a 5 profesiones, las cuales se considera tienen tiempos prolongados de marcha y a partir de esto se evaluó su nivel de dolor. La segunda etapa consistió en desarrollar un prototipo teniendo en cuenta el tipo de suela que presentan los zapatos de la empresa comercial y conceptos de ergonomía, funcionalidad y estética. A dichas suelas se les evaluó la flexión, la resistencia al desgaste abrasivo, la dureza y la densidad.

Etapas 1. Validación de la necesidad

Durante el desarrollo de la investigación se tomó una muestra de 50 mujeres de manera aleatoria las cuales presentaban ciertas características, indicadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de las 50 mujeres participantes en este estudio.

Características	Edad (años)	Peso (kg)	Estatura (cm)	Talla de calzado (Fr)
Rango	25-46	49-68	151-173	35-40
Promedio	34	57	165	37
Desviación estándar	± 5	±4	±4	±1

Estas mujeres laboran el 60% de su tiempo fuera de casa experimentando una sucesión de pasos o ciclos de marcha prolongados. Entiéndase el paso como el conjunto de fenómenos que se producen entre el apoyo de un talón y el apoyo sucesivo del talón contrario, mientras que el ciclo de la marcha es el conjunto de acciones realizadas y fenómenos producidos desde el contacto del talón con el suelo hasta el siguiente contacto del mismo talón con dicho plano de apoyo (Collado, 2002). En la Figura 1, se indican las profesiones de las mujeres que participaron en este estudio.

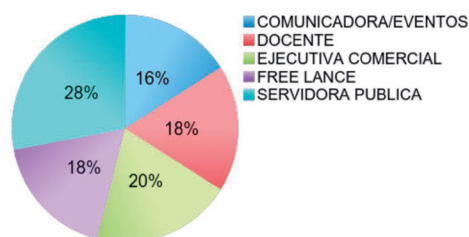


Figura 1. Profesiones de las mujeres de la muestra estudio
Fuente: Los autores.

Las docentes fueron seleccionadas de una universidad de la ciudad de Medellín, que tiene una extensión de 127,792 metros cuadrados, que alberga bloques de aulas, oficinas, laboratorios y otros lugares para desarrollar diversas actividades académicas y culturales.

Las mujeres que desempeñan trabajo de *freelance* son diseñadoras independientes, diseñadoras de moda, artesanas y artistas que no tienen un horario definido ni un espacio de trabajo regular, pueden estar 3 horas en el taller, 2 horas en la tienda, 3 horas en la oficina y constantemente estar en movimiento, así que en un día laboral están sujetas a largos ciclos de marcha o a estar de pie por largas horas.

Las comunicadoras y organizadoras de eventos, permanecen en la oficina un 20% de su día laboral. El 80% restante están atendiendo clientes, llevándolos a conocer las diferentes locaciones para determinados eventos y a la vez están participando de los mismos, están a cargo de la logística, de los alimentos, de la decoración, de la ubicación espacial de las personas, entre otras actividades. Estas profesionales están en constante movimiento fuera de su lugar de trabajo, realizando largos ciclos de marcha.

Las ejecutivas comerciales se caracterizan por trabajar en la oficina largos periodos pero también por cumplir un número de visitas a la semana de clientes externos. Aunque la gran mayoría manifestó que las citas las concretan en lugares cercanos a su lugar de trabajo, también afirmaron tener que salir de la oficina a reuniones y eventos que requieren estar de pie por largas horas y ciclos de marcha.

Las servidoras públicas que se entrevistaron trabajan en la ciudad de Medellín y prestan servicios al municipio, visitan otros municipios y diferentes comunas. Presentan ciclos de marcha largos y constantes.

Para recolectar la información, inicialmente se realizó una encuesta a cada mujer en donde se planteaban preguntas tales como el horario laboral, el tiempo que permanecían de pie, el tiempo fuera de casa, el nivel de dolor, el cual fue calificado de 1 a 5. Además, a cada una se le entregó una banda de ajuste inteligente, la cual es un sistema que registra los pasos ejecutados, distancias recorridas y señales biológicas asociadas al sistema cardiovascular. Así, a cada una se le contabilizó el número de pasos desarrollados durante dos días laborales.

Etapa 2. Diseño de un prototipo

Una vez validada la necesidad de desarrollar zapatos casuales y cómodos para la mujer profesional actual, se

planteó como solución diseñar una suela en un software especializado, Rhinoceros, versión 5, bajo los conceptos de ergonomía, funcionalidad y estética para adaptarla a un zapato con características de diseño de la empresa comercial, se obtuvieron suelas con formulaciones de caucho empleadas en la industria y suelas que incorporan los conceptos mencionados anteriormente, este proceso se realizó con equipos empleados en la industria del caucho tales como el molino abierto de rodillos para obtener todas las mezclas crudas, una prensa de vulcanización para obtener los prototipos, finalmente a todos los prototipos se les realizaron pruebas de abrasión, flexión, dureza y densidad.

Resultados

Etapa 1. Validación de la necesidad

Con base en la información recolectada en la etapa 1, se analizó en particular el nivel de dolor al final de la jornada como variable respuesta, para determinar si hay efecto o no de un determinado factor sobre esta variable, se realizó un análisis de varianza ANOVA, de una sola vía con un nivel de significancia de 0,05.

Al final de la jornada laboral, el nivel de dolor en los pies, que indican las mujeres encuestadas en este estudio, dependió del número de pasos, del tipo de tacón del zapato, mientras que el peso, la edad, la estatura y la talla del calzado no fueron factores influyentes en el nivel de dolor.

El nivel de dolor es mayor para un número de pasos entre 11.000 a 13.000 (media: 3,1), en comparación a un rango entre 5.000 a 7.000 (media: 1,6), estos datos fueron corroborados con el ANOVA, el cual indicó que ambos niveles del factor son diferentes, (Ver Figura 2). Mientras que para el tipo de tacón se encontró que el zapato de tacón alto produce mayor sensación de dolor que el zapato de tacón bajo, (Ver Figura 3).

Este último resultado está acorde con numerosas investigaciones que indican que el zapato de tacón alto, esto es, de más de 4 cm, puede causar diferentes patologías, como dolor, en particular al tobillo y al antepié (Borchgrevink, Viset, Wits, Schei, & Foss, 2015; Ho, Blanchette, & Powers, 2012; Yung-Hui & Wei-Hsien, 2005).

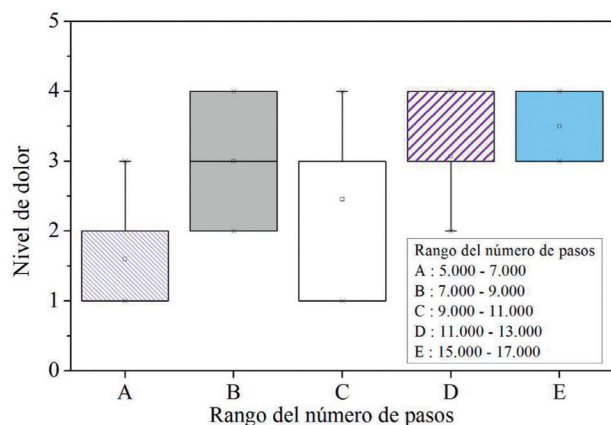


Figura 2. Efecto del número de pasos ejecutados en un día laboral sobre el nivel de dolor de las mujeres encuestadas
Fuente: Los autores.

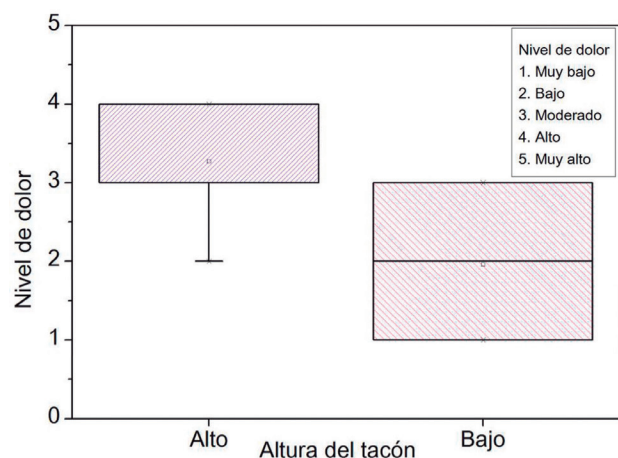


Figura 3. Efecto del tipo de tacón en el nivel de dolor de las mujeres encuestadas, luego de un día laboral
Fuente: Los autores.

Etapa 2. Diseño del prototipo

Se diseñó un prototipo de calzado, con una suela novedosa cuyas características se indican en la Tabla 2.

El diseño de la suela se graficó en un software especializado, Rhinoceros, versión 5 y se muestra en la Figura 4.

Posteriormente se obtuvieron 3 tipos de suelas con una formulación de caucho empleada en la industria, para dicha formulación se contó con una mezcla de referencia y dos mezclas con adición del aditivo que haría expandir el caucho para lograr el criterio de liviandad. Luego de obtenidos los prototipos de suela, se evaluó su desempeño en pruebas de flexión, abrasión y se determinó el cambio en su dureza y densidad, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 2. Requerimientos y determinantes para el diseño de la suela

Requerimiento	Determinante
Liviandad	Economizadores circulares sobre la parte superior de la suela, cuyas dimensiones se determinaron según la obtención del peso óptimo de ésta. Los economizadores se separaron entre sí en una distancia de 8 mm y con una profundidad de 1 cm a 3 cm, según el espesor de la suela. También se seleccionó un material liviano que fue un compuesto de caucho natural expandido.
Flexibilidad	Canales de flexión en la parte inferior de la suela y el área de los metatarsos, para facilitar los movimientos naturales de la marcha, optimizar el consumo energético durante ésta y disminuir la fatiga.
Evacuación de contaminantes	Canales comunicados entre sí, distribuidos a lo largo de la parte inferior de la suela, los cuales se encuentran abiertos para permitir la evacuación de los contaminantes y potenciar la adherencia y/o agarre a la superficie de desplazamiento.
Amortiguación	Esta característica se interviene directamente desde la selección del material, cuya base es el caucho natural expandido, que permite una eficiente absorción de impactos durante la marcha. Además, se implementa una entresuela, la cual está constituida por zonas en silicona, estratégicamente ubicadas, las cuales permitirán distribuir las cargas en el pie de una forma más equitativa y mucho más saludable para el usuario.
Adherencia y agarre	Además de los canales a lo largo de la suela, el acabado rugoso, especialmente en el área del antepié, permite un mayor agarre, específicamente en el momento del despegue, el cual es una de las fases del mecanismo de la marcha. De esta forma se minimiza el riesgo de accidentes asociado a caídas.
Durabilidad	La resistencia a la abrasión en la suela se ve reflejada en la selección del material. El caucho natural expandido ha demostrado tener unas características elevadas respecto a la resistencia al desgaste por fricción que se genera al caminar. Así la vida útil de la suela se maximiza, constituyendo un factor diferenciador de concepción y diseño.
Distribución de las presiones plantares	Para lograr una distribución equitativa de las presiones plantares y evitar la aparición de patologías asociadas a este parámetro, se diseñó una suela con una altura de tacón de 3 cm, con la incorporación de plataforma de 5 cm.



Figura 4. Diseño de la suela. A) Vista lateral izquierda. B) Vista lateral posterior. C) Vista inferior

Fuente: Empresa comercial.

Tabla 3. Resultados de pruebas a prototipo de suela.

MATERIAL/ ENSAYO	Densidad (g/cm ³)	Dureza (Shore A)	Pérdida volumétrica por abrasión (mm ³) *	Flexión suela a 30000 ciclos (%) **
Mezcla referencia	1,14 ± 0,02	62 ± 1	140,81 ± 5,70	11,50 ± 3,04
Mezcla con 3 phr de aditivo	0,86 ± 0,01	57 ± 1	320,67 ± 16,91	6,87 ± 6,93
Mezcla con 10 phr de aditivo	0,67 ± 0,02	42 ± 0	242,57 ± 27,55	12,90 ± 4,85

* En pérdida volumétrica por abrasión se considera que el material tiene una alta resistencia a la abrasión cuando las pérdidas son menores.

** La flexión de suela se realizó hasta 30000 ciclos, el valor reportado corresponde al porcentaje de incremento en la incisión que presenta la probeta luego de llegar al ciclo máximo.

En cuanto a la capellada, esta tiene un diseño que es característico de la empresa comercial, con un espacio libre de material en el empeine, porque en esta zona ocurre la mayor flexión del pie durante la marcha y así se facilita este tipo de movimiento. El contrafuerte del tobillo se utiliza doble, para proteger esta zona y la planta del pie de objetos externos y además otorgar estabilidad en terrenos irregulares. La amortiguación del tobillo también se logra con un cuello conformado por una espuma de alrededor 2 cm. (Ver Figura 5).



Figura 5. Diseño del zapato casual femenino estético y ergonómico.

Fuente: Empresa comercial

Conclusiones

La altura del tacón fue un factor que influyó directamente en el nivel de dolor de los pies de las mujeres profesionales encuestadas, al final de su jornada laboral, siendo el tacón alto más influyente en el incremento del nivel de dolor que el tacón bajo.

Se validó la necesidad de desarrollar un tipo de zapato casual para la mujer actual, debido a la influencia que tienen las características de diseño del zapato, así como también por la relación existente entre los largos desplazamientos que deben realizar las mujeres encuestadas durante su jornada laboral y el dolor o fatiga que esto les causa.

Se desarrolló una suela en caucho expandido cumpliendo con criterios de liviandad y confort, además de las características requeridas por una empresa comercial. Se evaluó su desempeño mecánico encontrando diferencias mínimas, en comparación con una suela de caucho tradicional

Como trabajo futuro se propone evaluar tanto nuevas formulaciones de caucho empleadas para el calzado casual como métodos de procesamiento de caucho con microesferas expandibles. Por otra parte, se deben analizar las respuestas biomecánicas asociadas al uso de la suela.

Agradecimientos

La empresa comercial surgió de un proyecto de emprendimiento de la aprendiz Juliana Vélez de la tecnología de Diseño de Calzado y Marroquinería del Centro de Diseño y Manufactura del Cuero

Referencias

- AkzoNobel. (2013). Breve introducción a las microesferas Expancel. Brochure. Recuperado de https://www.akzonobel.com/expancel/system/images/akzonobel_expancel_short_introduction_es_tcm65-75515.pdf
- American Academy of orthopaedic surgeons. (2012). Anatomía del calzado. Recuperado de <http://orthoinfo.aaos.org/topic.cfm?topic=a00489>
- American Podiatric Medical Association (APMA). (2014). Public Opinion Research on Foot Health and Care. Recuperado de <https://www.apma.org/files/A2014TodaysPodiatristSurveyAllFindings.pdf>
- Barkema, D. D., Derrick, T. R., & Martin, P. E. (2012). Heel height affects lower extremity frontal plane joint moments during walking. *Gait and Posture*, 35(3), 483–488. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.11.013>
- Barnes, E., Connell, J. L., Elder, Z., Fagergren, F., & Peters, G. M. (2017). Sole Structure for an Article of Footwear. Patente No US 20170020227 A1. Estados Unidos. Recuperado de <https://www.google.com/patents/US20170020227>
- Blanchette, M., Brault, J., & Powers, C. (2011). The influence of heel height on utilized coefficient of friction during walking. *Gait & Posture*, 34(1), 107–110. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.03.023>
- Borchgrevink, G. E., Viset, A. T., Wits, E., Schei, B., & Foss, O. A. (2015). Does the use of high-heeled shoes lead to fore-foot pathology? A controlled cohort study comprising 197 women. *Foot and Ankle Surgery*, 22(4), 239 - 243. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fas.2015.10.004>
- Carreña, J., & Cabrera, P. (2014). Diseño e implementación de un sistema de análisis de las presiones plantares en estática basado en procesamiento de imágenes. (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, Cuenca, Ecuador, pp. 138.
- Collado, S. (2002). Análisis de la marcha humana con plataformas dinamométricas. Influencia del transporte de carga. (Tesis de doctorado). Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Collado, S., Pascual, F., Álvarez, A., & Rodríguez, L. P. (2003). Análisis de la marcha. Factores moduladores. *Biociencias*, 1, 1–22.
- Cronin, N. J. (2014). The effects of high heeled shoes on female gait: A review. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 24(2), 258–263. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2014.01.004>
- DANE. (2016). Boletín Técnico: Mercado laboral por sexo. Bogotá D.C. Recuperado de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/ech/ech_genero/bol_ejesexo_abr_jun16.pdf
- Dhanapal, D., & Raja, K. (2016). PU memory foam for application as insole in therapeutic footwear for patients with diabetes. *IJES*, 6(6), 7784–7785.
- Doerer, D. M., & Schauster, M. J. (2014). Cushioned shoe construction. Patente No US 8713818 B2. Estados Unidos. Recuperado de <https://www.google.com/patents/US8713818>
- El Espectador. (2010). Así es la mujer, en estadística, según el Dane. Recuperado de <http://www.elespectador.com/noticias/actualidad/articulo191356-asi-mujer-estadistica-segun-el-dane>
- Ho, K. Y., Blanchette, M. G., & Powers, C. M. (2012). The influence of heel height on patellofemoral joint kinetics during walking. *Gait and Posture*, 36(2), 271–275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2012.03.008>
- ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2002) NTC 2396-

- 1: Calzado. Requisitos y métodos de ensayo para el calzado de seguridad, protección y ocupacional, para uso profesional.
- Jones, J. (2014). The potential for emulating the human footstrike using a Six Degrees-of-Freedom industrial robot. (Tesis de doctorado). Loughborough University, Loughborough, Inglaterra.
- Lin, L., & Chen, C. (2015). Innovation and ergonomics consideration for female footwear design. *Procedia Manufacturing*, 3(Ahfe), 5867–5873. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.891>
- Nunes, G. A. M. de A., Reis, M. do C., Rosa, M. F. F., Peixoto, L. R. T., Rocha, A. F. da, & Rosa, S. de S. R. F. (2016). A system for treatment of diabetic foot ulcers using led irradiation and natural latex. *Research on Biomedical Engineering*, 32(1), 3–13. doi: <https://doi.org/10.1590/2446-4740.0744>
- Prakash, J., Passi, A., Prakash, J., Bhatti, S., & Deane, A. (2014). Microcellular Rubber Insole in Management of Knee Osteoarthritis. *Webmedcentral*, 5(1), WMC004505. doi: <https://doi.org/10.9754/journal.wmc.2014.004505>
- Puigcerver, S. A., Gómez, A., Solves, C. M., Ripoll, E., Gonzalez, J. C., Gil, S., & Huertas, P. (2012). Cómo hacer flexible el calzado más clásico. *Revista de Biomecánica*, 58, 35–37.
- Sáenz, L. M. (2008). Ergonomía y diseño, análisis y aplicación para el calzado laboral. *ICONOFACTO*, 4(5), 122–139.
- Vicén, J., Garrigós, J. del C., González, C., & Salinero, J. J. (2012). La biomecánica y la tecnología aplicadas al calzado deportivo. Madrid: Universidad Camilo José Cela. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Juan_Salinero/publication/239526613_La_biomecanica_y_la_tecnologia_aplicadas_al_calzado_deportivo/links/0c96051c170796a380000000.pdf?origin=publication_list
- Wang, C., Geng, X., Wang, S., Ma, X., Wang, X., Huang, J., Wang, K. (2016). The impact of high-heeled shoes on ankle complex during walking in young women-In vivo kinematic study based on 3D to 2D registration technique. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 28, 7–16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2016.01.005>
- Yung-Hui, L., & Wei-Hsien, H. (2005). Effects of shoe inserts and heel height on foot pressure, impact force, and perceived comfort during walking. *Applied Ergonomics*, 36(3), 355–362. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2004.11.001>

Diseño e Implementación de un sistema de control cascada en la planta de intercambio térmico - PIT000

Design and implementation of a cascade control system in the heat exchange plant

Recibido: 20- 10 - 2016 Aceptado: 08-05-2017

Juan Gonzalo Álvarez Díaz^{1*}
Jorge Enrique Moreno Serrano²
Edwin Fernando Ramírez Murillo³

¹ Colombiano. M.Sc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. CEAI, Cali – Colombia, Unidad de Investigación Aplicada, Desarrollo Tecnológico e Innovación, UIADTI – SENA.
* jgalvarez@sena.edu.co

² Colombiano. M.Sc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. CEAI, Cali – Colombia, Unidad de Investigación Aplicada, Desarrollo Tecnológico e Innovación, UIADTI – SENA.
jemorenos@sena.edu.co

³ Colombiano. Ingeniero Electrónico. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. ASTIN, Cali – Colombia, Unidad de Investigación Aplicada, Desarrollo Tecnológico e Innovación, UIADTI – SENA.
eramirez@sena.edu.co

Resumen

En el artículo se describe el diseño e implementación del sistema de control de la Planta Didáctica de Intercambio Térmico - PIT000, ubicada en el Centro de Electricidad y Automatización Industrial, CEAI - SENA, como un aporte investigativo a las necesidades de las instituciones de educación y de las empresas, ingenios azucareros, petroquímicas y papeleras, entre otras. El sistema de control se basa en una estrategia cascada temperatura-flujo, implementada mediante el uso de tecnología de instrumentación y control industrial, que incluyó transmisores inteligentes de flujo y temperatura, controladores lógicos programables y válvulas de control con posicionador inteligente. La metodología de diseño del sistema de control incluyó la elaboración de diagramas (P&ID) y bloques de la estrategia, la definición de condiciones de operación del proceso, el modelado de los lazos de control por medio de funciones de transferencia, el diseño de los controladores de flujo y temperatura, la determinación de los parámetros de sintonía haciendo uso del Matlab y la implementación final del sistema de control. Los resultados de la investigación, que están asociados a la implementación del sistema de control, son considerados satisfactorios, debido a que se validan con la simulación y prueba de la estrategia de control ante condiciones de operación, así como la estrategia de control cumplió con el propósito de mejorar el comportamiento de la temperatura de salida del producto en el proceso.

Palabras clave: Intercambio térmico; control cascada; PID; PIDTuner; Simulación; implementación.

Abstract

The article describes the design and implementation of the control system of the didactic thermal exchange plant - pit000, located in the center of electricity and industrial

automation, ceai - sena, as an investigative contribution to the needs of the institutions of education and of companies, sugar mills , petrochemical and paper mills, among others. The control system is based on a cascade strategy temperature-flow, implemented through the use of instrumentation and industrial control technology, which includes intelligent flow and temperature transmitters, programmable logic controllers and control valves with smart positioner. The design method of the control system included the development of diagrams (p & id) and strategy blocks, the definition of conditions of operation of the process, the modeling of control loops by means of transfer functions, the design of the flow and temperature controllers, the determination of the tuning parameters making use of matlab and the final implementation of the control system. The results of the research, which are associated with the implementation of the control system, are considered satisfactory, because they are validated with the simulation and test of the control strategy in the presence of operation, as well as the control strategy complied with the purpose of improving the behavior of temperature output of the product in the process.

Keywords: Heat exchange; cascade control; PID; PIDTunning; Simulation; implementation.

Introducción

El estudio de las estrategias de control en cascada, basado en acciones de control Proporcional, Integral y Derivativo, PID, es un tema habitual en cursos de control en Ingeniería y abordado por diferentes autores, quienes presentan diversas metodologías de implementación para esta estrategia en plantas de intercambio térmico.

Algunos de los resultados de implementación o simulación se presentan en Srinivas, Prasada y Vijaya, (2012), donde se aplican diferentes estrategias de control en una planta de intercambio térmico utilizando software de uso habitual a nivel académico – LabView; en Chacón, (2013), se aborda el diseño de sistemas de control a plantas didácticas de intercambio térmico, utilizando diferentes técnicas de control, el cual está enfocado a lazos de control independientes. En Abdulbasid y Mukhtar (2014), se desarrolla un controlador de temperatura para el flujo de salida de un intercambiador de calor, en el que la sintonía y el comportamiento del sistema controlado se realizaron y analizaron con SIMULINK de Matlab ®, y en el que los resultados se centraron en determinar los efectos de las variaciones en los tiempos de muestreo sobre los parámetros de sintonía y en el comportamiento en el

tiempo del proceso. De la revisión general de sistemas de control para intercambiadores se puede concluir que existe un gran número de artículos donde se exponen diferentes métodos de control, desde estrategias simples hasta estrategias avanzadas, lo cual muestra las bondades del control hacia el proceso. De igual forma, lo que más se reporta es el uso de estrategias de PID para el control de intercambiadores, siendo esta estrategia la más usada a todo nivel en la industria (O'Dwyer, 2009).

Como hipótesis de la investigación se plantea “La estrategia de control en cascada, utilizada para mejorar la regulación en el control de los procesos continuos, puede ser implementada satisfactoriamente en una planta de intercambio térmico, fabricada a baja escala de las existentes en las empresas industriales”.

Teniendo como referencia la hipótesis planteada, en el trabajo se reportó el diseño y la implementación de una estrategia de control cascada en una planta didáctica de intercambio térmico, basada en el uso de tecnología de instrumentación y control industrial, y aplicando metodologías modernas y herramientas computacionales de diseño.

La investigación tiene antecedentes en desarrollos tecnológicos y otros artículos escritos sobre plantas de operaciones unitarias realizados por la UIADTI - CEAI, que se encuentran en uso en el SENA a nivel nacional (Moreno, 2009).

Marco teórico

Un esquema típico del control cascada en una planta de intercambio térmico se muestra en la Figura 1, donde se puede reconocer un lazo de control primario establecido por la variable temperatura y un lazo de control secundario instaurado por la variable caudal. En este sistema de control se busca que la temperatura de salida del fluido de producto, $T(t)$, permanezca en valores establecidos a través de las referencias o valores deseados. El fluido caloportador (vapor), debe proporcionar la cantidad de energía necesaria para llevar la temperatura de entrada del producto - $T_i(t)$, al valor deseado. La temperatura de salida se controla mediante la manipulación de la posición de la válvula quien a su vez modifica el flujo caloportador. En algunos procesos, el flujo caloportador puede verse afectado por cambios de presión de la tubería o de temperatura lo que genera perturbaciones en el sistema de control, que normalmente no son compensados por un sistema de control simple. Para compensar los efectos de

estas perturbaciones en el sistema de control se implementa el lazo de control secundario de caudal (Creus, 2010).

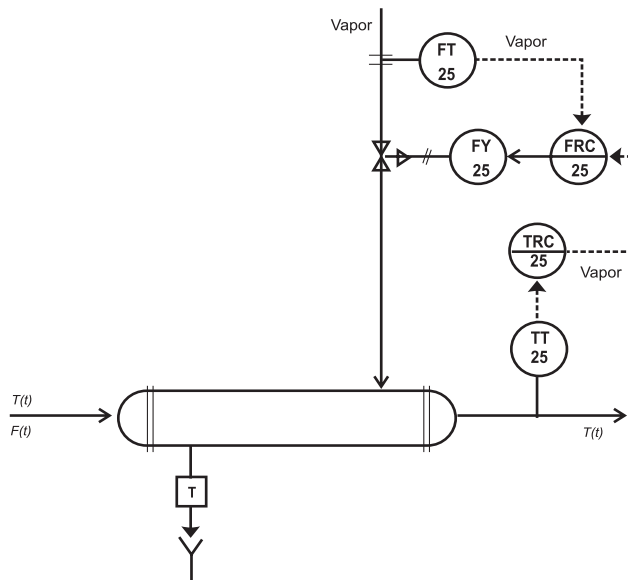


Figura 1. Esquema de Control en cascada para un intercambiador térmico. **Fuente:** (Smith & Corripio, 1991)

La metodología de diseño del sistema de control PID, que contiene diferentes métodos para el modelamiento de este tipo de procesos y posterior diseño del controlador, es abordada en Moradi, y Johnson, (2005), en el cual destaca el método de estimación de la función de transferencia por medio del modelamiento no paramétrico. Este método se tomó como herramienta de referencia en la investigación, en la que para obtener el modelo matemático del proceso de intercambio térmico se toman los datos y dinámicas de las variables de entradas y salidas, y mediante el uso de herramientas computacionales se obtiene la función de transferencia.

El esquema general para el diseño de sistemas de control propuesto por MathWorks de Matlab® se representa en la Figura 2. El procedimiento muestra tres etapas: i) Diseño: en la que se obtiene el modelo del proceso, haciendo uso de la herramienta de identificación (Toolbox Ident), y el diseño del controlador, por medio del uso de la herramienta PIDTunning; ii) Implementación: en la que se desarrolla la estrategia de control, estrechamente asociada con la tecnología en que se implementó y se afinan los parámetros de sintonía si es necesario; iii) Verificación: donde se comprueba el comportamiento del lazo según condiciones de diseño. La metodología mostrada en la Figura 2, es la utilizada en la presente investigación.

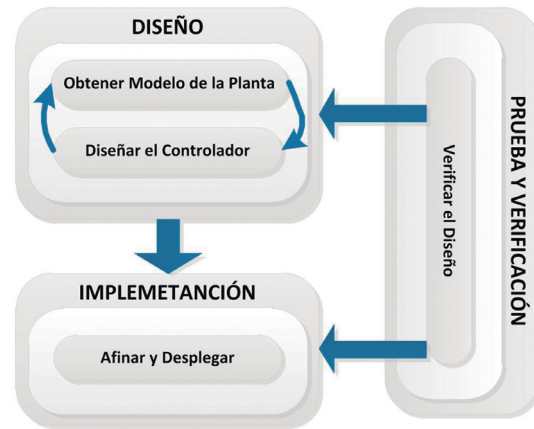


Figura 2. Etapas de desarrollo de un sistema de control.

Fuente: (MathWorks, 2016)

Metodología de diseño del sistema de control

Descripción del proceso

El diagrama de tuberías e instrumentos - (P&ID) de la planta didáctica, mostrado en la Figura 3, se elaboró aplicando la norma ANSI/ISA S5.1 para representar el sistema controlado de la PIT000(American National Estándar, 2009). En la Figura 3 se observa que por el intercambiador de calor - HE001, del tipo coraza y tubo, pasan dos corrientes de fluidos: la del producto (agua) que va por la coraza y la del fluido caloportador (agua caliente a 95 °C) que circula por los tubos. El flujo de producto entra al HE001, a través del transmisor de flujo por efecto coriolis - FIT002, de la válvula de control - FCV001 y del transmisor de temperatura - TIT001. A la salida del intercambiador el producto caliente se encuentra con el transmisor de temperatura - TIT003 y el transmisor de flujo electromagnético - FIT005. El fluido caloportador entra al HE001 a través del transmisor de flujo vortex - FIT004, de la válvula FCV002 y el transmisor de temperatura - TIT004, y a la salida, este flujo, se encuentra con el transmisor TIT002 y el transmisor de flujo por presión diferencial - FIT003. En la planta, tanto los transmisores como las válvulas cuentan con el protocolo de comunicación HART y señales de comunicación 4 a 20 mA.

En el proceso se reconocen las siguientes variables:

caudal de producto - $Q_p(t)$,

caudal de fluido caloportador - $Q_c(t)$,

temperatura de entrada - $T_{EP}(t)$, y salida $T_{SP}(t)$ de producto y temperatura de entrada - $T_{EC}(t)$ y salida $T_{SC}(t)$ de fluido caloportador.

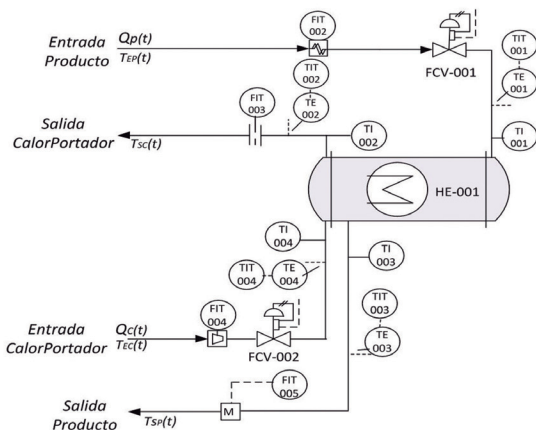


Figura 3. Diagrama (P&ID) de la PIT000, con lazo de control de cascada temperatura flujo.
Fuente: Los autores.

Plataforma de control y adquisición de señales

El sistema de control se implementó en una plataforma de hardware y software, dispuesta para la lectura, procesamiento y escritura de señales constituida por: i) un PLC de referencia AFPX, cuyo software de configuración y programación es FPwin Pro; ambos de marca Panasonic y ii) el software Kepserver como servidor OPC que permite la transferencia de datos a través de Ethernet entre el PLC y el PC. La plataforma también cuenta con scripts realizados en Matlab para el almacenamiento y generación de señales, utilizados en actividades como: definición del punto de operación, captura de datos para el modelado del proceso, realizar pruebas de control y hacer la supervisión del proceso en la planta.

Condiciones de operación del proceso

La caracterización de la FCV001 y la FCV002, para determinar los puntos de operación apropiados para el sistema de control, se realizó enviando, a través de la plataforma de control y adquisición, señales a las válvulas y leyendo los valores entregados por el FIT002 y el FIT004. La curva característica de la válvula FCV001 se muestra en la Figura 4, donde el eje "y" es el flujo medido y el eje "x" es el porcentaje de apertura de la válvula. Realizando el mismo procedimiento también se obtiene la curva característica de la válvula FCV002.

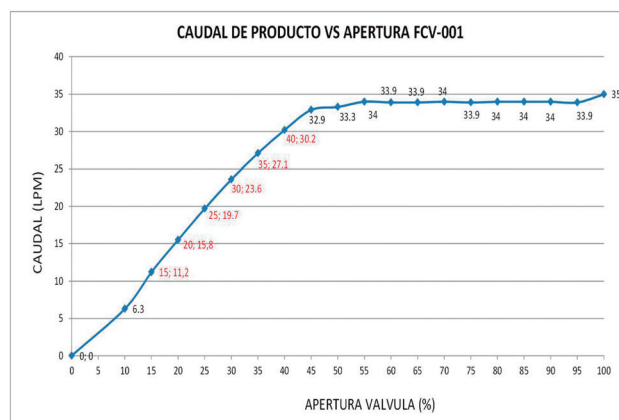


Figura 4. Curva característica de la FCV-001.
Fuente: Los autores

La Tabla 1 muestra las principales características de operación de las válvulas.

Tabla 1. Valores de caracterización de las válvulas

Caracterización válvula	FCV001	FCV002
Caudal máximo de operación	35	21
Apertura mínima de operación lineal	11,2	8
Apertura máxima de operación lineal	30,2	19
Punto de operación sugerido	11,2	12,2

Si el proceso se opera en los puntos sugeridos para las válvulas se establece una temperatura de salida de producto en 43 °C, considerando que la temperatura de entrada de producto es de 18 °C, y la temperatura del fluido caloportador esté en la banda del 90 a 95 °C.

Estrategia de control

La estrategia de control en cascada temperatura - flujo, propuesta para la planta de intercambio térmico, se representa por medio del diagrama de bloques en la Figura 5, en el que la variable controlada es la temperatura de salida del producto, $T_{SP}(t)$, que representa el lazo de control primario, y la variable manipulada del flujo del fluido caloportador el cual, a su vez es la variable controlada para el lazo secundario, $Q_c(t)$. Las variables perturbadoras son: i) la temperatura del fluido caloportador, que presenta variaciones debido a que el calentador es controlado por un controlador ON-OFF en una banda de temperatura de 90 a 95 °C, en el diagrama se identifica como $d2(t)$ y ii) el caudal de flujo de producto, $d1(t)$, que varía por las condiciones del proceso. La estrategia típica de control para este tipo de procesos es propuesto en Smith y Corripio (1991). La $Mv(t)$ representa el porcentaje de apertura de la válvula FCV002.

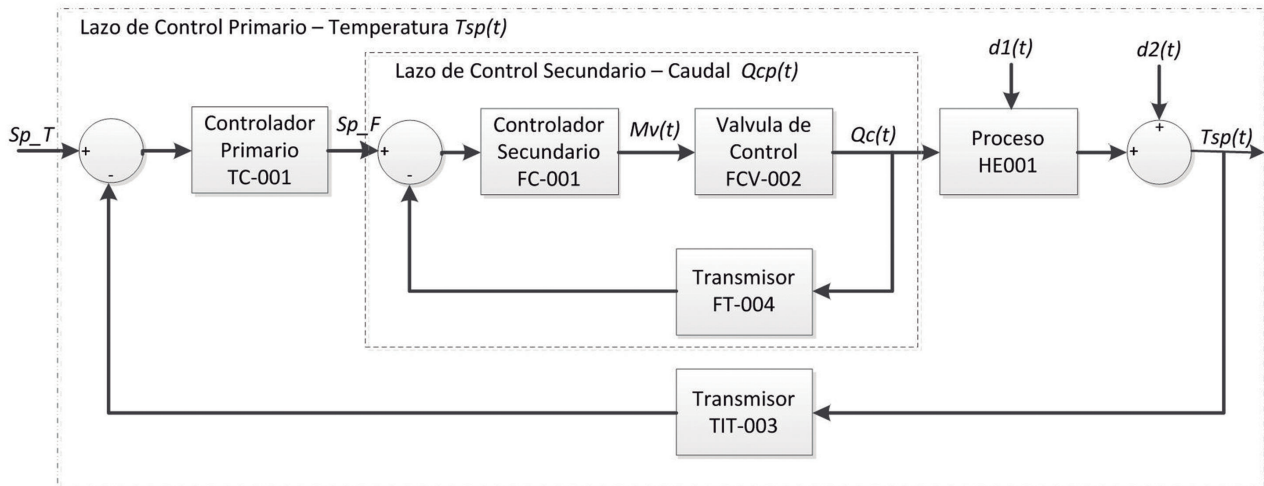


Figura 5. Diagrama de bloques del control cascada temperatura - flujo.

Fuente: Los autores.

Modelado del proceso

El modelado se inicia con la obtención de la función de transferencia del proceso de flujo que se utilizó para diseñar el lazo de control secundario. De acuerdo con las condiciones de operación definidas y haciendo uso de la

plataforma de adquisición, se generó una señal pseudo-aleatoria que se aplicó como la señal $Mv(t)$ y se midió el caudal $Qc(t)$, cuyo comportamiento se presenta en la Figura 6.

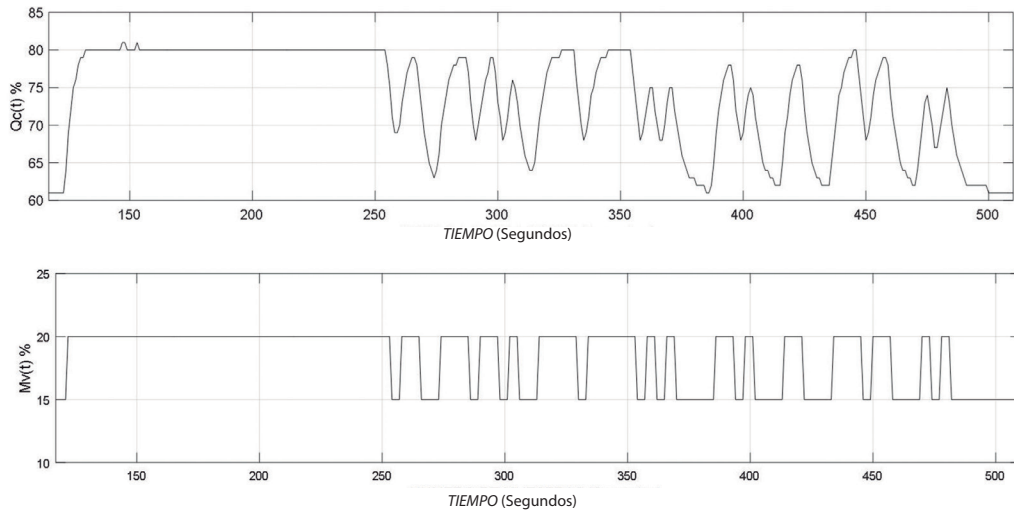


Figura 6. Señales $Mv(t)$ y $Qc(t)$ generadas.

Fuente: Los autores.

Aplicando el procedimiento de identificación definido en MathWorks, (2014b) y mediante la herramienta IDENT del MATLAB, se generó la función de transferencia de primer orden con retardo, la cual se muestra en (1).

$$G_1(s) = \frac{k}{Ts + 1} e^{t_o} = \frac{3,8512}{1 + 1,65s} e^{-0,592s} \quad (1)$$

Una vez generado el modelo matemático, se realizó la validación del mismo a través de un análisis de correlación entre los valores reales y los generados por la función de transferencia obtenida. El porcentaje de similitud del modelo es de 89,5%, tal como se muestra en la Figura 7.

El mismo procedimiento cumplió para determinar el modelo matemático entre $Mv(t)$ y la temperatura $Tsp(t)$. Las señales generadas que fueron utilizadas para identificar la función de transferencia son mostradas en la Figura 8.

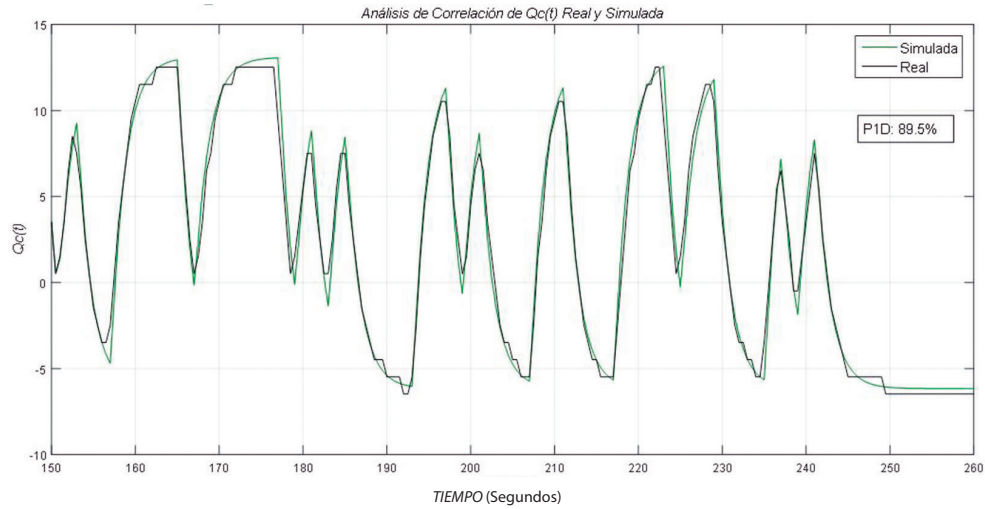


Figura 7. Análisis de correlación de la función de transferencia para el lazo secundario.

Fuente: Los autores.

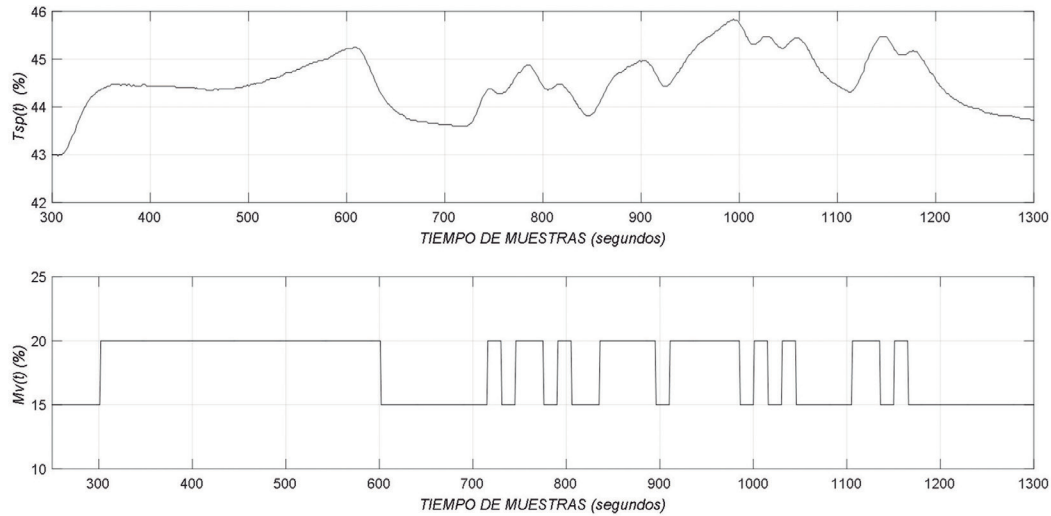


Figura 8. Señales $Mv(t)$ y $Tsp(t)$ generadas.

Fuente: Los autores.

La función de transferencia obtenida para el proceso de temperatura se muestra en (2).

$$G_2(s) = \frac{0,4298}{1 + 21,197s} e^{-15,942s} \quad (2)$$

El análisis de correlación del modelo matemático obtenido es del 78%, el cual es un porcentaje aceptable considerando que el modelo es para control. La Figura 9 muestra el análisis de correlación.

De la ecuación (2) se puede observar que el proceso presenta un retardo de 15,94s. Característica muy común en los procesos relacionados con la variable temperatura.

Controladores y parámetros de sintonía

Los controladores a diseñar son del tipo PID. La sintonía de los lazos se realiza con la obtención de los parámetros del controlador: ganancia proporcional - K_p , Tiempo integral - T_i y Tiempo derivativo - T_d . Dichos parámetros se determinaron mediante dos metodologías; la primera, por medio de la herramienta PIDTuner de Matlab y la segunda, según los cálculos propuestos en Smith y Corripio (1991), presentados en la Tabla 2, los cuales se calculan a partir de los parámetros de un modelo de primer orden con retardos definidos en (1).

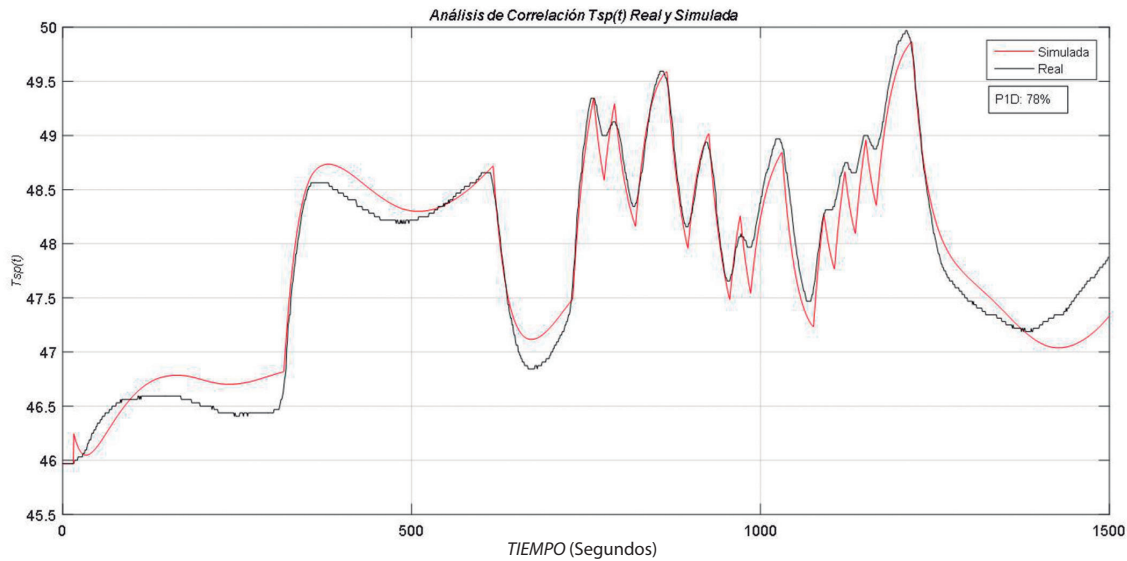


Figura 9. Análisis de correlación de la función de transferencia para el lazo primario.
Fuente: Los autores.

Tabla 2. Metodología para determinar parámetros de sintonía

Tipo de Controlador		Ganancia Proporcional K_c	Tiempo Integral T_i	Tiempo Derivativo T_d
Proporcional	P	$\frac{1}{k} \left(\frac{T}{t_o} \right)$	-	-
Proporcional-Integral	PI	$\frac{0,9}{k} \left(\frac{T}{t_o} \right)$	$3,3t_o$	-
Proporcional – Integral - Derivativo	PID	$\frac{1,2}{k} \left(\frac{T}{t_o} \right)$	$2,0t_o$	$0,5t_o$

Fuente: Control automático de proceso (Smith & Corripio, 1991)

Parámetros de sintonía del controlador del lazo de control secundario

Los resultados obtenidos con la herramienta PID Tuner (MathWorks, 2014a), para el cálculo de los parámetros de sintonía, se muestran en la Figura 10, donde se muestran la parametrización de la herramienta y los parámetros resultado. Los criterios de sintonía se fundamentan en mejorar la velocidad de respuesta del lazo cerrado respecto al lazo abierto con sobre impulso menor al 15%. Al controlador ajustado con los parámetros de sintonía de la Figura 10 se le denomina para propósitos de simulación PID1. Posteriormente se aplica la segunda metodología. Al realizar los cálculos definidos en la Tabla 2, los parámetros son: $K_p = 0,6$, $T_i = 1,9$ y $T_d = 0$. Al controlador ajustado

con estos valores se le denomina PID2. Mediante ambos métodos se establece que el controlador a implementar para el lazo secundario debe ser de tipo PI. Típico para el control de flujo.

Parámetros de sintonía del controlador del lazo de control primario

Desarrollando un proceso similar al realizado en el lazo de control secundario se obtienen los parámetros de sintonía del lazo de control primario por los dos métodos. El resultado de aplicar PID Tuner a la función de transferencia del lazo de control primario se muestra en la Figura 11. Los parámetros de sintonía generados son: $K_p = 2,32$, $T_i = 24,45$ y $T_d = 1,84$. A este controlador se le denomina PID3. Los parámetros de sintonía calculados según Tabla 2 son:

$K_p = 3,7$, $T_i = 31,88$ y $T_d = 7,971$. A este controlador se le denomina PID4. El parámetro T_d se reajustó, mediante ensayo y error, a un valor de 1,5 ya que la respuesta presentó un comportamiento no deseado generado por el

valor de T_d "grande". Se implementó un controlador PID para temperatura, debido a que es el algoritmo típico para esta variable.

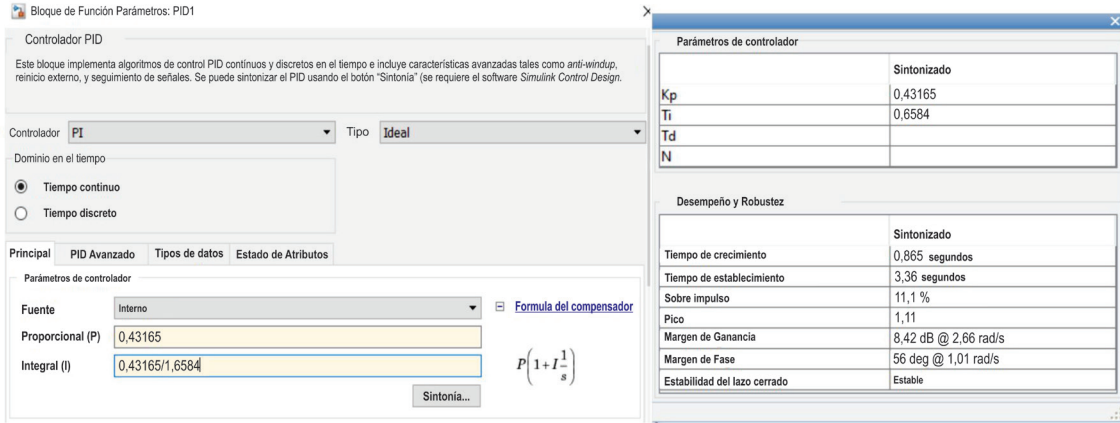


Figura 10. Parámetros de sintonía del controlador secundario, establecidos mediante el PID Tuner de Matlab.
Fuente: Los autores.

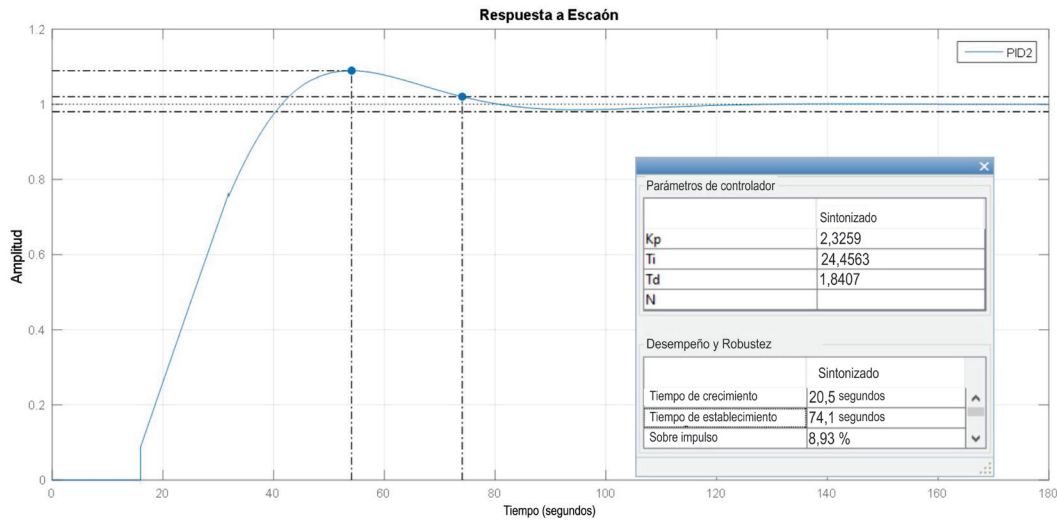


Figura 11. Parámetros de sintonía del controlador primario, establecidos mediante el PID Tuner de Matlab.
Fuente: Los autores.

Simulación de los lazos de control

Por medio del SIMULINK del Matlab se simuló el lazo de control secundario, lazo de flujo, para evaluar el comportamiento en el tiempo de acuerdo con los parámetros de sintonía obtenidos. El diagrama de bloques del lazo de control secundario implementado en la herramienta se muestra en la Figura 12, en la que se observó la simulación de los dos controladores PID1 y PID2.

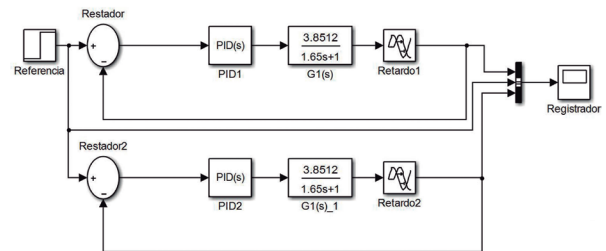


Figura 12. Simulación de Controladores PID1 y PID2.
Fuente: Los autores.

La respuesta en el tiempo de los dos controladores se muestra en la Figura 13. La comparación de los dos controladores se realizó considerando el máximo sobre

impulso, $Mp(\%)$, el tiempo de establecimiento, Ts (s), y el error de estado estacionario, Ess .

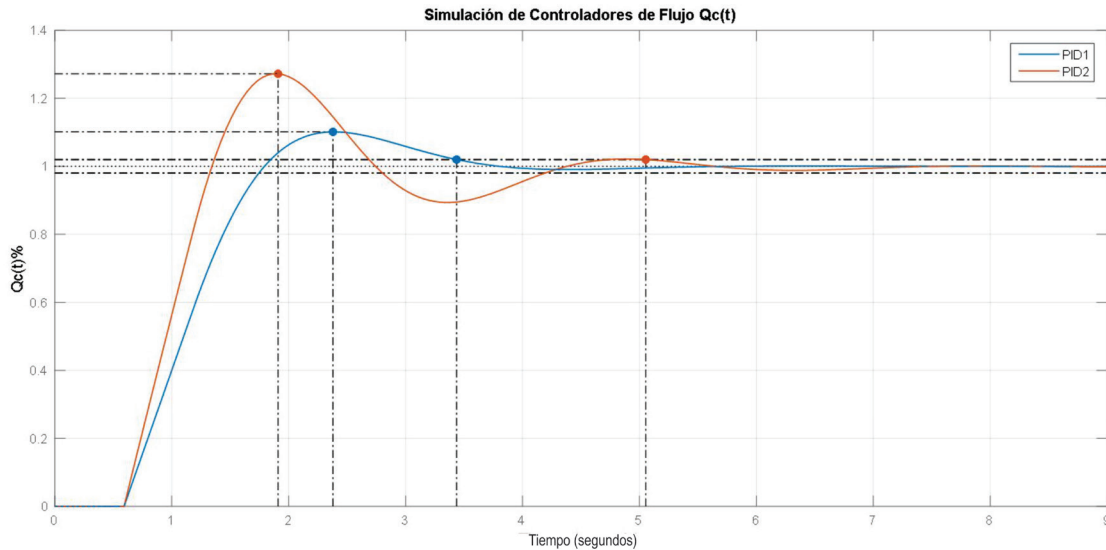


Figura 13. Respuesta de simulación de los controladores PID1 y PID2.

Fuente: Los autores.

La comparación se muestra en la Tabla 3. Considerando “la mejor respuesta” la que tiene menor sobreimpulso y menor tiempo de establecimiento, y a partir de un simple análisis, se concluye que la mejor respuesta es la que ofrece el controlador denominado PID1.

Tabla 3. Comparación de los controladores PID1 y PID2

Controlador	$Mp(\%)$	Ts (s)	Ess
PID1	27,2	5,05	0
PID2	11,1	3,36	0

Se realizó la simulación de los lazos de control primario y secundario, y se compararon las respuestas de los controladores PID3 y PID4.

La respuesta simulada del lazo de control primario con los dos controladores se representó en la Figura 14. La Tabla 4 muestra los parámetros de comparación de las dos respuestas en el tiempo.

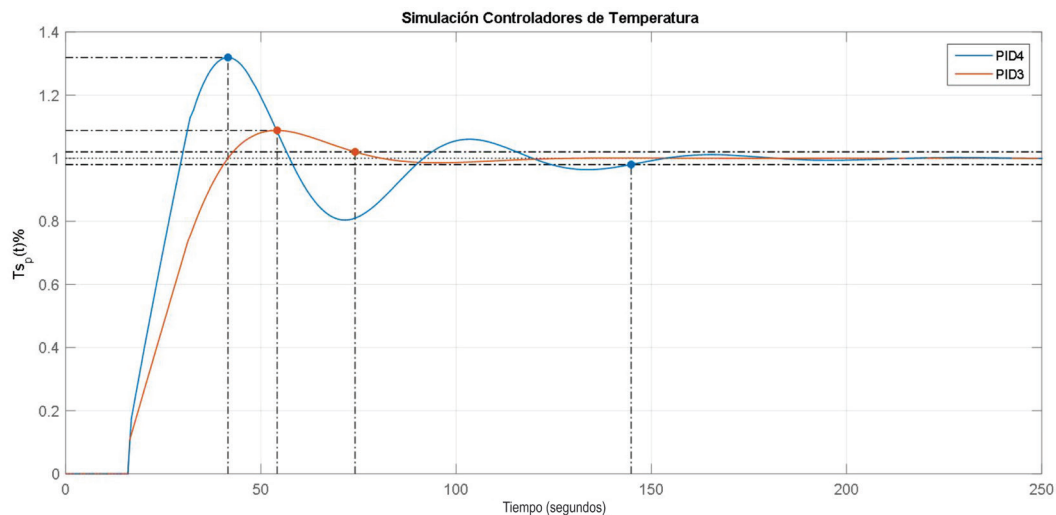


Figura 14. Respuesta de controladores para el lazo temperatura.

Fuente: Los autores.

Tabla 4. Comparación de los controladores PID3 y PID4

Controlador	Mp(%)	Ts (s)	Ess
PID3	34,7	149	0
PID4	11,3	80,9	0

De la comparación se deduce que la mejor respuesta del lazo de control primario o temperatura es la que ofrece la parametrización del controlador denominado PID3. La

simulación completa de la estrategia de control cascada con los controladores PID1 y PID3 se muestra en la Figura 15, en la que se puede visualizar la capacidad del controlador de flujo de seguir la referencia de flujo, parte alta de la figura, y la respuesta dinámica del lazo de control de temperatura, parte baja.

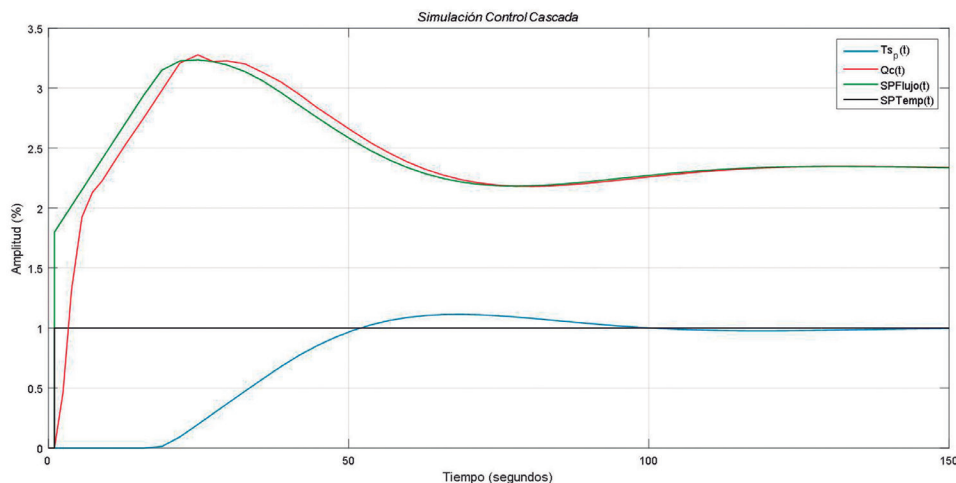


Figura 15. Respuesta del lazo de control cascada Flujo – Temperatura en Simulación.

Fuente: Los autores.

Resultados

Como resultado de la investigación se realizó la implementación de la estrategia de control de cascada temperatura - flujo en la PIT000. La implementación implicó la revisión y ajuste de instrumentos, la programación del PLC, puesta en servicio del proceso en modo automático, parametrización de los lazos de control con los valores obtenidos y desarrollo de pruebas en el proceso en modo automático.

En el desarrollo de pruebas sobre el sistema implementado, un script del Matlab se estableció la señal SP ya sea para caudal o para temperatura, según la prueba realizada. A través de la plataforma se capturaron los datos y se graficó el comportamiento de las variables de interés. Primero se verificó el lazo de caudal. La respuesta del lazo de control de caudal se muestra en la Figura 16, en la que se visualizó la capacidad del controlador de seguir el cambio de SP_F.

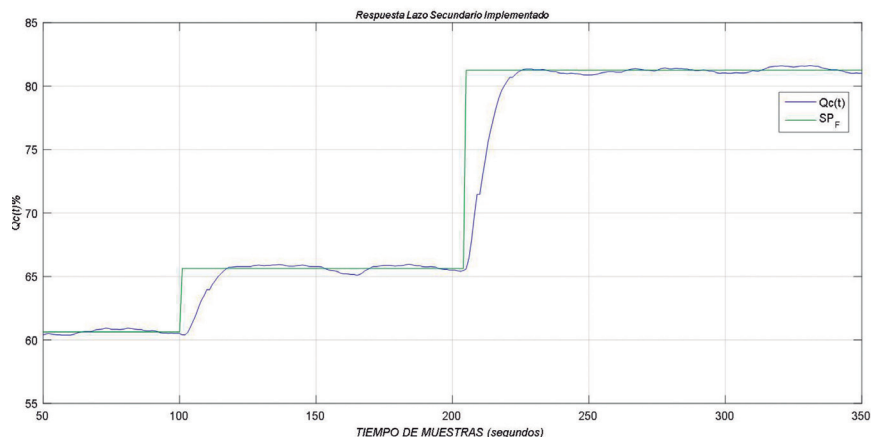


Figura 16. Prueba del lazo de control secundario de flujo de fluido energético.

Fuente: Los autores.

Se verifica luego el comportamiento del lazo de control cascada temperatura – flujo implementado en la PIT000. La respuesta se muestra en la Figura 17. Se puede observar que la señal $Tsp(t)$ muestra un pequeño sobreimpulso y una buena velocidad de respuesta, con lo que se confirma que la simulación y los parámetros de sintonía cumplen con lo esperado en la respuesta del sistema. Los resultados alcanzados en el proyecto validan la hipótesis planteada,

por cuanto muestran que el diseño y la implementación de la estrategia de control en cascada en una planta de intercambio térmico semi-industrial son exitosos. En tal sentido, la discusión planteada por los autores es que a nivel académico e investigativo se deben afrontar retos de diseño e implementación en procesos propiamente industriales, lo cual, es en nuestro caso, es lo que nos anima.

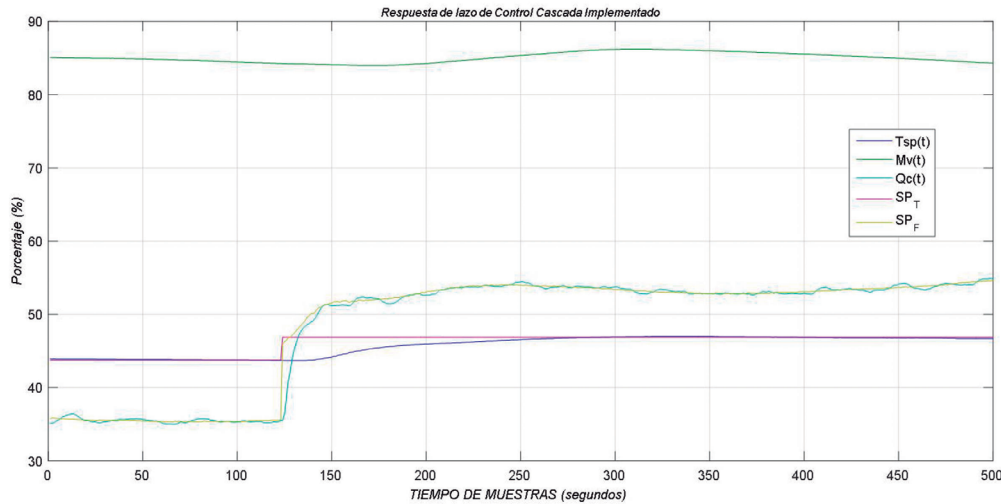


Figura 17. Señales del lazo de control cascada Temperatura - Flujo.

Fuente: Los autores.

Conclusiones

La metodología estudiada y aplicada en el desarrollo de la investigación conlleva a resultados satisfactorios, representados en el buen desempeño de la estrategia de control, por lo que se reconoce su pertinencia para la solución de problemas en las empresas, considerando que la planta PIT000 es de carácter industrial por su tamaño y su dotación tecnológica.

El *Matlab* y sus aplicativos fueron una herramienta fundamental en este trabajo. *Simulink* para la simulación y comparación de controladores, *Ident* para identificación de modelos matemáticos a través de funciones de transferencia, *PID Tuner* para obtener los parámetros de sintonía de los controladores, y el *OPC Tool* para la captura de datos del PLC. Prácticamente es una herramienta que proporciona los medios para dar solución a un problema de control real y que puede ser perfectamente aplicada en la industria.

En la simulación se puede observar que la velocidad de respuesta en lazo cerrado ha mejorado para ambos controladores en relación con la respuesta de los sistemas en lazo abierto. De igual forma en ambos lazos de control, se muestra la capacidad de seguimiento de las consignas,

error de estado estacionario casi nulo y porcentajes de sobreimpulso pequeños.

Las curvas obtenidas de la implementación presentan características generales muy similares a las logradas en simulación. Lo anterior muestra que la metodología propuesta para el diseño del lazo de control es muy práctica, se puede desarrollar en poco tiempo y se consiguen buenos resultados, respecto a los métodos teóricos basados en modelos grises del proceso y de cálculos de parámetros a través de métodos cuantitativos teóricos.

Las prestaciones de la tecnología utilizada en la implementación del sistema de control representan un factor clave en la obtención de los resultados y un referente necesario para su adaptación a escala industrial.

Los resultados obtenidos en la investigación se constituyen en un aporte metodológico y experimental de referencia, para ser adaptado por las empresas que requieren mejorar la regulación de sus procesos en general.

Bibliografía

- Abdulbasid Ismail Isa, Mukhtar F. Hamza. (Oct 2014). Effect of sampling time on pid controller design for a heat exchanger system. Adaptive Science & Technology (ICAST), IEEE 6th International Conference. Covenant University 10 Idioko Road Ota.
- American National Standar. (2009), Instrumentation Symbols and Identification. ANSI/ISA-5.1-2009.
- Chacón A. (2013) Plataforma didáctica para el estudio de procesos térmicos en el laboratorio de instrumentación industrial. (Tesis de Maestría). Universidad Pontificia Javeriana. Bogotá.
- Creus A., (2010) Instrumentación Industrial. España: Alfaomega grupo editor.
- MathWorks (2016). Mathworks.com. Design, test, and implement control systems. Recuperado de <http://www.mathworks.com/solutions/control-systems/>
- MathWorks. (2014a). Mathworks.com. ControlSystemToolbox: user's guide. Matlab. Recuperado de: <https://www.mathworks.com/help/control/>
- MathWorks. (2014b). Mathworks.com. System Identification Toolbox: user's guide. Matlab. Recuperado de: <https://www.mathworks.com/help/ident/>
- Moradi, MH & Johnson MA. (2005). PID Control. New Identification and Design Methods. United States of America: Springer.
- Moreno, J., (2009) Gestión del diseño e implementación de los sistemas didácticos, tecnológicos y técnicos de una planta de intercambio térmico. Unidad de Investigación Aplicada y Desarrollo Tecnológico. Biblioteca SENA.
- O'Dwyer, A. (2009). Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. Imperial College Press. Tercera Edición. doi: <https://doi.org/10.1142/p575>
- Smith CA & Corripio AB. (1991). Control Automático de Procesos: Teoría y práctica. Limusa Noriega editores.
- Srinivas, P. Prasada P. D. Vijaya K, L. (2012) Modelling and Simulation of complex Control System Using Lavbiew. International Journal of Control Theory and Computer Modelling, 2(4). 1-19. doi: <https://doi.org/10.5121/ijctcm.2012.2401>

Influencia del residuo de mampostería (RM) como material cementicio suplementario en la elaboración de morteros¹

Influence of masonry residue (RM) as supplementary cementitious material in the production of Mortars

Recibido: 21- 01 - 2017 Aceptado: 08-05-2017

Yimmy Fernando Silva Urrego²
Marisol Gordillo³
Silvio Delvasto Arjona⁴

¹ **Proyecto:** FP44842-399- 2015: "Investigación de un material cementicio ecoeficiente para elementos de construcción de bajo costo" financiado por COLCIENCIAS.

² Colombiano, Estudiante de Doctorado en Ingeniería de Materiales. Grupo Materiales Compuestos, Universidad del Valle, Cali, Colombia. yimmy.silva@correounivalle.edu.co.

³ Colombiana, Profesora Titular, Ph.D. Grupo Materiales Compuestos, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia.

⁴ Colombiano, Profesor Titular, Ph.D. Grupo Materiales Compuestos, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Resumen

La producción del cemento portland es responsable de aproximadamente el 5% de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) en todo el mundo. Una importante contribución a la sostenibilidad de esta industria es el empleo de puzolanas que disminuyan el contenido de cemento portland para la elaboración de concreto, y más si el material que se utiliza proviene de un residuo como son los de construcción y demolición; por ello se propone el empleo de residuos de mampostería como material alternativo a las puzolanas. En este artículo se presentan los resultados experimentales de la caracterización de un residuo de mampostería (RM) y su evaluación puzolánica. El RM en primera instancia se sometió a un estudio de molienda y posterior análisis mediante las técnicas de fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRX), análisis termo-gravimétrico (TG) y microscopía electrónica de barrido (MEB). Adicionalmente se evaluó el efecto de la incorporación de RM en la resistencia a la compresión en morteros de cemento portland mediante el reemplazo de este en un rango de 0 a 50% a diferentes edades de curado (7; 28; 65 y 90 días), así como las propiedades de densidad y porosidad a 28 días de curado. Los resultados exhiben que este residuo (RM) presenta un comportamiento puzolánico y su porcentaje óptimo de reemplazo en morteros de cemento portland es de 20%.

Palabras clave: Residuo de mampostería; cemento portland; actividad puzolánica; morteros; resistencia a la compresión.

Abstract

Portland cement production is responsible for approximately 5% of global emissions of carbon dioxide (CO₂) around the world. An Important contribution to

the sustainability of this industry is the use of pozzolans that reduce the content of Portland cement for concrete Manufacturing, and more if the material used comes from a residue like construction and demolition; for that reason it is proposed the use of masonry waste as an alternative material to pozzolans. This article presents the experimental results of the characterization of a Masonry residue (RM) and its pozzolanic evaluation. The MRI in the first instance was submitted to a Milling and subsequent analysis using the techniques of X-ray fluorescence (FRX), X-ray diffraction (XRD), Thermo-gravimetric (TG) analysis and electron microscopy (SEM). In addition, the effect of Incorporation of RM in the compressive strength in Portland cement mortars by replacing This in a range of 0 to 50% at different curing ages (7, 28, 65 and 90 days), as well as the properties of density and Porosity at 28 days of curing. The results show that this residue (RM) presents a pozzolanic behavior and their optimum percentage of replacement in Portland cement is 20%.

Keywords: Residue of masonry; portland cement; pozzolanic activity; mortars; compressive strength.

Introducción

Los residuos de construcción y demolición (RCD) son cada vez más comunes en la sociedad moderna, estos están constituidos por diferentes materiales entre los que se encuentran residuos de concretos, cerámicos, maderas, plásticos, metales entre otros (Vegas et al., 2015; Gomes et al., 2015; Özalp et al., 2016). El volumen de estos residuos (RCD) se genera en grandes cantidades, principalmente en zonas urbanas, causando daños al medio ambiente por falta de sitios adecuados para la eliminación, y también por el descuido de la sociedad (Poon, 2007). Entre los materiales que componen los RCD, el concreto y los cerámicos son los que se presentan en mayor cantidad, y en ellos se encuentran los residuos de mampostería (RM).

En la ciudad de Cali-Colombia se producen cerca de 2480 m³ de escombros diarios de los cuales el 23,4% lo aportan las remodelaciones domiciliarias (Ortiz & Silva, 2013). La práctica más común para eliminarlos es la disposición en vertederos autorizados que no dan abasto y por ello mucho de estos residuos son dejados en zonas verdes, parques o lotes. Se estima que hay 108 botaderos crónicos de basura y escombros en la ciudad de Cali así como puntos críticos (El País, 2013), lo que generan problemas debido al deterioro ambiental y paisajístico en las áreas urbanas.

El reciclaje y reutilización de los RCD se ha convertido en un tema de interés mundial y hay una necesidad elevada de tener alternativas de aplicaciones para los diferentes materiales que componen estos residuos. Numerosos estudios se han llevado a cabo con resultados aceptables sobre el uso de RCD como agregado reciclado para aplicaciones en bases y sub-bases de carreteras (Leite, Motta, Vasconcelos & Bernucci, 2011; Rahman et al., 2015; Xuan, Molenaar & Houben, 2015), como agregado grueso para la producción de un concreto nuevo (Shi-cong, Bao-jian & Chi-sun, 2012; Xuan, Zhan & Poon, 2016) y como reemplazo del agregado fino natural (Fan, Huang, Hwang & Chao 2016; Bogas, De Brito & Ramos, 2016).

Otra manera de emplear los RCD y más específicamente los residuos de mampostería (ladrillo de arcilla con mortero adherido) es como reemplazo de cemento portland, ya que su mayor componente: el ladrillo de arcilla, ha experimentado un proceso de cocción (entre 500 °C y 900 °C) donde se produce la deshidroxilación de los minerales arcillosos y se da lugar a la formación de metacaolín el cual es un material amorfo con alta reactividad. Por lo tanto, los residuos en polvo de ladrillo de arcilla (PLA) podrían ser empleados como reemplazo de cemento, generando beneficios ambientales ya que al aprovechar este residuo se logra reducir la disponibilidad de este material en los vertederos, además de disminuir las emisiones de CO₂ generadas en la industria cementera (Ioannou, Ilia & Philokyprou, 2009). Por lo general las arcillas contienen caolinita (Al₂O₃·2SiO₂·2H₂O) que se transforma en metacaolín por calcinación (Siddique & Klaus, 2009; Ilić et al., 2016). La reacción entre la sílice amorfa y la alúmina del metacaolín con el hidróxido de calcio producido en la hidratación del cemento da lugar a la formación de silicato de calcio hidratado (CSH) y aluminato de calcio hidratado (C₄AH₁₃), los cuales promueven en las mezclas (morteros o concretos) alta resistencia y baja permeabilidad (Singh & Garg, 2006).

El objetivo de esta investigación fue explorar la viabilidad de producir morteros de cemento portland mediante el empleo de residuos de mampostería (RM). En consecuencia, esto ayudará a reducir el costo de la producción del mortero y disminuir el impacto ambiental producido por los RCD y la industria cementera. Para ello se evaluó y caracterizó la reactividad puzolánica de los RM provenientes de una demolición domiciliaria, para su posterior uso en la elaboración de morteros. Adicionalmente se estableció el contenido óptimo de incorporación de este material de acuerdo con la resistencia a la compresión.

Metodología

Para el desarrollo de esta investigación, la metodología que se siguió se presenta en la Figura 1. Como primera instancia, se realizó un muestreo del residuo de mampostería en una vivienda en demolición de la zona de Cali, la cual estaba construida en ladrillos de arcilla con mortero de pega de cemento portland (Figura 2). Posteriormente, se realizó la adecuación del residuo (RM) mediante la reducción de tamaño empleando inicialmente

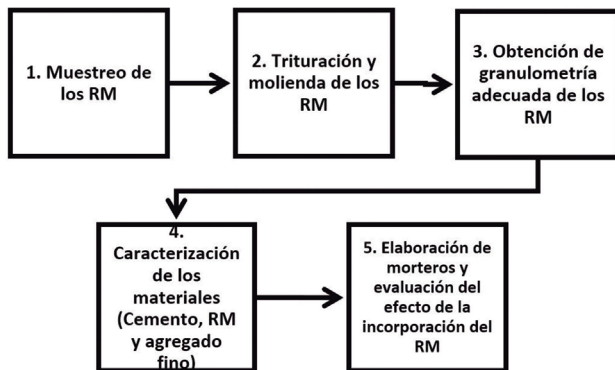


Figura 1. Metodología desarrollada para la caracterización y evaluación del residuo de mampostería (RM).

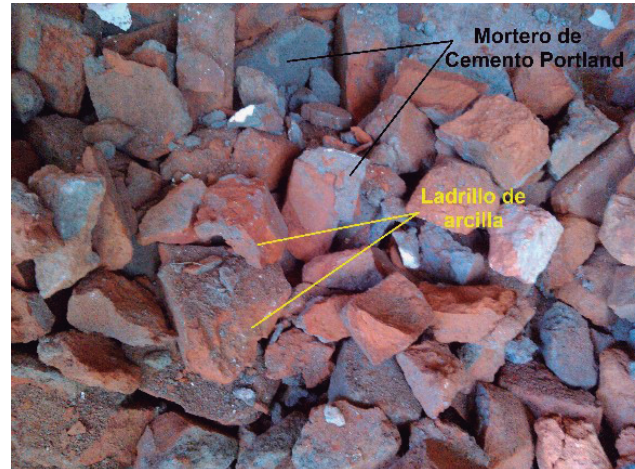


Figura 2. Residuo de mampostería sin moler

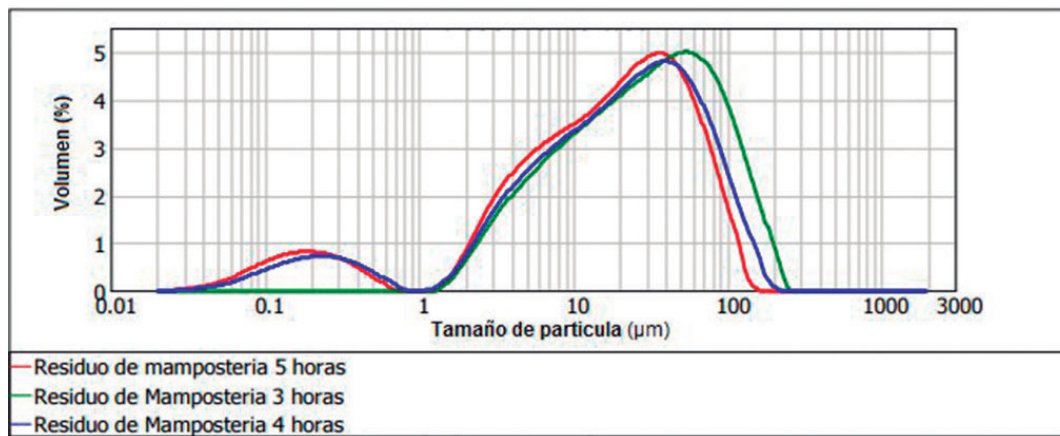


Figura 3. Curva de granulometría del RM a diferentes tiempos de molienda.

Tabla 1. Valores de distribución granulométrica del RM a diferentes tiempos de molienda.

RM	Tiempo de Molienda		
	3 horas	4 horas	5 horas
Diámetro medio (μm)	44,16	31,65	24,08
Diámetro $d(0,1)$ (μm)	4,99	2,19	1,80
Diámetro $d(0,5)$ (μm)	29,01	20,01	15,89
Diámetro $d(0,9)$ (μm)	106,95	78,75	65,04

Materiales

Cemento

Se utilizaron dos tipos de cemento portland, uno sin adición, conocido como cemento concretero para la caracterización puzolánica del RM y otro de uso general para la elaboración de los morteros. La composición química de los cementos se obtuvo mediante fluorescencia de rayos X (FRX).

Residuo de mampostería (RM)

El residuo de mampostería obtenido del proceso de molienda se caracterizó por medio de diferentes técnicas. Primero se determinó la composición química y mineralógica mediante fluorescencia de rayos X (FRX) y difracción de rayos X (DRX) respectivamente. Además se utilizó microscopía electrónica de barrido (MEB) para conocer la morfología de las partículas. Por último, un análisis térmico mediante termo-gravimetría (TGA) se empleó para determinar la pérdida o ganancia de masa de la muestra, y la derivada termo-gravimétrica (DTG) para observar la variación de peso frente a la temperatura.

Métodos de evaluación de la actividad puzolánica del RM

La evaluación de la actividad puzolánica del residuo de mampostería (RM) fue determinado por medio de dos métodos:

1. Evaluación de la puzolanidad por la norma ASTM C618

La norma ASTM C618 presenta los requerimientos químicos y físicos para las cenizas volantes y puzolanas naturales e incorpora los métodos de ensayo estándar de la norma ASTM C311. Los criterios más importantes para la actividad puzolánica son (1) la suma de los componentes químicos, es decir $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ y (2) el índice de actividad puzolánica (IAP), que se define como la relación de la resistencia a la compresión de un mortero con reemplazo del material puzolánico en un 20% (en este caso RM) en masa del cemento con un mortero de control (100% cemento portland). Para la elaboración de estos morteros se empleó una relación agua / cementante de 0,55, cemento sin adición y arena de Ottawa estandarizada.

2. Método químico

El método químico empleado para determinar la actividad puzolánica del RM fue el ensayo de Frattini a 7 y 28 días de curado, descrito en la norma NTC 1512, la cual compara la cantidad de hidróxido de calcio presente en una solución acuosa en contacto con el cemento hidratado contra la cantidad de hidróxido de calcio capaz de saturar un medio de la misma alcalinidad.

Efecto del residuo de mampostería en las propiedades del mortero en estado endurecido

El efecto de la incorporación del RM se determinó mediante la elaboración de morteros con diferentes niveles de sustitución de cemento portland (0% a 50% en peso) por RM en la resistencia a la compresión mediante la evaluación en cubos de 5,08 cm de lado. Para ello se utilizó 1 parte de cemento portland de uso general por 2,75 partes de arena de río y una relación agua/aglutinante de 0,65 (con la que se logró la consistencia adecuada de todas las mezclas). La evaluación de la resistencia a la compresión se realizó a 7,28, 65 y 90 días de curado, con la finalidad de hacer un seguimiento a las reacciones puzolánicas. También se determinó absorción y porosidad bajo el procedimiento descrito en la norma ASTM C642, para ello los especímenes se secaron en un horno a una temperatura de 105 ± 5 °C durante 24 horas. Después de retirar los especímenes del horno, se dejaron enfriar en aire seco y se pesaron. A continuación, las muestras se sumergieron en agua durante 48 horas y se pesaron. Posteriormente las muestras se sumergieron nuevamente en agua y se hirvieron durante 5 horas, seguido a esto se enfriaron y se eliminó la humedad superficial con una toalla para la toma del peso. Como paso final, se tomó el peso hidrostático de cada una de las muestras. Este estudio permitió conocer el rango óptimo de reemplazo de cemento por RM a los 28 días de curado, por medio de un diseño de experimentos completamente al azar, de efectos fijos balanceados.

Diseño del experimento

En la Tabla 2 se presentan las condiciones del diseño, donde se planteó un solo factor (tipo de mezcla) con 6 niveles, lo cual generó 6 tratamientos que fueron asignados al azar a las unidades experimentales, midiendo como variable de respuesta la resistencia a la compresión.

Tabla 2. Condiciones de diseño experimental para optimización de reemplazo de RM en morteros.

Factores	Niveles (%OPC-%RM)	Tratamientos	Unidad experimental	Variable de respuesta
Tipo de mezcla	M1: (1-0)	6	Especímenes de morteros	Resistencia a la compresión (28 días de curado)
	M2:(0,9-0,1)			
	M3:(0,8-0,2)			
	M4:(0,7-0,3)			
	M5:(0,6-0,4)			
	M6:(0,5-0,5)			

Para el análisis de los resultados, se plantea un diseño completamente al azar (D.C.A), donde la variable de respuesta (y_{ij}) es la resistencia a la compresión, μ es la media general, α_i es el efecto debido a la mezcla y ε_{ij} es el error aleatorio. El modelo está dado por:

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6. \quad j = 1, 2, 3.$$

La comparación de las mezclas se realizó por medio de un análisis de varianza (ANOVA), pruebas posanova, y un gráfico de efectos principales. Las hipótesis asociadas al D.C.A son: $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_6$, vs $H_a: \mu_i \neq \mu_j$, las cuales se prueban por medio del ANOVA. Todos los cálculos de los resultados del análisis estadístico se realizaron en el paquete estadístico Minitab 16.

Resultados y discusiones

Cemento

La composición química de los dos tipos de cemento portland se determinó mediante FRX y se presentan en la Tabla 3. Se aprecia una mayor pérdida por ignición (PI) en el cemento de uso general (CG), esto atribuido a la adición calcárea (caliza) que presenta este cemento en su fabricación.

El tamaño de partícula se determinó mediante granulometría láser y los valores de distribución granulométrica se registran en la Tabla 4. En esta se observa que el 50% de las partículas de cemento CG y CA están por debajo de 15,821 y 17,079 respectivamente, presentando un porcentaje mayor de partículas finas el CG.

Tabla 3. Composición química del cemento de uso general (CG) y cemento sin adición (CA)

Componente	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PI
CG % en peso	19,39	4,13	4,70	55,68	1,70	0,31	0,28	3,9	9,21
CA % en peso	17,99	3,88	4,76	62,28	1,71	0,23	0,32	4,03	4,14

Tabla 4. Valores de distribución granulométrica de los dos cementos Portland (CG y CA).

Cemento Portland	CG	CA
Diámetro medio (μm)	20,670	21,650
Diámetro d(0,1) (μm)	1,964	3,594
Diámetro d(0,5) (μm)	15,821	17,079
Diámetro d(0,9) (μm)	46,818	46,555

Residuo de Mampostería (RM)

La composición química del residuo de mampostería se presenta en la Tabla 5, donde se aprecia que se compone principalmente de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ y CaO. La arcilla roja se caracteriza por un bajo contenido de calcio y un mayor contenido de alúmina en comparación con la arcilla amarilla o negra (Eliche-Quesada & Leite-Costa, 2016). En este caso, el residuo de mampostería molido al tener mortero de

cemento portland en su composición se puede presentar una variación en los componentes, al compararse con una arcilla que se emplea para la elaboración de ladrillos. La Figura 4 muestra las imágenes de microscopia electrónica de barrido del RM tomadas a 500X y 1000X. La morfología SEM del RM reveló diferentes tamaños de partículas no mayores a 30 μm. Algunas partículas más finas que otras, con morfología irregular.

Tabla 5. Composición química del residuo de mampostería

Componente	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PI
% en peso	56,859	15,528	7,636	7,881	2,954	2,492	1,362	0,557	3,39

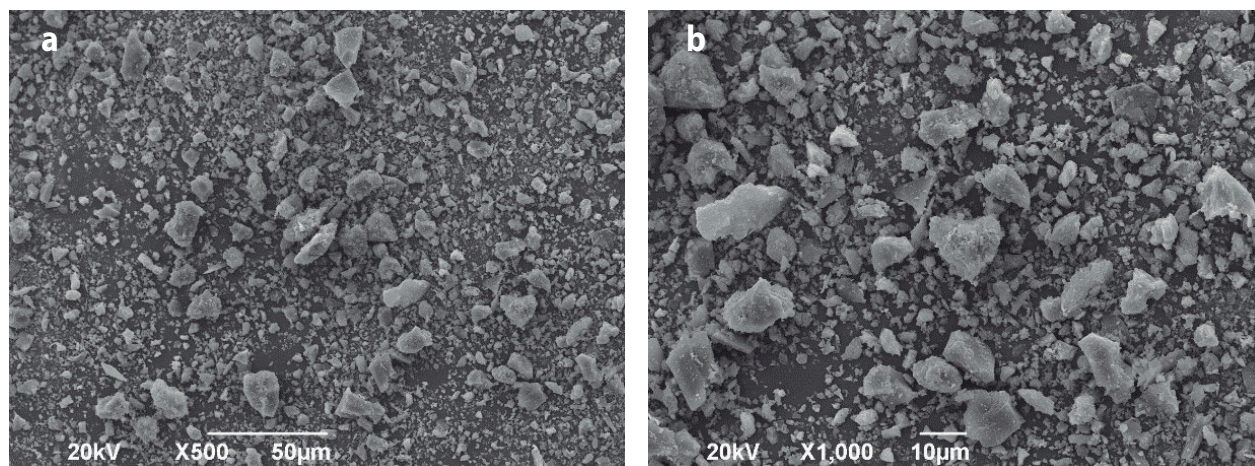


Figura 4. Micrografía SEM del residuo de mampostería a) 500X y b) 1000X

En la Figura 5 se presenta el patrón de difracción del RM obtenido del ensayo de DRX. Se observan picos prominentes correspondientes al cuarzo (picos característicos en 2θ - 24,267; 31,032; 46,16; 49,718; 58,943; 64,69) y picos de otros minerales con menor intensidad como los de la albita, cordierita, anortita y hematita. El pico de mayor intensidad indica que la muestra tiene una gran cantidad de cuarzo (SiO₂), correspondiente a la arena presente en el mortero de pega y al cuarzo que se encuentra en el polvo de ladrillo.

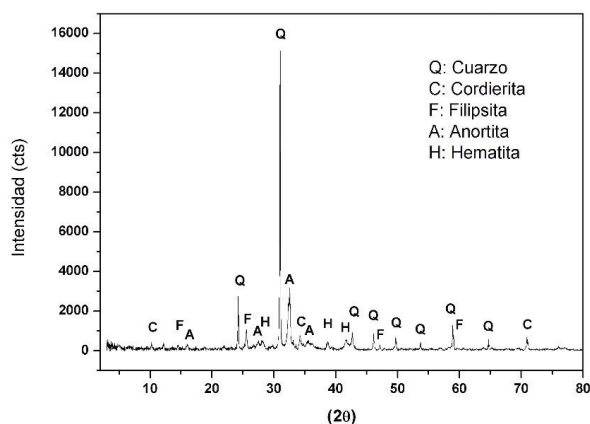


Figura 5. Patrón de DRX de residuo de mampostería.

La Figura 6, presenta los resultados del RM sometido a un análisis simultáneo de termogravimetría (TGA / DTG) detectando los cambios asociados a pérdida de masa por la temperatura. Con el TGA / DTG fue posible determinar la pérdida de peso a diferentes etapas de calentamiento hasta 1100 °C. Se detectó una pérdida de peso en el rango de 25 °C a 150 °C asociada a la humedad presente en la muestra. La

pérdida de peso registrada entre 550 °C y 660 °C se asocia a la reacción endotérmica debida a la transformación de los materiales más comunes presentes en la arcilla: caolinita e ilita (Matias, Faria & Torres, 2014).

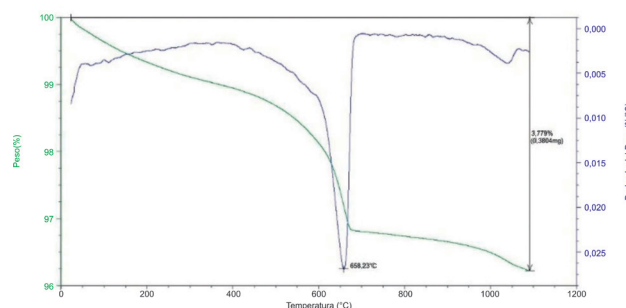


Figura 6. Resultados del análisis térmico diferencial del residuo de mampostería

Valoración de la actividad puzolánica

Puzolanidad por la norma ASTM C618

Basado en la norma ASTM C618, el índice de actividad puzolánica (IAP) es uno de los criterios más importantes para la determinación del rendimiento puzolánico. El IAP se calculó de acuerdo con la relación entre la resistencia a la compresión del mortero adicionado con RM (20%) y el mortero sin adición con base en lo descrito en la norma ASTM C311. De acuerdo con la Tabla 6, el RM cumple con el requerimiento de la norma ASTM C618, la suma de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ es más del 80% y el IAP a los 28 días de curado supera el valor límite establecido en la norma el cual es 75%, por lo que se puede afirmar desde

el punto de vista de composición química y desempeño mecánico que el RM presenta potencial para ser empleado como una adición puzolánica natural. No obstante, el

comportamiento puzolánico de un material debe ser corroborado por medio de otras técnicas que permitan establecer el comportamiento reactivo del RM.

Tabla 6. Propiedades químicas y físicas de las puzolanas de acuerdo con la norma ASTM C618

Requerimientos	Puzolana	
	clase N, ASTM C618	RM
Requerimiento Químico		
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	min, 70,0	80,023
Trióxido de azufre (SO_3)	Max, 4,0	0,557
Contenido de humedad (%)	Max, 3,0	0,21
Perdida por Ignición (%)	Max, 10,0	3,39
Requerimiento Físico		
Índice de actividad Puzolánico (IAP) a 28 días, porcentaje de control	min, 75	84,36

Método Químico - Frattini

Con el fin de complementar los resultados obtenidos de la actividad puzolánica de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C618, se empleó el método químico de Frattini. Este método evalúa la actividad puzolánica mediante la comparación del contenido de $[\text{Ca}^{2+}]$ y $[\text{OH}^-]$ en una solución acuosa que cubre la muestra (80% cemento + 20% puzolana) hidratada a 40 °C por un periodo dado (7 y 28 días), se emplea la curva de solubilidad del hidróxido de calcio en una solución alcalina a la misma temperatura. Según la cantidad máxima de hidróxido de calcio con que la puzolana pueda combinarse y la velocidad a la cual ocurra esta reacción, el material se ubicara en la zona puzolánica (por debajo de la isoterma de solubilidad) o

no puzolánica de la curva de saturación de Frattini. En la Figura 7, se observa que al pasar 7 días de contacto entre los materiales, no se aprecia una actividad puzolánica aceptable debido a que el consumo de los iones de calcio y la alcalinidad total no fueron suficientes, por lo que el RM se ubica por encima de la isoterma de solubilidad de $\text{Ca}(\text{OH})$. Sin embargo, a los 28 días, la concentración de CaO en la solución disminuye al igual que la alcalinidad, por lo que el RM logró ubicarse en la región puzolánica o de baja saturación, este comportamiento indica que una gran proporción de hidróxido de calcio generado durante la hidratación del cemento portland ha sido consumida por la reacción puzolánica (Tironi, Trezza, Scian & Irassar, 2012), de esta forma se corroboran los resultados obtenidos por el método mecánico (IAP).

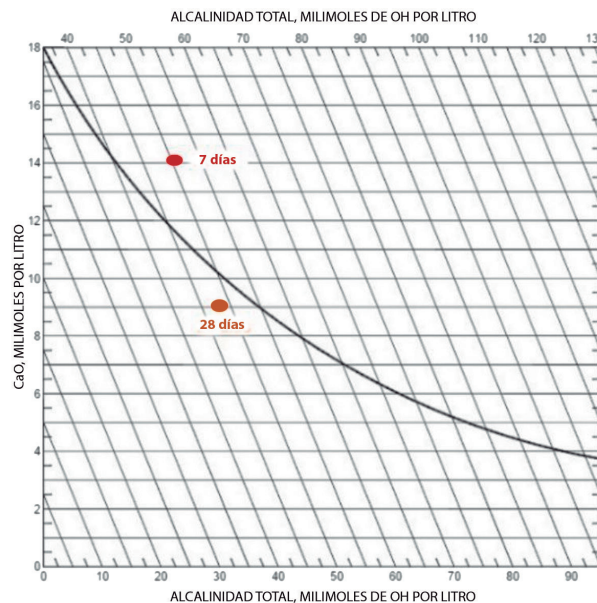


Figura 7. Diagrama de la prueba de Frattini para el residuo de mampostería.

Efecto de la incorporación del residuo de mampostería en diferentes proporciones en las propiedades del mortero en estado endurecido

Una vez evaluado el comportamiento puzolánico del RM, mediante sus características físicas y químicas; se produjeron 6 diferentes mezclas de morteros, con las proporciones en peso de material cementante: 1:2,75 arena. Las mezclas se designaron de la siguiente manera: la mezcla de control - (M1), la mezcla con 10% de RM - M2:(0,9-0,1); con 20% de RM - M3:(0,8-0,2); con 30% de RM - M4:(0,7-0,3); con 40% de RM - M5:(0,6-0,4) y 50% de RM - M6:(0,5-0,5). La resistencia a la compresión de las mezclas se evaluó a diferentes edades de curado (7, 28, 65 y 90 días) y los resultados se presentan en la Figura 8. Se observa que la resistencia a la compresión está influenciada por el porcentaje de sustitución del RM. En general, la sustitución parcial del cemento por RM resulta en una menor resistencia, sin embargo en el caso de los morteros con reemplazos hasta el 20% de RM la diferencia no es tan grande. La reducción de la resistencia se hace mayor a medida que el nivel de reemplazo incrementa. La influencia del decrecimiento es más importante a edades cortas (7 y 28 días de curado), después de este tiempo, esta diferencia disminuye debido a que la resistencia del mortero de referencia se hizo casi estable, pero los morteros con RM incrementaron continuamente hasta los 90 días de curado. En los morteros con RM, cuando el nivel de sustitución cambio de 0 a 10%, 20%, 30%, 40% y 50% la resistencia a la compresión disminuyó en 9,4%, 19,3%, 32,3%, 48,5% y 59,9% respectivamente a los 28 días y 7,1%, 13,1%, 24,4%, 38,43% y 48,42% a los 90 días. La reducción podría ser causada por el efecto dilución y la baja reactividad del material reactivo presente en el RM principalmente a edades tempranas, por lo que el efecto puzolánico de la adición se evidenció a los 90 días de curado, disminuyendo la diferencia entre la resistencia del mortero en referencia y las mezclas que contienen este residuo.

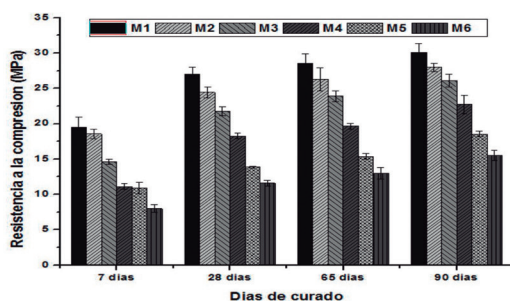


Figura 8. Resistencia a la compresión de morteros con RM.

Por otra parte, en el análisis del modelo del diseño (Tabla 7), se hallaron los siguientes resultados:

- El modelo cumple con los supuestos sobre el error (normalidad, homogeneidad) a niveles de significancia mayores del 10%.
- Con un R^2 del 98,75%, el cual indica que se ejerció un buen control del experimento, dado que la variación está siendo explicada por la mezcla y no por los errores, resultado que también se evidencia en la suma de cuadrados.
- Con respecto a la comparación de las mezclas, a un nivel de significancia 0,0000 existe diferencia entre las medias de las mezclas (M1, M2, M3, M4, M5 y M6), es decir, que por lo menos hay un par de medias que tienen un efecto distinto sobre la resistencia a la compresión de los morteros.

Tabla 7. Análisis de varianza de la resistencia a la compresión (MPa)

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	p-valor
Mezcla	544,3	0,0000
Error	4,83	
Total	249,16	

Con el fin de establecer que, entre las mezclas hay diferencias y cuál es la mezcla óptima de sustitución de cemento portland por RM en morteros a los 28 días de curado, se realizó una prueba post-anova empleando la prueba de Tukey a un nivel de significancia del 5% (Tabla 8). Se encontró que las mezclas M2 y M3 se hallan por encima de la media (ubicados en el mismo grupo de la mezcla de control-M1), como se observa en la Figura 9, lo que indica que hasta un 20% de RM de incorporación de este material presentan resultados apropiados que superan los 21 MPa a los 28 días de curado, además de tener una ventaja desde el punto de vista ambiental y económico ya que se está dando un empleo apropiado a este residuo generando una disminución en el consumo de cemento portland, lo que conlleva una menor producción de CO_2 derivado de la fabricación de este aglomerante, además de darle un uso a los grandes volúmenes de residuos de construcción y demolición, lo que evita la necesidad de más zonas de disposición final.

Tabla 8. Prueba Post-Anova empleando el método Tukey

Tipo de Mezcla	N	Subconjunto					
		1	2	3	4	5	6
M6	3	11,52					
M5	3		13,89				
M4	3			18,26			
M3	3				21,51		
M2	3					24,46	
M1	3						26,99

Fuente: Los Autores

Otras variables importantes que se midieron fueron la absorción, la densidad aparente y el volumen de poros permeables, los cuales se calcularon de acuerdo con la norma ASTM C642 posterior a los 28 días de curado. Los resultados se muestran en la Tabla 9. Como se evidencia en la Tabla, la adición del RM genera un aumento en el

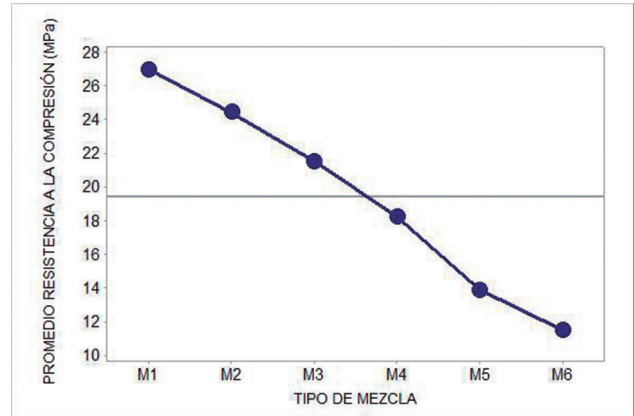


Figura 9. Gráfico de efectos principales de la resistencia a la compresión a 28 días de curado.

porcentaje de absorción y volumen de poros permeables; y una disminución en la densidad aparente. Esto puede ser atribuido a que al no reaccionar completamente el agua en la mezcla, como consecuencia de la presencia del RM, esta queda libre en la estructura y al evaporarse deja poros en la mezcla.

Tabla 9. Resultados de absorción, densidad y porosidad de acuerdo con la norma ASTM C642.

Mezcla	% de absorción después de inmersión	Densidad Aparente (kg/m ³)	% de Volumen de poros permeables
M1	11,62	2599	22,59
M2	11,91	2554	22,77
M3	12,28	2537	23,01
M4	12,70	2536	24,16
M5	13,4	2525	25,21
M6	13,54	2524	25,52

Conclusiones

El presente trabajo pretendía caracterizar y valorar los residuos de mampostería domiciliaria-RM (ladrillo de arcilla y mortero de cemento portland) en la ciudad de Cali, Colombia. Este material de desecho de construcción y demolición se incorporó en morteros de cemento portland como reemplazo parcial de este aglomerante y su influencia en el comportamiento mecánico de los morteros con diferentes porcentajes fue analizado, obteniendo las siguientes conclusiones:

La caracterización del RM respecto a su comportamiento físico y químico revela que este material puede ser considerado como material puzolánico, ya que el IAP fue superior al 75% como está especificado en la norma

ASTM C618 y el ensayo de Frattini muestra la fijación del calcio ubicándolo por debajo de la curva de saturación a los 28 días.

La resistencia a la compresión de los morteros con RM en su composición, presentaron valores inferiores al mortero de referencia, independientemente del porcentaje de reemplazo. Esta diferencia se hizo menor a medida que se incrementaban las edades de curado, lo que permite concluir que el RM es una adición de lenta reacción ya que a edades tempranas no aporta a la evolución de resistencias, por el contrario afecta estos desarrollos por el efecto dilución.

El RM presenta un color rojizo lo que le otorga a las mezclas con cemento portland una pigmentación, que puede ser interesante para fines de conservación,

rehabilitación y en algunos casos prescindir de la necesidad de pinturas, por ejemplo en elementos arquitectónicos. Por lo tanto, la sustitución del cemento portland por RM parece ser una solución prometedora.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a: Grupo de materiales Compuestos (GMC) de la Escuela de Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle y Centro de Excelencia de Nuevos Materiales (CENM); al proyecto FP44842-399- 2015: "Investigación de un material cementicio ecoeficiente para elementos de construcción de bajo costo" financiado por COLCIENCIAS- "El Patrimonio Autónomo Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, Francisco José de Caldas y al Departamento Administrativo de Ciencia y Tecnología (Colciencias)" por el apoyo brindado para el desarrollo de esta investigación.

Bibliografía

- Bogas, J.A., De Brito, J. & Ramos, D. (2016). Freeze-thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 115, 294-304. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.065>
- El País (2013). Elpais.com.co. Recuperado de <http://www.elpais.com.co/elpais/cali/noticias/estos-son-cinco-problemas-cronicos-rehusan-desaparecer-cali>
- Eliche-Quesada, D. & Leite-Costa, J. (2016). Use of bottom ash from olive pomace combustion in the production of eco-friendly fired clay bricks. *Waste management*, 48, 323-333. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.042>
- Fan, C., Huang, R., Hwang H. & Chao, S.J. (2016). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes. *Construction and Building Materials*. 112, 708-715. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.154>
- Gomes, P.C.C., Ulsen, C., Pereira, F.A., Quattrone, M. & Angulo S.C. (2015). Comminution and sizing processes of concrete block waste as recycled aggregates. *Waste Management*. 45, 171-179. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.008>
- Ilić, B., Radonjanin, V., Malesev, M., Zdujic, M. & Mitrivic A. (2016). Effects of mechanical and thermal activation on pozzolanic activity of kaolin containing mica. *Applied Clay Science*. 123, 173-181. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.01.029>
- Ioannou, I., Ilia, A. & Philokyprou M. (2009). Use Of Crushed Fired Clay Ceramics In The Production Of Mortars. *Sustainable Development and Planning IV*. 120, 257-264. doi: <https://doi.org/10.2495/sdp090251>
- Leite, F.C., Motta, R.S., Vasconcelos, K.L. & Bernucci, L. (2011). Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*. 25(6), 2972-2979. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.105>
- Matias, G., Faria, P. & Torres, I. (2014). Lime mortars with ceramic wastes: Characterization of components and their influence on the mechanical behavior. *Construction and Building Materials*. 73, 523-534. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.108>
- Ortiz, H., Silva, M.S. (2013). Elpais.com.co. Recuperado de <http://www.elpais.com.co/mundo/infografia-de-donde-vienen-y-a-donde-van-a-parar-los-escombros-de-cali.html>
- Özalp, F., Yilmaz, H.D., Kara, H.D., Kaya, O. & Sahin A. (2016). Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes. *Construction and Building Materials*. 110, 17-23. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.030>
- Poon, C.S. (2007). Reducing construction waste. *Waste Management*, 27(12), 1715-1716. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.013>

- Rahman, M.A., Imteaz, M.A., Arulrajah, A., Piratheepan, J. & Disfani M.M. (2015). Recycled Construction and Demolition materials in permeable pavement systems: Geotechnical and hydraulic characteristics. *Journal of Cleaner Production*. 90, 183-194. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.042>
- Shi-cong, K., Bao-jian, Z. & Chi-sun, P. (2012). Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*. 28, 549-556. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.027>
- Siddique, R. & Klaus, J. (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science*. 43(3-4), 392-400. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.11.007>
- Singh M. & Garg M. (2006). Reactive pozzolana from Indian clays – their use in cement mortars. *Cement and Concrete Research*. 36(10) 1903–1907. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.12.002>
- Tironi, A., Trezza, M.A., Scian, A. & Irassar E. (2012). Kaolinitic calcined clays: Factors affecting its performance as pozzolans. *Construction and Building Materials*. 28(1) 276–281. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.064>
- Vegas, I., Broos, K., Nielsen, P., Oliver, L. & Lisbona A. (2015). Upgrading the quality of mixed recycled aggregates from construction and demolition waste by using near-infrared sorting technology. *Construction and Building Materials*. 75, 121-128. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.109>
- Xuan, D., Zhan, B. & Poon, C.S. (2016). Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*. 65, 67-74. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.018>
- Xuan, D.X., Molenaar, A.A.A. & Houben L.J.M. (2015). Evaluation of cement treatment of reclaimed construction and demolition waste as road bases. *Journal of Cleaner Production*. 100, 77-83.

Pulvimetalurgia: Proceso sostenible para la fabricación de carburos cementados en Colombia

Powder metalurgy: Sustainable process for the manufacture of cemented carbides In Colombia

Recibido: 15- 11 - 2016 Aceptado: 20-05-2017

Luis Carlos Ardila Téllez¹
Andrés Fernando Gil Plazas²
Víctor Guillermo Barrientos Sossa³
Liz Karen Herrera Quintero⁴

¹ Colombiano. Ph.D. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Grupo de análisis de falla, integridad y superficie (AFIS). E-mail. lcardilat@unal.edu.co.

² Colombiano, Ing. Centro de Materiales y Ensayos. SENA. Regional Distrito Capital. Grupo GIMES. E-mail. aisisae@misena.edu.co.

³ Colombiano. M.Sc. Centro de Materiales y Ensayos. SENA. Regional Distrito Capital. Grupo GIMES. E-mail. vbarrientos@misena.edu.co.

⁴ Colombiana. Ph.D. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Grupo de análisis de falla, integridad y superficie (AFIS). E-mail. lherreraq@unal.edu.co.

Resumen

En este trabajo se da a conocer la oportunidad de impulsar la industria colombiana hacia el desarrollo de nuevos materiales de altas prestaciones fabricados por vías pulvimetalúrgicas (PM) como alternativa a los procesos de fabricación convencional, generando nuevas necesidades para la industria nacional. El objetivo es describir el proceso de fabricación de materiales compuestos, tipo **CERMET**, formado por una fase **CER**ámica la cual es carburo de wolframio (WC) y una fase **MET**álica que es el cobalto (Co) y analizar los cambios a nivel microestructural de los materiales fabricados utilizando el proceso de sinterización en vacío. La aleación diseñada fue una mezcla de 88%WC y 12%Co de designación ISO K40; el proceso involucró el control de los materiales precursores que se encuentran en forma de polvo, seguido de los procesos de mezcla y molienda, para luego realizar la compactación y sinterización. Se estudian las microestructuras y composiciones químicas obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS); con el fin de evaluar el comportamiento mecánico del CERMET fabricado, se realizaron ensayos de microdureza alcanzando valores de 1289HV0.5 que se correlaciona con los bajos niveles de porosidad obtenidos de tipo A02, B00, C00, y tamaño de grano medio de 1,14 μm . Estos resultados indican que es posible fabricar materiales con altas prestaciones de resistencia al desgaste en el país. Se resalta la importancia que tiene potenciar la sinergia entre entidades gubernamentales como SENA-Colciencias –Universidad Nacional para generar investigación aplicada en el país.

Palabras clave: Pulvimetalurgia; carburo de wolframio; polvos metálicos; compactación CERMET; sinterización.

Abstract

This paper presents the opportunity to promote the Colombian industry towards the development of new high performance materials manufactured by powder metallurgy (PM) as an alternative to the conventional manufacturing processes, generating new needs for the national industry. The objective of this work is describe the manufacturing processes of composite materials, type CERMET, formed by a CERAMIC phase, which is tungsten carbide (WC), and a METAL phase which is cobalt (Co). Additionally, analyze at microstructural level the manufactured materials using vacuum sintering process. The designed alloy was a mixture of 88% WC and 12% Co according to ISO K40 standard. The process involved the control of precursor materials, found in powder form, followed by mixing and milling steps, and finally compaction and sintering. The microstructures and chemical compositions obtained by scanning electron microscopy (SEM-EDS) were studied in order to evaluate the mechanical behavior of the CerMet; for that, microhardness tests were performed reaching values of 1289HV0.5, which are related with the low porosity levels such as A02, B00, C00, and average grain size of 1.14 μm . These results indicate that is possible to manufacture wear resistance high performance materials in the country. It highlights the relevance of enhancing the synergy between government entities such as SENA-Colciencias -Universidad Nacional to create applied research in the country.

Keywords: Powder metallurgy; tungsten carbide; metallic powders; compaction; CERMET; sintering.

Introducción

La innovación en el sector industrial es clave para la generación de empleo y la competitividad de las empresas; es por esto que la colaboración entre investigadores, universidades y empresas es crucial para generar nuevas fuentes de conocimiento y oportunidades de negocio. De aquí la importancia que cobra para la industria nacional adoptar la innovación partiendo de los retos a los que se enfrenta en un mercado abierto y competitivo. En este sentido, Colombia en las últimas décadas ha tomado la posición de un país netamente consumidor, en donde la importación de materia prima y producto terminado de alto desempeño se ha visto incrementada generando desindustrialización a nivel local y nacional. Ante este panorama, es primordial que en el país se dinamice el estudio de tecnologías de fabricación poco implementadas que

den solución a estas necesidades, una de estas alternativas es la implementación de la pulvimetalurgia (PM). Este proceso de fabricación consiste en la producción de piezas por medio de la compactación de polvos (prensado) y su posterior tratamiento térmico (sinterización) a temperaturas por debajo del punto de fusión del material. La fabricación de componentes PM se inicia con la mezcla de los polvos metálicos, cerámicos o mezcla de estos con el lubricante y los aditivos. Esta mezcla es compactada dentro de un molde con la forma deseada mediante la aplicación de presión, que para el caso de aceros sinterizados oscila entre 400 y 700 MPa (Randall, 1989). Después de la compactación, el polvo toma las propiedades de un sólido y dicho estado del proceso se denomina usualmente “en verde”. Posteriormente, en el sinterizado bajo atmósfera controlada, ya sea en vacío o con el uso de gases (Ar, H₂, N₂, entre otros) se produce la unión metalúrgica entre las partículas. Tras el sinterizado, algunas piezas son utilizadas directamente en la condición de sinterizado mientras que otras son sometidas a operaciones secundarias de acabado (mecanizado, calibrado, impregnación de aceite, recubrimientos, entre otros) o tratamientos térmicos (nitruración, temple, entre otros).

Los componentes fabricados por (PM) presentan ciertas ventajas frente a procesos convencionales ya que se requieren tiempos relativamente cortos de procesamiento, el consumo energético es 40% menor a los procesos convencionales; así mismo es sabido que el 85% de la materia prima (polvos) de la PM provienen de material reciclado (Metal Powder Industries Federation, 2017) y además se obtienen materiales con excelentes propiedades mecánicas, tribológicas y frente a corrosión; no obstante es una tecnología que requiere una inversión inicial y un mantenimiento importante y que solo es económicamente viable cuando la producción de piezas es elevada. Por otro lado, debido a que el material de partida en este proceso de fabricación está en forma de polvo, la densidad aparente es mucho menor que la densidad del sólido con lo cual se logra disminuir el peso de los productos terminados. Por medio de la pulvimetalurgia se puede llegar a obtener materiales con densidades muy elevadas, cercanas al 98%, con una microestructura fina, homogénea y distribución uniforme en carburos e inclusiones. Dichas características son difíciles de conseguir mediante métodos convencionales como la fundición donde la segregación, producida durante el proceso de solidificación, no es fácil de controlar y es factible obtener microestructuras gruesas y no homogéneas acompañadas por bajas propiedades transversales debidas a la formación de granos heterogéneos, así como deficiencias en el control del tamaño del mismo (Hoeganaes, 2002).

La PM es una opción interesante en aplicaciones que demanden aleaciones de difícil procesamiento por métodos convencionales, materiales especiales con exigentes propiedades mecánicas y térmicas sumado a un excelente comportamiento frente al desgaste y la corrosión como es el caso de los aceros de herramientas (M2, M3, entre otros.) y los metales duros (Hilliskog, 2003).

Los carburos cementados o metales duros son uno de los materiales compuestos con mayor éxito que se hayan diseñado, los cuales poseen características químicas y térmicas sobresalientes; así como propiedades de dureza, resistencia a la abrasión y erosión excepcionales (Katiyar, Singh, Singh & Kumar, 2016). Esta combinación de propiedades se debe a que estos materiales compuestos están formados por metales de transición refractarios y frágiles como WC, TiC, TaC, Cr_3C_2 o Mo_2C los cuales están combinados con una fase metálica (matriz) compuesta principalmente por Co, Ni, Fe (Upadhyaya, Sarathy & Wagner, 2001; Chan & Chan, 2014). Estos materiales también son conocidos como CERMET (Cerámico-Metálico) debido a la presencia de una fase cerámica, que para este trabajo será el WC dispersa en una matriz metálica de cobalto. El papel fundamental de la fase cerámica es dotar al material de resistencia mecánica y dureza; mientras que la fase metálica protege la fase cerámica, logrando aumentar considerablemente la ductilidad, tenacidad y reducir la posibilidad de fractura frágil del material compuesto (Vinicius et al, 2011). Este tipo de materiales ha sido el preferido durante muchos años para aplicaciones de alta exigencia como herramientas de corte, procesos en sectores de minería (oil&gas), entre otros (Katiyar, Singh, Singh & Kumar, 2016; Gant, Gee, Gohil & Jones, 2013).

A partir de la PM, es posible fabricar una generación de nuevos materiales sostenibles como consecuencia de las mejoras e innovaciones en todas las etapas del proceso de fabricación. En consecuencia, este proceso es reconocido como una tecnología verde cuya sostenibilidad está basada en la eficiencia de las materias primas, el consumo energético y su impacto medioambiental.

En cuanto a las materias primas, los polvos, los esfuerzos se han centrado en el reciclaje y la reutilización de estos, se estima que el 85% de los polvos usados en PM provienen de material reciclado (Metal Powder Industries Federation, 2016).

En este contexto existe un nicho de mercado potencial en cuanto a la obtención de polvos a partir de procesos hidrometalúrgicos (Shibata, Murayama. & Masakazu, 2014) así como la reutilización de los minerales que se producen

en el país. En este aspecto, el apoyo de instituciones como la Universidad Nacional de Colombia y centros de formación e investigación como el SENA hacia la industria es necesario para generar una sinergia académica-científica e industrial. Es importante resaltar que la reducción en el consumo energético para componentes obtenidos por PM puede llegar al 44% en comparación con componentes fabricados por fundición o mecanizado (Metal Powder Industries Federation, 2016). Esta disminución está asociada a la naturaleza *net-shape* de la PM que minimiza la utilización de post procesamiento. Finalmente, el impacto medioambiental, es consecuencia de los dos aspectos anteriormente mencionados, ya que tanto el reciclaje de la materia prima como la reducción del consumo energético resulta en un proceso altamente eficiente.

En este trabajo se presenta la ruta completa de fabricación de un metal duro convencional desde el diseño composicional de la aleación hasta el tratamiento térmico de sinterización. Se analizan los resultados de la microestructura de los materiales fabricados mediante el uso de técnicas de caracterización como la de microscopía óptica (MO), microscopía electrónica de barrido y análisis por energías dispersivas de rayos X (SEM-EDS) y ensayos de microdureza. Estos resultados muestran que es posible fabricar metal duro u otros materiales pulvimetalúrgicos a nivel de laboratorio e industrial con calidades iguales e incluso superiores a las que se usan en el país y que actualmente se importan de Europa, Estados Unidos o China (Villar, 2009)

Metodología

Descripción del proceso de fabricación

En la Figura 1 se muestra la ruta crítica que se ha llevado a cabo para la obtención de carburos cementados fabricados en consorcio Universidad Nacional –SENA.

Preparación de la mezcla

Para la mezcla, nombrada CERMET 1, se usaron polvos de WC y cobalto, en la Figura 2 se muestra la distribución de tamaño de partícula de los polvos empleados para la fabricación de la aleación. La composición química realizada es mostrada en la Tabla 1 y corresponde a una aleación tipo ISO K40 (ISO 513, 2004).

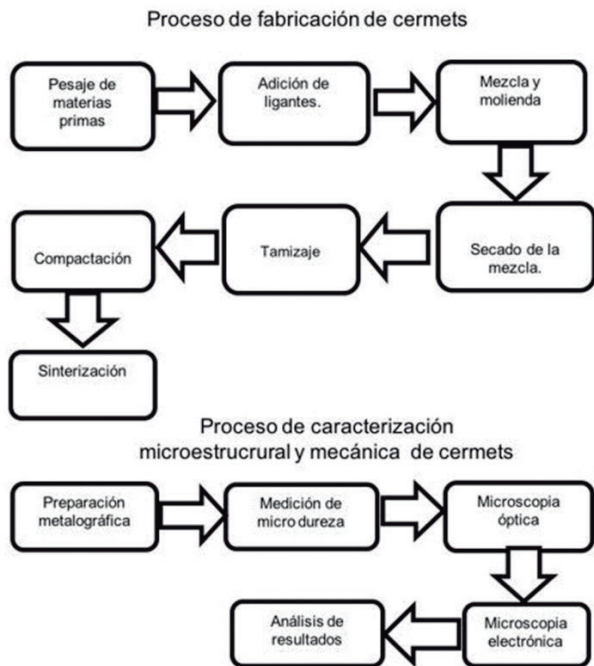


Figura 1. Diagrama de Flujo para la fabricación y caracterización de CERMETS.

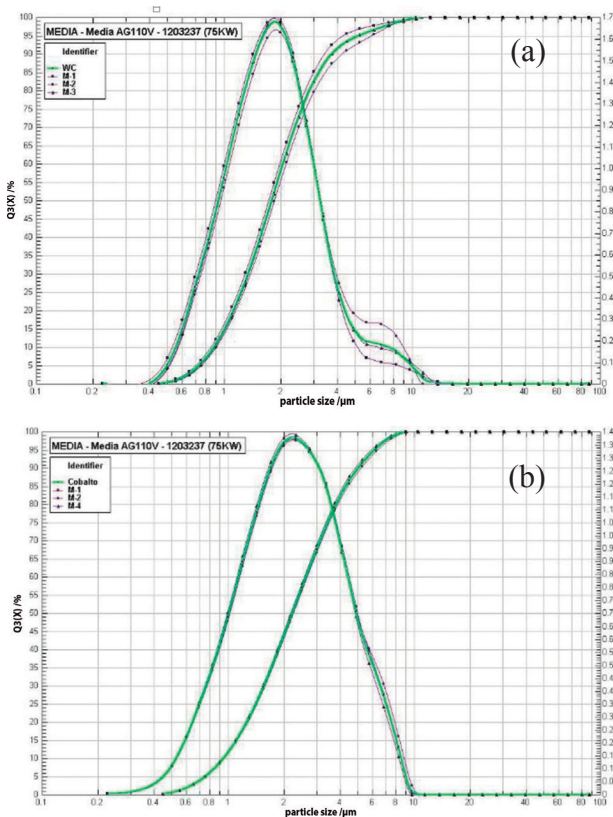


Figura 2. Distribución de tamaño de partícula de los polvos de WC (a) y cobalto (b)

De acuerdo con el análisis de difracción por láser, llevado a cabo con un equipo SYMPATEC HELOS (H0852)

& RODOS, la distribución de partícula para el WC (Figura 2a) es de 1,6 μm ; mientras que para el cobalto es de alrededor de 1,4 μm como se observa en la Figura 2b.

Tabla 1. Composición química del material de estudio.

Designación	WC	Co
CERMET 1(ISO K40)	88%	12%

Para la preparación de la mezcla, en primer lugar se pesaron los polvos, carburo de wolframio y de su aglomerante Cobalto, los cuales se han adicionado en un recipiente de carburo de wolframio (WC) junto con esferas del mismo material, como se muestra en la Figura 3a. Este proceso se lleva a cabo en vía húmeda con hexano con el fin de facilitar la homogenización de los materiales y también para facilitar la eliminación de calor durante el proceso.

Mezclado y molienda

En la Figura 3b se muestra el proceso de mezclado que se llevó a cabo en un molino planetario, en donde el objetivo es homogenizar y mezclar los polvos que constituyen esta aleación, el proceso se ve favorecido por el impacto de las esferas de carburo de wolframio así como el movimiento rotatorio del recipiente. Para garantizar que el material fabricado cumpla con los requerimientos deseados (microestructura y propiedades mecánicas) es primordial controlar parámetros de este proceso como la relación de esferas-material, velocidad de giro y tiempo de molienda.

Completado el proceso de mezcla y molienda se procede al secado del polvo con la ayuda de un baño termostático a una temperatura de 90 $^{\circ}\text{C}$, en la Figura 4a se observa el aspecto de la mezcla una vez se ha evaporado el hexano. Posterior a esto se extrae la mezcla y se tamiza para eliminar la aglomeración del polvo y homogenizarlo como se muestra en la Figura 4b para luego seguir con la etapa de compactación.

Etapas de compactación del material en forma de polvo

Para esta etapa se pesaron cantidades de aproximadamente 10 gramos para su compactación, con el fin de obtener probetas cilíndricas de diámetro 16 mm y 4 mm de espesor. La compactación del polvo consiste en aplicar cargas en dos direcciones contrarias hacia el centro del molde mediante dos punzones en una matriz que contiene la forma determinada; en primer lugar se realiza el posicionamiento del punzón inferior dentro del

molde, seguido de esto se adiciona el polvo en el molde y por último se coloca el punzón superior. Mediante una máquina universal de ensayos (Shimadzu UH-50A) se aplican presiones de compactación entre 140 MPa y 230 MPa, como se muestra en la Figura 5 (a y b). A este proceso de compactación se le denomina de matriz flotante.

Compactado el polvo se realiza la extracción de las probetas cilíndricas las cuales se encuentran en estado verde (ver Figura 5c), por lo cual son materiales muy frágiles y de resistencia mecánica muy baja.

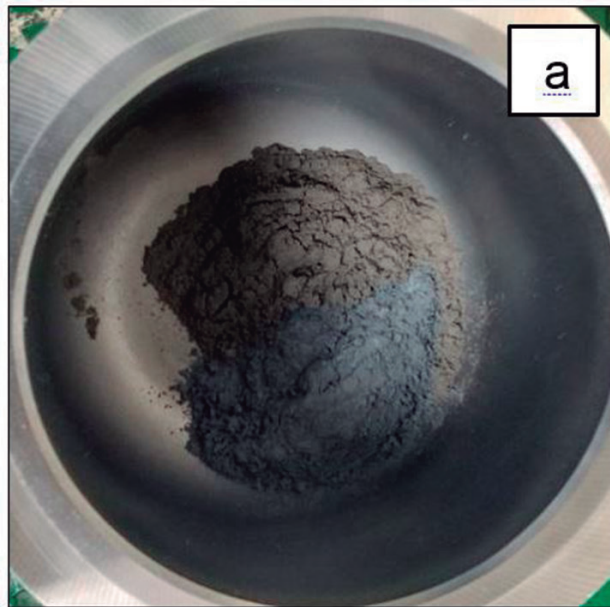


Figura 3. (a). Polvo cerámico y metálico dentro del recipiente
(b) Molino planetario donde se realiza la mezcla y molienda del material en polvo

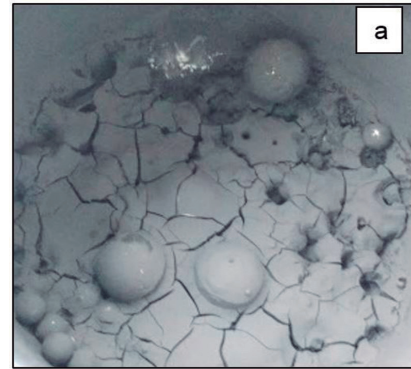


Figura 4. (a) Estado final de la mezcla tras el secado.
(b) Muestra de polvo lista para compactación.



Figura 5. (a y b) Adición y compactación del polvo respectivamente
y (c) Probeta cilíndrica en estado verde

Sinterización del compacto en verde

El proceso de sinterización es un tratamiento térmico que consiste en generar principalmente densificación del material que convencionalmente se produce en fase líquida, el sistema de WC-Co forma un líquido eutéctico entre los 1320 °C y 1370 °C por lo que las temperaturas de sinterización utilizadas en la industria del metal duro oscilan entre los 1350 °C y los 1650 °C, las cuales se eligen en función de la composición química. El ciclo de sinterización se llevó a cabo en un horno eléctrico marca Protech PT-V1700 34L como se muestra en la Figura 6. El proceso se desarrolló a 1450 °C en vacío (0,045 mbar) con rampa de calentamiento de 5 °C/min con el objetivo de asegurar la adecuada reducción de los óxidos; así como evitar gradientes de temperatura en el compacto; tras alcanzar dicha temperatura se introdujo una sobrepresión de argón de 100 mbar durante 60 min (etapa de mantenimiento) con el fin de minimizar la evaporación de la fase metálica.



Figura 6. Horno eléctrico de sinterización PT-V1700 34L.

Resultados y discusión

Medición de densidad

La densidad, así como la contracción del material son propiedades que se usan como control de calidad del material. En el caso de la densidad, esta indica en general si el proceso de fabricación ha sido satisfactorio de acuerdo con la composición química de la muestra. Para el CERMET 1 se realizaron medidas geométricas de las probetas antes y después del sinterizado, con el fin de obtener las densidades de las probetas en cada una de estas etapas, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Densidades en verde y sinterizado de las probetas y su contracción

Densidad en verde	7,90 g/cm ³	Contracción luego del proceso de sinterización
Densidad sinterizado	14,34 g/cm ³	16,70%

Estos resultados muestran el efecto de la densificación de estos materiales tras el proceso de sinterización, la contracción para el K40 fue de 16,70% y se encuentra dentro de los rangos esperados para este tipo de materiales.

Análisis microestructural mediante microscopía óptica y electrónica

Para poder realizar las observaciones a nivel de microscopía óptica y electrónica de la muestra sinterizada es necesario preparar la muestra por rutas metalográficas. La preparación metalográfica se realizó bajo la norma ASTM B 665, esta preparación difiere de las aleaciones ferrosas y no ferrosas en la fase de desbaste donde es necesario el uso de discos de diamante debido a que los carburos cementados presentan elevadas durezas; posteriormente, el pulido de la muestra se realizó con suspensiones de diamante de 6 µm y de 1 µm obteniendo un acabado tipo espejo para su posterior caracterización mediante microscopía óptica, electrónica y microdureza.

Para la observación metalográfica se utilizó un microscopio metalográfico (ZEISS Axio Observer.Z1m), el cual se usó para verificar la calidad del material fabricado en función de la porosidad. Dado que la porosidad es uno de los factores más importantes en la fabricación de carburos cementados, se realizó la cuantificación bajo la norma ASTM B 276, que consiste en la observación a magnificaciones de 100X y 200X y compararla contra patrones visuales. Durante el análisis se observó que todos los poros analizados tenían un tamaño inferior a 10 µm, y su cuantificación arrojó un valor de 0,07% del área total analizada. La porosidad para este tipo de material se clasifica como A, B y C. La porosidad tipo A para el material fabricado presentó valores de A02 y de A04, predominando la porosidad A02; debido a que los tamaños de los poros no superaron las 10 µm, la porosidad tipo B es B00. Por último, la presencia de carbono libre se clasifica como tipo C y ya que el cermet no presenta este tipo de porosidad su valor se reporta como C00. En resumen, la porosidad presentada para la aleación es de tipo A02, B00, C00 y por tal motivo cumple con los requerimientos mínimos exigidos para este tipo de materiales. En la Figura 7a se muestra una imagen de microscopía óptica del material y en la Figura 7b la referencia contra la cual se comparó.

Para la caracterización microestructural de la muestra sinterizada se utilizó microscopía electrónica de barrido (SEM). Se usaron los detectores de electrones primarios o retrodispersados para obtener contraste del material, lo cual está relacionado con la composición química de este (fases)

y los electrones secundarios que brindan información acerca de la topografía de la superficie del material como homogeneidad en la microestructura y posibles defectos de fabricación (grietas, porosidades, entre otras).

Mediante el proceso de fabricación ya descrito se han obtenido carburos cementados según composición comercial tipo K40 (ISO) donde la fase cerámica está dispersa en la fase metálica; como se observa en la Figura 8.

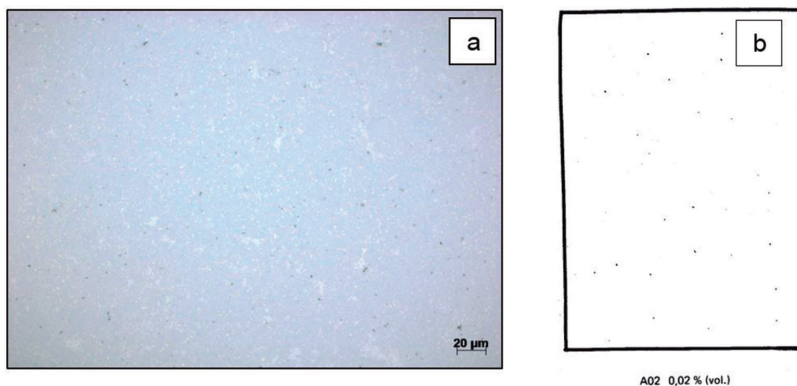


Figura 7 (a). Imagen metalográfica mostrando el bajo grado de porosidad obtenido, **(b)** Imagen comparativa según norma ASTM B276

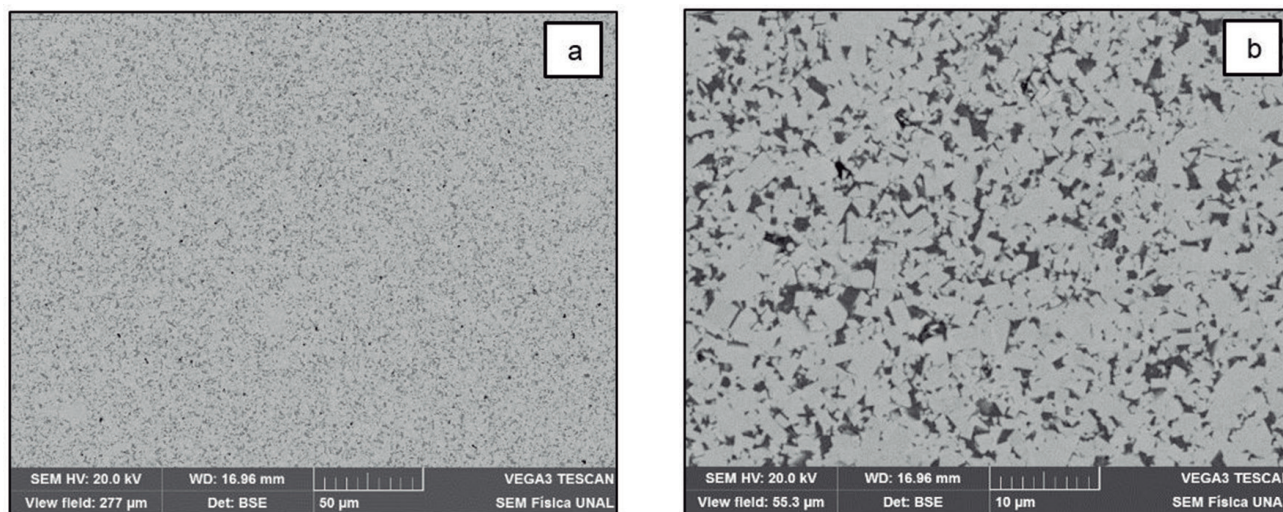


Figura 8. Distribución microestructural del cermet tipo K40 (a) bajos aumentos y (b) altos aumentos

Estas imágenes muestran una distribución homogénea del material, el cual está compuesto por una fase metálica de contraste oscuro, así como una fase brillante de granos de carburo de wolframio con morfología facetada.

Se realizaron análisis químicos mediante medidas puntuales como se muestra en la Figura 9a donde la medición se realiza en la zona que está delimitada por el recuadro, además de considerar los límites de detección de la técnica se estima un análisis semicuantitativo ya que se realiza utilizando la sonda de energía dispersiva de rayos X acoplada al SEM donde la cuantificación de elementos ligeros no es representativa, como se muestra en el espectro en la Figura 9b.

En la Tabla 3 se resumen los resultados de composición química obtenida mediante esta técnica, dichos valores

presentan pequeñas variaciones del orden de 0,61% para el cobalto y para el carburo de wolframio de 0,64% en comparación con los valores dados en la Tabla 1 respecto al valor promedio de cada elemento.

Adicionalmente, a partir de las imágenes obtenidas en SEM se cuantificó el tamaño de grano de WC haciendo uso de un software de análisis de imágenes para crear segmentación y binarizar la imagen obteniéndose factores de forma, áreas proyectadas y diámetros equivalentes para su estudio estadístico. En la Figura 10a se muestra la foto original a 5000X a partir de la cual se calcula el tamaño de grano de WC del cermet. En la Figura 10b se muestra la imagen tras el tratamiento de digitalización conocido como “watershed” para obtener datos representativos de la medida del tamaño de WC se analizaron tres imágenes donde cada imagen contiene alrededor de 1200 granos.

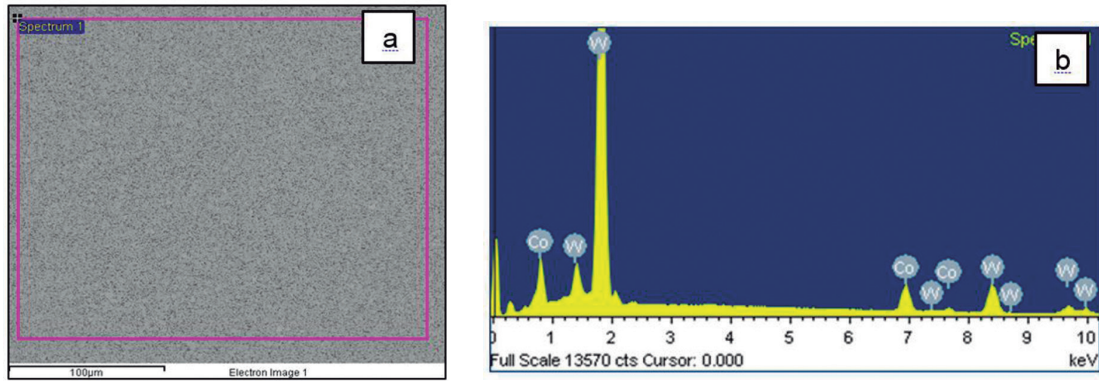


Figura 9. (a) Imagen SEM de la zona donde se realiza el análisis utilizando la sonda EDS. (b) Espectro de energías dispersivas de rayos X

Tabla 3. Composición química obtenida.

Material	Elemento	% en peso				
		Zona central	Zona exterior	Zona intermedia	Promedio	Desviación estándar
CERMET 1 (ISO K40)	Co K*	11,86	10,27	12,06	11,39	0,98
	W M*	88,14	89,73	88,05	88,64	0,94
	Total	100,00				

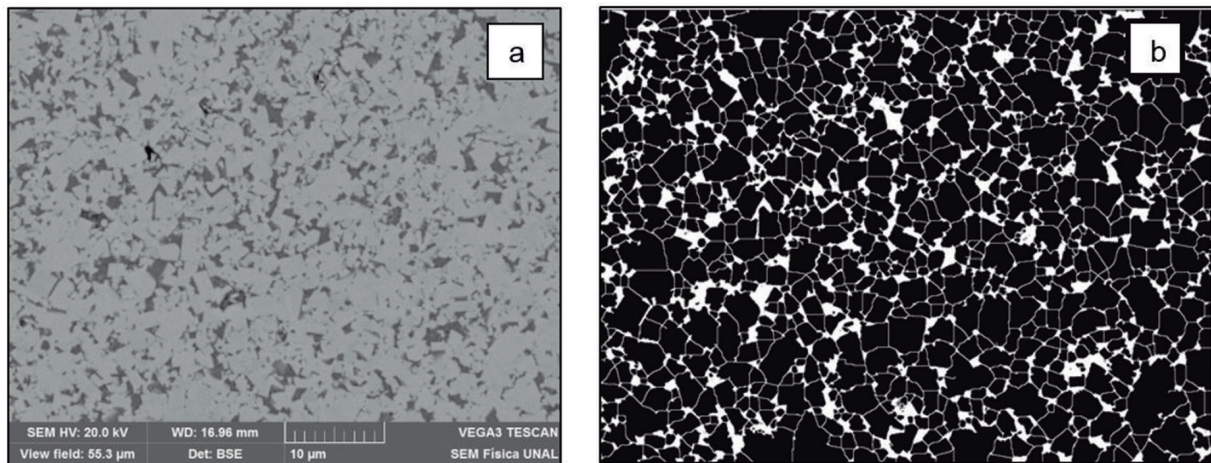


Figura 10 (a). Imagen original sin tratamiento (b) Imagen tras el tratamiento de binarización

Caracterización mecánica

Como es sabido, el tamaño del grano y la dureza de un material están estrechamente relacionados y el caso de los carburos cementados no es la excepción y existe correspondencia entre el tamaño de grano, el contenido de cobalto y la dureza (Gille, Szesny, Dreyer, & van den Berg., 2002). En este sentido, en la Figura 11 se muestra la distribución de tamaño de grano de WC obtenida mediante el análisis de tres imágenes de microscopía electrónica, lo cual corresponde a la medición de aproximadamente 3600 granos de la fase cerámica (WC).

La repetitividad de las curvas muestra que el material presenta una distribución homogénea en cuanto al tamaño de grano de WC, esto indica que el proceso de fabricación estuvo controlado ya que no se presentó crecimiento excesivo de grano el cual suele estar asociado principalmente a las variables del sinterizado como el tiempo y la temperatura de sinterización

El tamaño de grano obtenido en promedio fue de 1,14 µm presentando una distribución del 48,89% entre 0 y 1 µm, 39,94% entre 1 y 2 µm, 9, 29% entre 2 y 3 µm y 1,85% entre 3 y 4 µm. De acuerdo con esta distribución, el cermet tipo K40 fabricado revela un tamaño de grado medio (Sandvik, 2016).

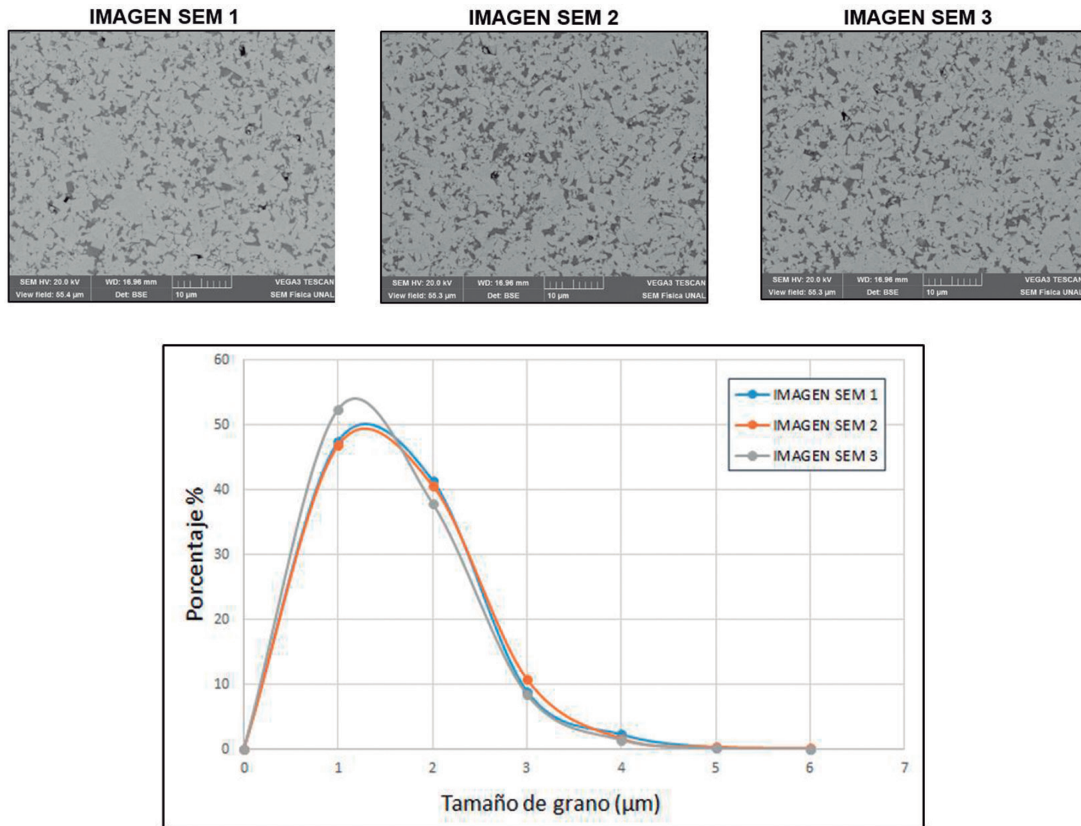


Figura 11. Distribución del tamaño de grano de la aleación CERMETS tipo K40

En la Tabla 4 se muestra el valor de dureza obtenido para el cermet fabricado, este valor se ajusta a lo reportado en la bibliografía, como se muestra en la Figura 12.

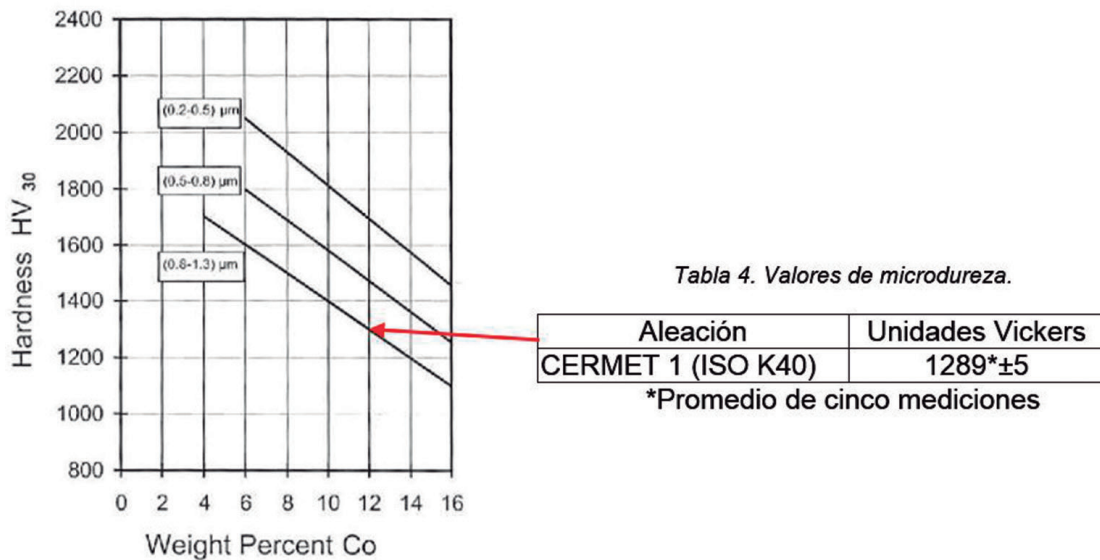


Figura 12. Dureza para cermets en función del tamaño de grano de WC y el contenido de cobalto. (Gille, Szesny, Dreyer, & van den Berg., 2002).

Es importante señalar, como ya se ha mencionado, que este nivel de dureza está relacionado con los bajos niveles de porosidad, el tamaño de grano y el contenido de cobalto.

Conclusiones

Se ha desarrollado y optimizado una metodología para la fabricación de metales duros mediante la vía pulvimetalúrgica la cual es extrapolable a otro tipo de materiales de alto desempeño como aceros de herramientas, materiales compuestos, cerámicos entre otros. La aleación fabricada cumple con estándares de calidad como porosidad, microestructura y dureza asociados a un metal duro ISO K40 de grano medio. Los resultados obtenidos a lo largo de la implementación de esta tecnología de fabricación abren muchos frentes para continuar con la investigación, el desarrollo y la innovación relacionados con la PM; esto debe ir ligado con la transferencia tecnológica de este conocimiento a la industria nacional, con el fin de crear nuevas oportunidades de negocio que permitan incrementar la competitividad, innovar la tecnología y diversificar los actuales procesos de manufactura hacia tecnologías más eficientes, limpias y medioambientalmente más amigables.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia (UN) y al Centro de Materiales y Ensayos del SENA Regional Distrito Capital por el apoyo profesional y tecnológico para llevar a cabo el proceso de implementación de la línea de pulvimetalurgia. Este trabajo ha sido financiado con recursos del patrimonio autónomo Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, Francisco José de Caldas bajo los proyectos METPROCER y PULFAB con contratos de recuperación de contingente No. FP44842-151-2015 y FP44842-091-2016, respectivamente. Los autores también agradecen al Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Gipuzkoa (CEIT) en España por su cooperación en el desarrollo de este proceso.

Bibliografía

Chang, S., & Chang, P. (2014). Investigation into the sintered behavior and properties of nanostructured WC-Co-Ni-Fe hard metal

alloys. *Materials Science And Engineering: A*, 606, 150-156. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.096>

Gant, A., Gee, M., Gohil, D., Jones, H., & Orkney, L. (2013). Use of FIB/SEM to assess the tribo-corrosion of WC/Co hardmetals in model single point abrasion experiments. *Tribology International*, 68, 56-66. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.11.008>

Gille, G., Szesny, B., Dreyer, K., van den Berg, H., Schmidt, J., Gestrich, T., & Leitner, G. (2002). Submicron and ultrafine grained hardmetals for microdrills and metal cutting inserts. *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 20(1), 3-22. doi: [https://doi.org/10.1016/S0263-4368\(01\)00066-X](https://doi.org/10.1016/S0263-4368(01)00066-X)

Hillskog, T. (2003). Powder metallurgy tool steels. *Metallforming Magazine*, 48-51. Recuperado de http://www.bucanada.ca/media/pm_tool_steels_metalformingmagazine03.pdf

International standard ISO 513. (2004). Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges — Designation of the main groups and groups of application. Third edition.

Katiyar P., Singh P., Singh R. & Kumar I. (2016). Modes of failure of cemented tungsten carbide tool bits (WC/Co): A study of wear parts. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 54, 27-38. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2015.06.018>

Metal Powder Industries Federation, (2016). Powder Metallurgy—Intrinsically Sustainable. Recuperado de: <http://www.mpif.org/IntroPM/PDFs/PM-Intrinsically-Sustainable.pdf>

Randall, M. (1989). Particle Packing Characteristics. Metal Powder Industries Federation.

Sandvik. (2016) Understanding Cemented Carbide. Recuperado de: <http://www.hyperion.sandvik.com/en/products/cemented-carbide/oil-and-gas/other-products/fishing-milling-tools/h11n-cemented-carbide/>

- Shibata, J., Murayama, N., & Niinae, M. (2014). Recovery of tungsten and cobalt from tungsten carbide tool waste by hydrometallurgical method. *Geosystem Engineering*, 17(2), 120-124. doi: <https://doi.org/10.1080/12269328.2014.929983>
- Upadhyaya A., Sarathy D. & Wagner G. (2001). Advances in sintering of hard metals. *Materials and Design*, 22, 499-506. doi: [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(01\)00005-X](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(01)00005-X)
- Villar, C. (2009). Pulvimetalurgia: En busca de nuevos materiales. *Metal actual*, 14, 4-9

Síntesis de ligantes Imino-Amida como modelos de ligantes orgánicos asociados a actividad factor tolerante a la glucosa

Synthesis of Imino-Amide ligands as Models of associated organic ligands To glucose tolerant factor activity

Recibido: 15- 03 - 2017 Aceptado: 30-05-2017

Jhon Fernando Guateque¹
Gustavo Adolfo Rojas Olave²
Marcos Flórez-Álamo³
Edwin Flórez-López⁴
Yenny Patricia Ávila-Torres⁵

¹ Colombiano. Químico Industrial. Universidad Tecnológica de Pereira. Escuela de Química, Facultad de Tecnologías, QIAMMSB, Apartado Aéreo 97, 660003, La Julita, Pereira, Colombia.

² Colombiano. Químico Industrial. Universidad Tecnológica de Pereira. Escuela de Química, Facultad de Tecnologías, QIAMMSB, Apartado Aéreo 97, 660003, La Julita, Pereira, Colombia.

³ Mexicano. Ph.D. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria Facultad de Química, 04510 México, D.F., México.

⁴ Colombiano. Ph.D. Universidad Santiago de Cali, Programa de Química, Facultad de Ciencias Básicas, Grupo de Investigación en Química y Biotecnología-QUIBIO, 4102, Pampalinda, Cali, Colombia.

⁵ Colombiana. Ph.D. Universidad Tecnológica de Pereira, Escuela de Química, Facultad de Tecnologías, QIAMMSB, Apartado Aéreo 97, 660003, La Julita, Pereira, Colombia.

Resumen

La estructura molecular del Factor Tolerante a la Glucosa (FTG) ha sido asociada con un centro metálico de cromo enlazado de forma coordinada a ligantes electrodonadores como aminoácidos y ácido nicotínico. En este sentido, en este artículo se lleva a cabo la síntesis de ligantes con potenciales aplicaciones como FTG al coordinarse al centro de cromo(III). Se obtuvo un compuesto imino-enol (3) a partir de bencilamina (2) y acetoacetato de etilo (1) en metanol anhidro. Así mismo, la síntesis de una amina cuaternaria (5), derivada de diacianodiamida (4), en donde el centro metálico fungió como catalizador de una reacción de condensación y no como ácido de Lewis formando compuestos de coordinación.

Palabras clave: FTG; cromo(III); iminoéster; dicianodiamida.

Abstracts

The molecular structure of the Tolerant Factor Glucose (FTG) has been associated with a metal center of chromium bound in a coordinated manner to ligands. Electrodonators such as amino acids and nicotinic acid. In this sense, in this article the synthesis is carried out of ligands with potential applications such as FTG at Coordinated to the center of chromium (III). A compound Imino-enol (3) from benzylamine (2) and acetoacetate Ethyl (1) in anhydrous methanol. Likewise, the synthesis of a Amine quaternary amine (5), derived from diocyanodiamide (4), Where the metal center served as a catalyst for A condensation reaction and not as Lewis acid forming coordination compounds.

Keywords: GTF; chromium; imine-enol; dicyandiammine.

Introducción

El estudio de compuestos de coordinación del ion metálico Cromo(III) se hizo importante luego de que se descubriera que estas especies hacen parte de un agente metabólico denominado factor tolerante a la glucosa FTG, reportado por Mertz y Schwarz en 1955 (Vincent, 2001).

En este sentido, la relevancia del descubrimiento está en el hecho de que la bioquímica del Cromo(III) ejerce un rol importante en el control del metabolismo de carbohidratos y lípidos en el organismo (Vincent, 2000; Sharma et al., 2011). Este proceso es mediado por uno o más compuestos de coordinación del ion metálico con aminoácidos como aspartato, glutamato, glicina y cisteína para el caso de la cromodulina (Chen et al., 2011; Gómez García & Magaña Garns, 2004). La estructura de difracción de rayos-X no ha sido reportada para FTG, sin embargo se propone que la esfera de coordinación está formada por cromo (III) coordinado a ácido nicotínico y aminoácidos como cisteína de residuos peptídicos glutatiónicos (Chen et al., 2011; E-Learning Chemistry: Homepage, 2013).

El estudio de la bioquímica de vanadio (III, IV y V) y zinc (II) ha demostrado su participación en el metabolismo de carbohidratos y lípidos, al igual que el cromo (Gómez García, & Magaña Garns, 2004; Alvino De la Sota & Pacheco Calderón, 2007). El vanadio empezó a ser usado en 1899 como un fármaco oral en forma de metavanadato sódico para pacientes diabéticos, reportando actividad (Alvino De la Sota & Pacheco Calderón, 2007). Actualmente, la investigación con vanadio avanza sobre el diseño de compuestos de coordinación del ion vanadilo (III) con moléculas orgánicas que mejoran la bioabsorción respecto al uso de sales inorgánicas. La eficacia de estos compuestos ha sido evaluada *in vitro* en células adiposas aisladas de ratas, asociando la actividad biológica a una unión al receptor β que activa a la adenilato ciclasa que transforma ATP en adenosina 3',5'-monofosfato cíclico, la que a su vez activa algunas proteínas quinasas y lipasas (Alvino De la Sota & Pacheco Calderón 2007).

La investigación de nuevas moléculas que funcionen como fármacos en el tratamiento de la diabetes mellitus (I y II) y sus complicaciones asociadas también se ha orientado sobre compuestos orgánicos. La aminoguanidina se ha estudiado como compuesto capaz de prevenir disfunciones vasculares producto de la diabetes (Corbett et al., 1992). La metformina actualmente es usada como medicamento en el tratamiento de efectos colaterales de la diabetes como lo son: obesidad, hipertensión, entre otras. Además se usa también como fármaco en el tratamiento de la diabetes mellitus

tipo 2 debido a que la metformina no afecta directamente los niveles de insulina sino que regula los niveles de carbohidratos en el torrente sanguíneo (Palumbo, 1998; Chan et al., 2007). Se han usado compuestos derivados de arilsulfonas en el tratamiento de la obesidad generada por DM (Greenwood, 1971; Imperial College of London, 1956; Fang et al., 2006).

A continuación se presenta la reacción de formación del imino-ester con semejanza estructural a los ligantes asociados a actividad FTG, producto detallado en el contexto del artículo, Figura 1.

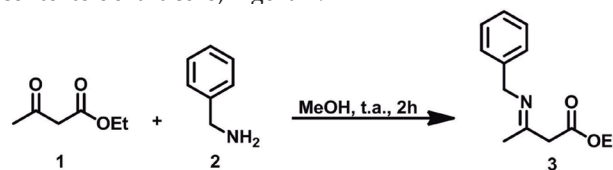


Figura 1. Esquema de síntesis de iminoester.

Por otro lado, los procesos catalíticos homogéneos asociados a metales de transición, constituyen una herramienta para el desarrollo industrial y tecnológico. Procesos como carbonilación, adición, oxidación, y polimerización de olefinas; condensación e hidrólisis hacen parte de las catálisis en donde interviene un centro metálico. Las condiciones de reacción del ligante nitrato de aminoguanidina y la sal metálica de cromo (III), permitieron cristalizar un derivado hidrolizado como sal cuaternaria de amonio, cuya carga se estabiliza con el contraion cloruro, que proviene de la sal metálica como reactivo de partida en la síntesis de los compuestos de coordinación. El catión amonio cuaternario presenta la estructura NR_4^+ , donde R puede ser un grupo alquilo o un grupo arilo. Estos iones están cargados permanentemente, independiente del pH de la solución.

Experimental

Condiciones instrumentales.

Las sustancias fueron pesadas en una balanza analítica OHAUS Pioner PA214. Espectros IR de 4000 a 400 cm^{-1} fueron tomados en espectroscopio IR Agilent Technologies Cary 630 FTIR. Los barridos electrónicos de 800 a 200 nm se colectaron en espectrofotómetro UV-vis Thermo Scientific Evolution 201. Los espectros RMN ^1H y ^{13}C se obtuvieron de espectroscopio de resonancia magnética nuclear Agilent Technologies NMR-vnmrs 400, tomados a 400 MHz y usando CDCl_3 como disolvente, la medición se realizó en la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, unidad de estudios de posgrados,

facultad de química. Se usó un fusiómetro digital Thermo Scientific IA9300X1 con intervalo de temperatura de 10 a 400 °C, 12 V y 45 W. Para la caracterización del compuesto monocristalino se utilizó un equipo de difracción de rayos-X Bruker P4, a temperatura ambiente, con la radiación Mo- α ($\lambda=0.71073$ Å), con condiciones de medición estándar y aplicando una corrección por absorción. Las estructuras se resolvieron por métodos directos. Finalmente, los modelos estructurales, incluyendo parámetros de agitación térmica anisotrópica, se refinaron por mínimos cuadrados, con los átomos de hidrógeno puestos en posiciones calculadas. En los últimos ciclos de refinamiento, se aplicó un esquema de ponderación a los datos de difracción y se corrigió el efecto de la extinción secundaria mediante una fórmula semi-empírica. Los cálculos y refinamiento de la estructura se realizaron en el programa WINGX y el equipo fue usado en colaboración con la Unidad de Estudios de Posgrado de la facultad de Química (UNAM).

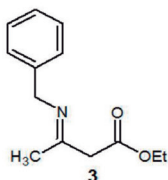
Materiales

Bencilamina 99% (MERCK), acetoacetato de etilo 99% (MERCK), $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 99% (MERCK), NaCl 99% (MERCK), hexano HPLC (MERCK), acetato de etilo HPLC (MERCK), metanol 99% (MERCK), virutas de magnesio metálico (JT Baker) y cristales de yodo (JT Baker), nitrato de aminoguanidina (MERCK).

El metanol anhidro se obtuvo destilando una mezcla de metanol, virutas de magnesio y cristales de yodo. Procedimiento adaptado del libro de Química orgánica práctica Vogel (Vogel, Furniss, Hannaford, Smith & Tatchell, 1989).

Síntesis

• Síntesis de Iminoéster 3



A una solución de acetoacetato de etilo (127 μL , 1 mmol) en 3,6 mL de metanol anhidro a temperatura ambiente se adicionó bencilamina (109 μL , 1 mmol) en un balón de destilación de 50 mL, la reacción se dejó en agitación constante durante

2 horas en montaje de reflujo. Posteriormente el producto de reacción se dejó en agitación constante durante 6 horas para evaporar el metanol. Luego se dejó la mezcla en reposo y a las 24 horas se obtuvieron cristales del compuesto (3) de color amarillo ocre. El seguimiento de la reacción se

realizó por TLC durante 2 horas (6:4 hexano/acetato de etilo). IR (estado sólido, cm^{-1}): 3357 (ν O-H) 3062 (ν C-H), 1660 (ν C=N). RMN¹H (300 MHz, Chloroform-d) δ 8.96 (s, 1H), 7.37 – 7.24 (m, 5H), 4.55 (s, 1H), 4.43 (d, J = 6.4 Hz, 2H), 4.11 (c, J = 7.1 Hz, 2H), 1.92 (s, 3H), 1.26 (t, J = 7.1 Hz, 3H). RMN¹³C (75 MHz, Chloroform-d) δ 170.57, 161.78, 138.74, 128.76, 127.46 – 127.04 (m), 126.69, 83.18, 58.37, 46.77, 19.36, 14.63. EM (IE, M^+/z): 219.

• Síntesis de la amina cuaternaria

En el caso particular del ligante dicianodiamida las condiciones de reacción difieren de la cuaternización convencional. Las condiciones de reacción que se llevaron a cabo se muestran en la Figura 2.

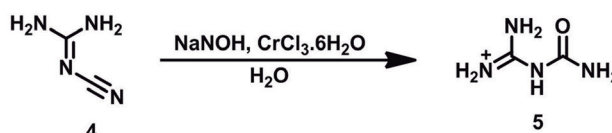


Figura 2. Esquema de síntesis de la amina cuaternaria

Resultados y discusión

• Iminoéster 3

Los compuestos carbonílicos, y en especial los aldehídos y las cetonas, presentan un equilibrio tautomérico ceto-enólico debido a la presencia de hidrógenos alfa al grupo carbonílico ligeramente ácidos. En la mayoría de los casos este equilibrio se encuentra desplazado hacia la forma ceto, debido a que este tipo de compuestos son mucho más estables que su contraparte enólica, pero en algunos casos muy específicos se observa que el tautómero enólico se halla favorecido. Las evidencias espectroscópicas muestran que el iminoéster 3 realmente se encuentra en su forma enólica debido a que el hidrógeno del grupo OH forma un puente de hidrogeno con el N del grupo imino, formando un intermediario de seis miembros termodinámicamente más estable a su tautómero cetónico (Figura 3).

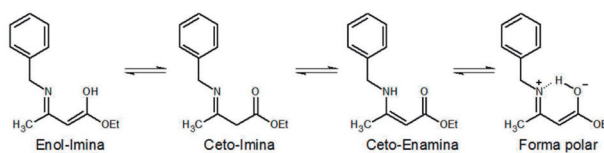


Figura 3. Tautomerismo del compuesto 3

Espectroscopia IR

El producto (3) esperado es una ceto-imina donde se puede presentar un tautomerismo debido a los hidrógenos ácidos del metileno que se encuentra en el carbono α con respecto al carbonilo de éster, generando así el enol-imina o la ceto-enamina, pero el tautómero enol-imina prevalece sobre el ceto-enamina, debido a que el oxígeno es más electronegativo y por ende tiene mayor facilidad de extraer dicho protón del metileno (Alcántara, Barroso, & Piló-Veloso, 2002; Ferraz & Gonçalo, 2007). El espectro IR confirma este planteamiento donde se observa en 3357 cm^{-1} una vibración de tensión para el enlace O-H libre, mientras que en 1660 cm^{-1} se encuentra la vibración de tensión $\text{C}=\text{N}$, estableciendo así la presencia del grupo imino y no del grupo carbonilo, porque de surgir este grupo la vibración característica aparecería sobre 1700 cm^{-1} . Figura 4.

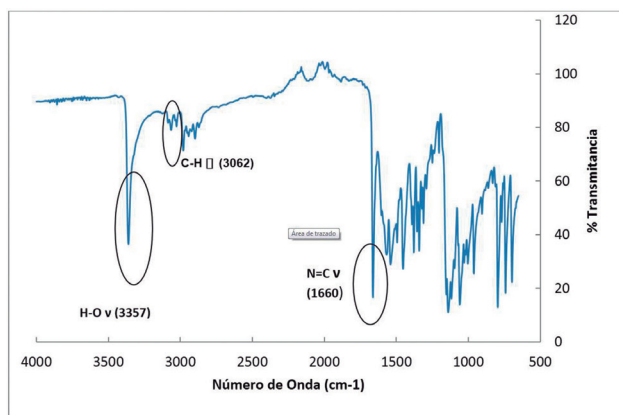


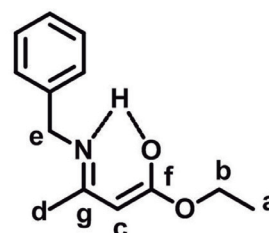
Figura 4. Espectro IR de imino-enol 3

Espectroscopia RMN ^1H y ^{13}C .

En el espectro de ^1H -RMN las señales triples del hidrógeno-a y cuádruples del hidrógeno-b poseen una constante de acoplamiento de igual valor ($J=7,1\text{Hz}$), indicando que los hidrógenos se encuentran acoplados, siendo los protones que pertenecen al grupo etilo de éster. Debido a la presencia de un átomo electronegativo la señal cuádruple se desplaza a menor campo, como se observa en el espectro ^1H . La evidencia que nos permite asegurar que el compuesto se encuentra en su forma tautomérica son las señales del hidrógeno-c que se presenta como una señal simple a $4,55\text{ ppm}$, los hidrógenos bencílicos-e que se presentan como un doble debido al acoplamiento que revelan con el H que hace puente con el N y por supuesto el N-H que se ubica a $8,96\text{ ppm}$. Adicionalmente se observan los cinco hidrógenos aromáticos en la región de $7,37\text{-}7,24\text{ ppm}$ (Tabla 1, Figura 5).

Tabla 1. Señales espectro RMN ^1H del iminoenol.

Tipo de señal	Desplazamiento (ppm)	Hidrógenos
Triplete (a)	1,26	3
Cuartete (b)	4,11	2
singulete (c)	4,55	1
singulete (d)	1,92	3
Doblete (e)	4,43	2
Multiplete (Ar-H)	7,37-7,24	5
Singlete (N-H)	8,96	1



Compuesto Enol-Imina

Figura 5. Asignación de señales del imino-enol (3).

En el espectro de ^{13}C -RMN se observan 13 señales características del imino-enol. En $170,6$ y $161,8\text{ ppm}$ se muestran los carbonos del grupo imino y del carbono enólico respectivamente, en la región de $138,7\text{-}126,7\text{ ppm}$ se encuentran los seis carbonos aromáticos. Adicionalmente se observan el carbono bencílico-e $83,1\text{ ppm}$ y los carbonos alifáticos b, c, d y a $58,4$, $46,8$, $19,4$ y $14,6\text{ ppm}$ respectivamente (Tabla 2).

Tabla 2. Señales espectro RMN ^{13}C del imino-enol (3)

Tipo de Carbono	Desplazamiento (ppm)
Carbono-g	170,6
Carbono-f	161,8
Carbono-Ar	138,7, 128,8, 128,9, 127.3126,7
Carbono-e	83,1
Carbono-b	58,4
Carbono-c	46,8
Carbono-d	19,4
Carbono-a	14,6

El tautómero enol-imina puede presentar puentes de hidrógeno intramoleculares con el N del grupo amino, generando así que se cierre la molécula en un ciclo de 6 miembros que son particularmente estables (Spedaletti, Vega Hissi, Andrada, Estrada & Garro Martínez, 2014), favoreciendo la forma enol frente a la ceto y evitando, que los procesos de reducción se completen hasta el aminoéster, confirmandose. Por ende, debe emplearse un método

alterno de reducción de grupo carbonilo como el descrito por Giuseppe Bartoli siendo una reducción de Bouveault-

Blanc (Bartoli, Cimarelli, Marcantoni, Palmieri, & Petrini, 1994; Sutton, 1975), Figura 6.

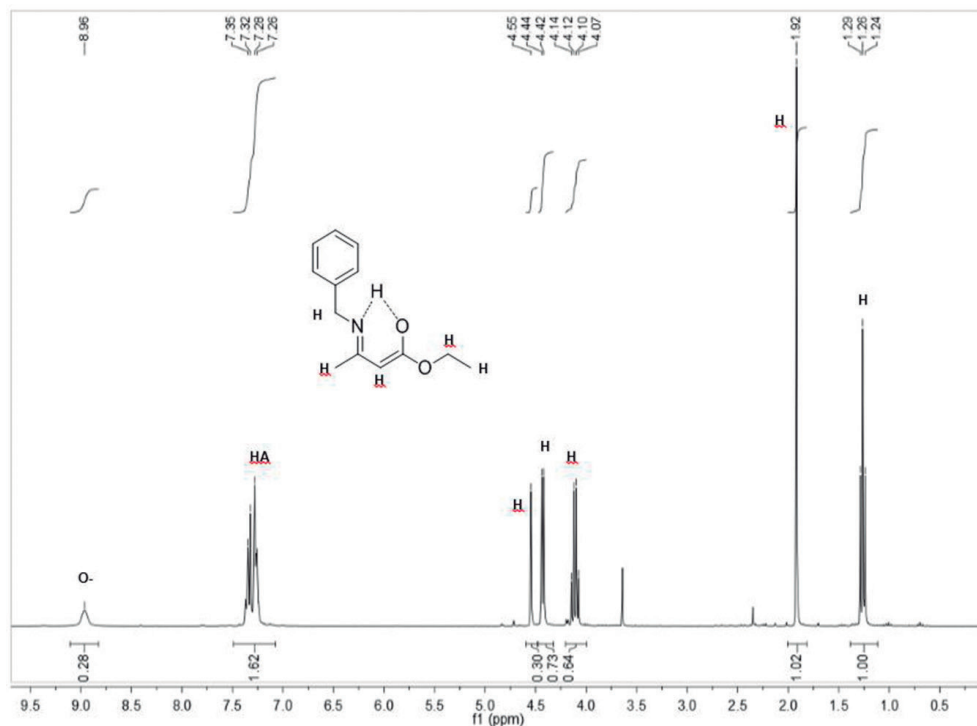


Figura 6. Espectro RMN ^{13}C de imino-enol (3)

Cromatografía de gases- espectrometría de masas.

En el cromatograma obtenido se observan tres picos, uno correspondiente al compuesto 3, otro al producto de la trans-esterificación del éster etílico con el metanol usado como solvente, obteniéndose un éster metílico del compuesto 3. El tercer pico cromatográfico es atribuible a contaminación derivada del uso de solventes orgánicos en material plástico empleado durante el procedimiento de laboratorio en la obtención del compuesto 3. (Tabla 3).

Amina cuaternaria

Difracción de rayos-x de monocristal

La elucidación estructural de la sal cuaternaria fue posible ya que se obtuvieron cristales aptos para difracción de rayos-X de monocristal. Las reflexiones fueron colectadas en la Unidad de Estudios de Posgrado de la Facultad de Química (UNAM) en colaboración con el Dr. Marcos Flores. A continuación se describen todos los detalles estructurales, así como las tablas con las respectivas distancias y ángulos entre los átomos que constituyen la amina cuaternaria (Figura 7).

El diagrama de ORTEP se obtuvo a partir del refinamiento de la estructura por difracción de rayos-X con el programa WIN GX y el método de SHELL para átomos pesados. Los parámetros de red que describen la celda se observan en la Tabla 4.

En la celda cristalina hay cuatro moléculas por cada celda en un sistema monoclinico, en donde el cloruro compensa la carga de la amina, (Figura 8).

Las interacciones intermoleculares son numerosas, esto permite mostrar que el ligante se estabiliza fuertemente. Las interacciones son clasificadas con direccionalidad moderada, con un ángulo superior a 170° de átomo pesado a átomo pesado y una distancia alrededor de 3,2 Å, para $\text{N-H}\cdots\text{Cl}$ y $\text{NH}\cdots\text{O}$. La visión tridimensional permite observar un arreglo en zig-zag en donde una molécula de amina se ubica sobre el eje a y la posterior sobre el eje b de forma periódica, (Figura 9 a y b).

Cabe mencionar que la estructura obtenida a partir de difracción de rayos-X, permite evidenciar la estabilización de una amina cuaternaria, en donde no se utilizó como proceso de síntesis la cuaternización convencional, sino que se plantea un mecanismo de hidrólisis, descarboxilación

y ataque nucleofílico con la liberación del grupo urea. La reacción se llevó a cabo en ausencia de la sal metálica y el producto no fue obtenido. Esto concluye que el centro metálico tiene una actividad significativa en la reacción, papel que será abordado en nuevos estudios en torno al centro metálico.

Tabla 3. Patrones de fragmentación del iminoenol (3)

Iminoéster de etilo		Iminoéster de metilo	
m/z	Fragmento	m/z	Fragmento
219		205	
190		190	
172		172	
146		146	
131		131	
105		105	
91		91	
77		77	
65		65	

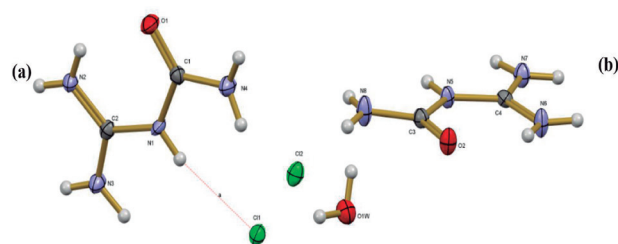


Figura 7. a). Diagrama de ORTEP de la amina cuaternaria y b). Esquema bidimensional

Tabla 4. Parámetros de red de la amina cuaternaria

Sistema cristalino	Monoclónico
Grupo espacial	P-21
Parámetros de red	a= 6,4849 Å
	b=29,868 Å
	c=6,6037 Å
	$\alpha = 90^\circ$
	$\beta = 96,719^\circ$
Z	$\lambda = 90^\circ$
	4
Volumen	1270,29 Å ³

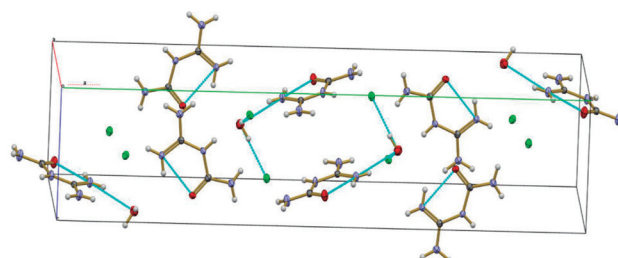


Figura 8. Celda cristalina de la amina cuaternaria.

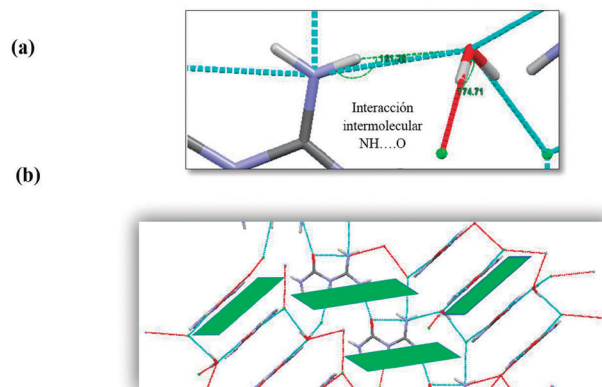


Figura 9 a). Interacciones intermoleculares y **b).** Arreglo cristalino para amina cuaternaria

El mecanismo propuesto por el cual se obtuvo la sal cuaternaria, consiste en los siguientes pasos:

El grupo ciano del compuesto **4** se hidroliza en medio básico para obtener el ácido carboxílico correspondiente **A**. Posteriormente se efectúa la descarboxilación del intermediario **A** para obtener el switterion **B** que por una transferencia de protón conduce a la formación del intermediario **B'**. El intermediario **B'** efectúa un ataque nucleofílico al ácido carboxílico **A** para obtener el producto de condensación **D**, por pérdida de una molécula de agua.

Finalmente la base presente en el medio, ataca el carbono imínico del intermediario **D** para obtener la sal cuaternaria **5** por pérdida de una molécula de urea. (Figura 10).

Los pasos que se proponen en este mecanismo de reacción cuentan con transformaciones bien conocidas en la química orgánica que se pueden observar en muchos de los mecanismos abordados en el texto "Strategic Applications of Named Reactions in Organic Synthesis: Background and Detailed Mechanisms", (Kürti, & Czako, 2005).

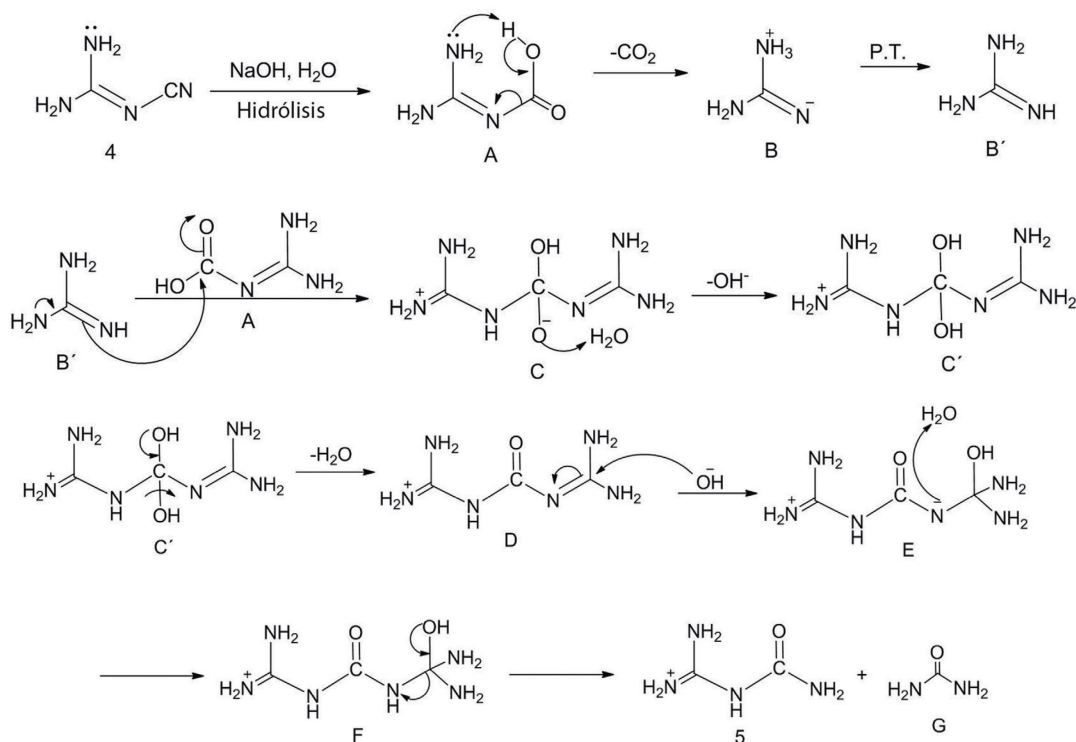


Figura 10. Mecanismo propuesto para la obtención de amina cuaternaria a partir de dicianodiamida

Conclusiones

Se obtuvo el compuesto iminoéster (3), como un sólido, el cual presenta un tautomerismo en el que se favorece la presencia del tautómero imina-enol. Adicionalmente, se plantea un mecanismo para la obtención de aminas cuaternarias a partir de dicianodiamida, en donde la presencia del ion metálico cromo (III), muestra que existe un efecto sobre la síntesis, lo cual será abordado en posteriores publicaciones. Este artículo aporta principalmente en la síntesis de nuevos ligandos que son potenciales como bases de Lewis en la coordinación a cromo (III), estabilizando sistemas biomiméticos a factor tolerante a la glucosa.

Referencias

- Alcântara, A. F. de C., Barroso, H. dos S., & Piló-Veloso, D. (2002). Redução de amidas por boranos. *Química Nova*, 25(2), 300-311. doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000200018>
- Alvino De la Sota, N., & Pacheco Calderón, J. (2007). Diseño de Agentes Antidiabéticos de Vanadio: Desarrollo y Avances Recientes. *Revista de Química*, 21(1-2), 37-48. Recuperado de <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/2610>

- Bartoli, G., Cimarelli, C., Marcantoni, E., Palmieri, G. & Petrini, M. (1994). Chemo- and Diastereoselective Reduction of .beta.-Enamino Esters: A Convenient Synthesis of Both cis- and trans-.gamma.-Amino Alcohols and .beta.-Amino Esters J. Org. Chem., 59(18), 5328–5335. doi: <https://doi.org/10.1021/jo00097a039>
- Chan, J., Deerochanawong, C., Shera, A., Yoon, K., Adam, J., & Van Binh, T. (2007). Role of metformin in the initiation of pharmacotherapy for type 2 diabetes: An Asian-Pacific perspective. Diabetes Research And Clinical Practice, 75(3), 255-266. doi: <https://doi.org/10.1016/j.diabres.2006.06.023>
- Chen, Y., Watson, H., Gao, J., Sinha, S., Cassady, C., & Vincent, J. (2011). Characterization of the Organic Component of Low-Molecular-Weight Chromium-Binding Substance and Its Binding of Chromium. Journal Of Nutrition, 141(7), 1225-1232. doi: <https://doi.org/10.3945/jn.111.139147>
- Corbett, J., Tilton, R., Chang, K., Hasan, K., Ido, Y., & Wang, J. (1992). Aminoguanidine, a Novel Inhibitor of Nitric Oxide Formation, Prevents Diabetic Vascular Dysfunction. Diabetes, 41(4), 552-556. doi: <https://doi.org/10.2337/diab.41.4.552>
- E-LearningChemistry:Homepage.(2013).Recuperado de <http://www.e-learning.chemie.fu-berlin.de/en/bioanorganik/vanadium/molekuele/glucosetoleranzfaktor/index.html>
- Fang, S., Padmavathi, V., Rao, Y., Venkata Subbaiah, D., Thriveni, P., & Geethangili, M. (2006). Biological evaluation of sulfone derivatives as anti-inflammatory and tumor cells growth inhibitory agents. International Immunopharmacology, 6(11), 1699-1705. doi: <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2006.07.004>
- Ferraz, H.M. C., & Gonçalo, E.R. S. (2007). Preparações e aplicações sintéticas recentes de enaminonas. Quim. Nova, Vol. 30(4), 957-964. doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000400035>
- Gómez García, A. & Magaña Garns, P. (2004). Papel del Cromo y del Cinc en el metabolismo de la insulina. Revista médica del IMSS, 42(4), 347–352.
- Imperial College of London, "Experiment 5 Reductions with Lithium Aluminium Hydride_advanced organic practical," 3Rd Year Adv. Organic Pract.
- Kürti, L. & Czakó, B. (2005). Strategic Applications of Named Reactions in Organic Synthesis: Background and Detailed Mechanisms. Elsevier Academic Press
- N. N. Greenwood, "Greenwood N." 1971.
- Palumbo, P. (1998). Metformin: Effects on CardiovascularRisk Factors in Patients withNon-Insulin-Dependent Diabetes Mellitus. Journal Of Diabetes And Its Complications, 12(2), 110-119. [https://doi.org/10.1016/S1056-8727\(97\)00053-6](https://doi.org/10.1016/S1056-8727(97)00053-6)
- Sharma, S., Agrawal, R., Choudhary, M., Jain, S., Goyal, S., & Agarwal, V. (2011). Beneficial effect of chromium supplementation on glucose, HbA1C and lipid variables in individuals with newly onset type-2 diabetes. Journal Of Trace Elements In Medicine And Biology, 25(3), 149-153. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2011.03.003>
- Spedaletti, C.A., Vega Hissi, E.G., Andrada, M., Estrada M.R. & Garro Martinez, J.C. (2014) Influencia de las interacciones intramoleculares en la estabilidad conformacional en el agente quelante 1,3-tadab. 30° Congreso Argentino de Química. Asociación química argentina, Buenos Aires.
- Sutton, D. (1975). Espectros electrónicos de los complejos de los metales de transición. Reverté.
- Vincent, J. (2000) The Biochemistry of Chromium 1, 2., The Journal of nutrition, 130(4), 715–718.
- Vincent, J. (2001). The bioinorganic chemistry of chromium (III). Polyhedron, 20(1-2), 1-26. doi: [https://doi.org/10.1016/S0277-5387\(00\)00624-0](https://doi.org/10.1016/S0277-5387(00)00624-0)

Vogel, A., Furniss, B., Hannaford, A., Smith, P., & Tatchell, A. (1989). Vogel's textbook of practical organic chemistry. 5th ed (1st ed.). Harlow: Longman.

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



Extracción termomecánica y caracterización fisicoquímica del aceite de aguacate (*Persea americana* Mill. cv. Hass)¹

Thermomechanical extraction and physico-chemical characterization of avocado oil (*Persea americana* Mill. cv. Hass)

Recibido: 23- 09 - 2016 Aceptado: 25-05-2017

Diana Paola Yepes Betancur^{2*}
Laura Sánchez Giraldo³
Carlos Julio Márquez Cardozo⁴

¹ Caracterización fisicoquímica del aguacate (*Persea americana* Mill. cv. Hass) y estandarización del proceso de extracción del aceite. Culminada en el año 2015. Ejecutada y subsidiada por el Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Centro Textil y de Gestión Industrial, Medellín, Antioquia y la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

² Colombiana. Ph.D. (c). Servicio Nacional de Aprendizaje SENA Líder SENNOVA SENA, Centro Textil y de Gestión Industrial. Medellín, Antioquia.
*Autor para correspondencia. diayepesb@misena.edu.co

³ Colombiana. M.Sc. (c). Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agrarias. Laboratorio de Frutas y Hortalizas. Medellín, Colombia. lcsanche@unal.edu.co

⁴ Colombiano. Ph.D. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agrarias. Medellín, Colombia. Profesor Asociado. cjmarque@unal.edu.co

Resumen

Se realizó la extracción del aceite de la pulpa de frutos de aguacate (*Persea americana* Mill. cv. Hass) en madurez organoléptica correspondiente al día doce después de cosechado, por ser el día que presentó mayor concentración lipídica equivalente al $20\% \pm 2$. Se utilizó el sistema de extracción mediante un proceso termomecánico, la variable respuesta fue el rendimiento de aceite obtenido expresado en porcentaje y la variable control fue la temperatura de extracción. La caracterización fisicoquímica; índice de yodo, índice de acidez (%) expresado como ácido oleico, índice de saponificación (mg KOH/g), índice de refracción a 25°C, índice de peróxidos (meq O₂/Kg), índice de peróxidos (meq O₂/Kg), punto de fusión (°C), punto de humo (°C), vitamina E, capacidad antioxidante, fenoles totales, y el perfil lipídico de los ácidos grasos se realizó al aceite obtenido con temperatura de extracción de 55 °C por ser ésta la que presentó mayor porcentaje de rendimiento equivalente al 60,2% respecto a la concentración total de aceite presente en la pulpa. El aceite de aguacate obtenido puede clasificarse como extra virgen, con alto contenido en ácidos grasos $\omega 3$, $\omega 6$ y Vitamina E correspondiente a 759,29 mg/100g, 12.862,30 mg/100 g y 10,11 mg/100 g respectivamente, lo cual posiciona el aceite de aguacate como un alimento altamente nutritivo y potencialmente funcional.

Palabras clave: Aceite de aguacate; concentración lipídica; características fisicoquímicas; perfil lipídico; rendimiento de extracción.

Abstract

The extraction of the oil from the fruit pulp of avocado (*persea americana* mill. Cv. Hass) at maturity organoleptic

treatment corresponding to the day harvested, being the day that presented greater concentration lipid ratio equivalent to $20\% \pm 2$. The extraction system used was a thermomechanical process, the response variable was the oil yield obtained in percentage and the control variable was the extraction temperature. The physico-chemical characterization; index of iodine, index of acidity (%) expressed as acid oleico, index of saponification (mg KOH/g), index of refraction to 25 °C, index of peroxides (meq O₂/kg), index of peroxides (meq O₂/kg), point of merger (°C), point of smoke (°C), vitamin e, antioxidant capacity, total phenols and lipid profile of fatty acids, was carried out at oil obtained to temperature extraction of 55 °C for being this the highest yield percentage. Avocado oil obtained can be classified as extra virgin, high in $\omega 3$, $\omega 6$ fatty acids and vitamin e corresponding to 759.29 mg/100 g, 12862.30 mg/100g and 10.11 mg/100 g respectively, which positions the avocado oil as a highly nutritious food and potentially functional what it means beneficial to health.

Keywords: Avocado oil; lipid concentration; physicochemical characteristics; lipid profile; extraction yield.

Introducción

El aguacate, por su calidad nutritiva, buen sabor y versatilidad culinaria, ha ido ganando importancia dentro de la dieta de numerosos países, incrementando de forma sostenida su producción y comercialización en el ámbito mundial. Con el incremento en su consumo y con el aumento en las superficies plantadas en todos los países que lo producen, la industrialización del aguacate es una actividad que depende de los remanentes que quedan de la producción para consumo en fresco, siendo dichos sobrantes, necesariamente, de buena calidad (Olaeta, 2003).

El aguacate presenta una variedad de usos como productos industrializados, que permiten el aprovechamiento de los excedentes y reducen las pérdidas poscosecha, entre ellos el aceite, tradicionalmente utilizado para fines cosméticos, aunque se ha incrementado la producción de aceite extra virgen para usos culinarios, con gran potencial futuro debido a sus cualidades que pueden sustituir al aceite de oliva (Reed, 2001). El aceite de aguacate obtenido de la pulpa es relativamente nuevo en el ámbito gastronómico. El uso predominante del aceite de aguacate ha sido en la industria cosmética debido a su estabilidad y alto nivel de vitamina E (α -tocoferol). El volumen de aceite de aguacate producido o negociado es relativamente pequeño en

comparación con otros aceites, el cual es de alrededor de 2000 toneladas/año (Wong et al., 2008).

La mayor parte de los procesos aplicados en la extracción del aceite de aguacate se hace por métodos relativamente severos, altas temperaturas y extracción por solventes orgánicos, que suelen acompañarse de medidas estándar de refinado, como el blanqueado y la desodorización. El desarrollo de la técnica de prensado en frío aplicado a la pulpa de aguacate mediante el uso de tecnologías similares a las utilizadas para la producción de aceite de oliva extra virgen fue encabezado por Nueva Zelanda (Ashton et al. 2006; Wong et al. 2008). La liberación del aceite de la pulpa del aguacate no es tan fácil como se muestra en el tejido de otras frutas, como las aceitunas. Por ejemplo, se pudo observar la liberación de aceite en las aceitunas maduras simplemente aplastando la fruta (Kiritsakis, Lenart, Willet, & Hernández, 1998). Dado que la pulpa del aguacate tiene un contenido de agua relativamente alto, los intentos iniciales para recuperar el aceite de la pulpa mediante el uso de presiones hidráulicas o disolventes orgánicos requiere de secado antes de la extracción (Smith & Winter, 1970; Human, 1987). La extracción por medios mecánicos conduce a bajos rendimientos de aceite, mientras que el uso de solventes orgánicos como éter de petróleo, éter etílico, o benceno da como resultado la recuperación del 60% al 90% del aceite total disponible. La extracción del aceite por centrifugación para obtener un aceite libre de impurezas de los disolventes y apto para uso alimentario se desarrolló en 1980, pero los rendimientos en aceite son significativamente menores que con la extracción con disolventes, que van desde 30% hasta 80% del total de aceite (Buenrostro & López-Munguía, 1986; Swisher, 1988; Werman & Neeman, 1987).

México y Chile son los países latinoamericanos en donde se han mejorado y aplicado técnicas para la mayor extracción de aceite de aguacate (Velásquez, 2006). En Colombia, el aceite es poco conocido y su proceso de extracción no ha sido popularizado aún. El objetivo de la presente investigación consistió en la estandarización del proceso de extracción del aceite de aguacate, así como su caracterización a partir de los principales índices fisicoquímicos, la determinación del perfil de ácidos grasos, capacidad antioxidante y fenoles totales.

Materiales y métodos

Material vegetal

La investigación se llevó a cabo con frutos de aguacate (*Persea americana* Mill. cv. Hass) en madurez fisiológica, de acuerdo con las especificaciones de la Norma Técnica Colombiana NTC 5209 (2003), cosechados en una finca productora ubicada en la vereda El Cerro, del municipio de El Carmen de Viboral, Antioquia (Colombia), localizada a 2.150 m.s.n.m. con temperatura media de 17 °C, los frutos se cosecharon en la principal época correspondiente al mes de julio y se almacenaron en condiciones de laboratorio a 23 °C $\pm$ 3 y 65% de HR $\pm$ 5, durante 12 días, tiempo en el cual adquirió la madurez organoléptica o de consumo, periodo en que se procesó.

Extracción del aceite de aguacate

Se llevó a cabo por medio de un proceso termomecánico, se aplicó calentamiento y agitación mecánica a emulsiones acuosas de pulpa de aguacate en madurez de consumo.

Los frutos maduros se lavaron con agua y jabón comercial, desinfectados con hipoclorito de sodio en solución 100 ppm y enjuagados. A continuación se acondicionaron para la obtención de la pulpa.

Se prepararon las emulsiones de pulpa de aguacate y agua a temperaturas de 50 °C, 55 °C y 60 °C, posteriormente fueron llevadas a homogenización durante 10 minutos en un equipo industrial Javar® modelo LCT-15, capacidad 20 L y 3.600 rpm. La concentración lipídica de las emulsiones preparadas fue entre 3,0% y 4,0% en función de la concentración total de lípidos de la pulpa (20% $\pm$ 2) encontrada en los análisis previos (Márquez, Yepes, Sánchez & Osorio, 2014).

Todos los procedimientos fueron realizados a condiciones ambientales normales de laboratorio, de 23 °C $\pm$ 2, Humedad Relativa de 65% $\pm$ 5 y presión atmosférica de 640 mm de Hg.

La emulsión se hizo pasar a través de un equipo descremador marca Westfalia AG Oelde/Westf® de 50 platos operado a 8070 rpm, las cuales son las recomendadas para la extracción de soluciones con contenido lipídico entre el 3,0% al 4,0%. Mediante este procedimiento se separó la fracción lipídica debido a la menor densidad, como consecuencia de tener una composición química de compuestos apolares orgánicos que le confieren esa característica. El procedimiento se realizó por triplicado

para cada temperatura de extracción, utilizando para cada extracción 15 kg de los cuales 3 kg fueron de participación de pulpa de aguacate correspondiente a un 20%, por lo tanto con una concentración lipídica en la emulsión del 4% de lípidos totales en la emulsión, el tiempo de extracción fue de 5 min y la fracción hidrosoluble se hizo pasar nuevamente por el equipo descremador, para un rendimiento de fracción lipídica total del 8%, es decir se obtuvieron 1,2 kg $\pm$ 0,1 de fracción lipídica, compuesta mayoritariamente por aceite y otros componentes. Posteriormente, la fracción lipídica obtenida en el descremador se llevó a centrifugación en un equipo marca Hettich Universal 320R®, operado a 3.500 rpm y temperatura ambiente de 23 °C durante 15 min, donde se separaron los sólidos e impurezas, y se obtuvo el aceite puro extra virgen, el cual se expreso en porcentaje en relación con la concentración inicial de lípidos conocida para la pulpa. Se realizaron un total de 9 extracciones, 3 para cada temperatura de experimentación.

Los cálculos de rendimiento del porcentaje de extracción de aceite, se realizaron con referencia a la concentración total de lípidos de la pulpa, se determinó por el método Soxhlet y fue igual a 20% $\pm$ 2 (Márquez, et al. 2014).

Se utilizó el diseño estadístico completamente al azar, con tres tratamientos y tres réplicas, como variable respuesta se consideró el porcentaje de extracción de aceite. Los análisis estadísticos aplicados a los resultados obtenidos consistieron en; prueba de rangos múltiples, chi cuadrado, cálculo de medias y error estándar.

Aceite de aguacate

El aceite obtenido se evaluó de acuerdo con los lineamientos establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 241 (2014) y la norma para aceites vegetales CODEX STAN 210 (1999). Los índices fisicoquímicos se evaluaron según los procedimientos especificados por la Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1984) y la American Oil Chemists Society (AOCS 1990; Bernal, 1993; Egan, Kirk & Sawyer, 1991).

Perfil lipídico

Se realizó un proceso de derivatización para convertir los ácidos grasos presentes en el aceite de aguacate en sustancias de bajo peso molecular no polares, con el fin de mejorar la volatilidad y la sensibilidad en la detección. Para ello, se pesó 0,1 g de aceite, se adicionaron 3 mL de éter etílico, se agitó y se adicionó 1 mL de hidróxido de trimetil amonio,

se sometió nuevamente a agitación y se extrajo la fracción superior del recipiente.

Los ácidos grasos presentes en el aceite y su concentración se evaluaron según la metodología propuesta por Gómez-Coca, Moreda y Pérez-Camino, (2012), para lo cual se utilizó un cromatógrafo de gases acoplado a un espectrómetro de masas marca Agilent Technologies® modelo 6890N, equipado con inyector Split/splitless y detector selectivo de masas 5973N. Se utilizó una columna capilar de sílice (5% de difenil - dimetilpolisiloxano al 95%) las temperaturas para el inyector y el detector fueron 300 °C y 325 °C respectivamente, el gas portador fue Nitrógeno con un caudal de 1 mL/min. La rampa de temperatura fue 80 °C, 1 min, luego subió a 15 °C/min hasta 140 °C, y finalmente ascendió a 4,5 °C/min hasta alcanzar 335 °C, 16 min.

Determinación de vitamina E (α Tocoferol). Se utilizó el método oficial AOAC 992.03, saponificando el radical α **tocoferol** en la muestra por medio de solventes orgánicos y con posterior cuantificación por cromatografía líquida de alta resolución HPLC, para la cual se empleó un cromatógrafo marca Agilent Technologies® serie 1100 con sistema de automuestreador, bomba cuaternaria y detector de arreglo de diodos que opera en el rango entre 190 y 1100 nm. Se utilizó una columna de fase normal Lichrosorb Si 60 (Merck) de tamaño de partícula 5 μ m. La inyección de volumen fue de 20 μ L, caudal de 1,0 mL/min. La fase móvil fue 0,5% de isopropanol en n-hexano (3:97) (Beltrán, et al. 2010). La absorbancia se midió a 295 nm. Se identificó el α Tocoferol comparando el tiempo de retención con el estándar. Los resultados fueron reportados en mg/100g de muestra.

Determinación de capacidad antioxidante y fenoles totales. Se evaluaron y se analizaron por duplicado dos muestras: una de pulpa de aguacate maduro correspondiente al día 12 poscosecha, y una de aceite de aguacate extraído a 55 °C. Se preparó una solución del 2% p/v de muestra con etanol, se filtró en papel Whatman No. 1 y se centrifugó a 2.000 rpm durante 10 min a 23 °C en un equipo Indulab®. El sobrenadante se recuperó y se utilizó directamente para la prueba de capacidad antioxidante total por el método DPPH, ORAC y para determinar los fenoles totales.

Evaluación de la actividad antioxidante total por el método de captura de radicales libres que utiliza el radical DPPH (1,1-difenil-2-picril-hidrazilo). Para cuantificar la capacidad captadora de radicales libres de las muestras se determinó el grado de decoloración que provocaron

sus componentes a una solución metanólica de DPPH (1,1-difenil-2-picril-hidrazilo). Se preparó una solución madre de DPPH en metanol la cual se estandarizó a 517 nm. Se preparó una solución con la muestra, DPPH y metanol y un blanco de muestra que contenía solo metanol y muestra. Por último, se preparó un blanco de referencia con DPPH y solvente de la muestra. Se incubó a temperatura ambiente durante 30 min en la oscuridad y se midió la absorbancia a 517 nm en un espectrofotómetro Jenway® modelo 6405 UV-Vis. La reacción consiste en un cambio de color violeta a amarillo por la presencia de una sustancia antioxidante (Brand-Williams, Cuvelier, & Berset, 1995).

Evaluación de la actividad antioxidante total por método ORAC (Oxygen Radical Absorbance Capacity). El procedimiento experimental se realizó como lo describen (Ou, Hampsch, & Prior, 2001), con algunas modificaciones. Se empleó Trolox como estándar a una temperatura de 37 °C y pH 7,4. Las lecturas se realizaron a 493 nm y 515 nm. Para el desarrollo de la técnica se utilizaron soluciones de fluoresceína 1×10^{-2} M en PBS (Buffer de Fosfato de Sodio 75 mM) y AAPH 0,6 M en PBS (Buffer de Fosfato de Sodio 75 mM). El proceso se determinó usando un espectrofluorímetro.

Determinación de fenoles totales. Se cuantificaron de acuerdo con la reacción que presentan los compuestos fenólicos con el reactivo Folin-Ciocalteu, el cual se reduce en solución alcalina de carbonato de sodio saturada (Na_2CO_3), formando un color azul que se lee a 760 nm. Se tomaron 50 μ L de muestra, se adicionaron 50 μ L de Na_2CO_3 de concentración del 20% (p/v), 800 μ L de agua destilada y 100 μ L del reactivo Folin-Ciocalteu (Merck), se dejó una hora en reposo a condiciones de laboratorio (23 °C y 65% HR), se leyó absorbancia a 760 nm en un espectrofotómetro Jenway® modelo 6405 UV-Vis. Para la curva de referencia se utilizó ácido tánico ($\text{C}_{76}\text{H}_{52}\text{O}_{46}$), en concentración de 5 a 100 mg^*L , el contenido de fenoles totales fue expresado cómo mg de ácido tánico ($\text{C}_{76}\text{H}_{52}\text{O}_{46}$) por 100 g de muestra (Adaptado de Kalt, Forney, Martin & Prior, 1999).

Resultados y discusión

Mediante el procedimiento termomecánico, se obtuvo un mayor rendimiento de extracción para la temperatura de proceso de 55 °C, con un resultado promedio de aceite del 60,2% respecto a la concentración total lipídica de la pulpa que fue del $20\% \pm 2$. La Figura 1 presenta los porcentajes de extracción para las temperaturas utilizadas.

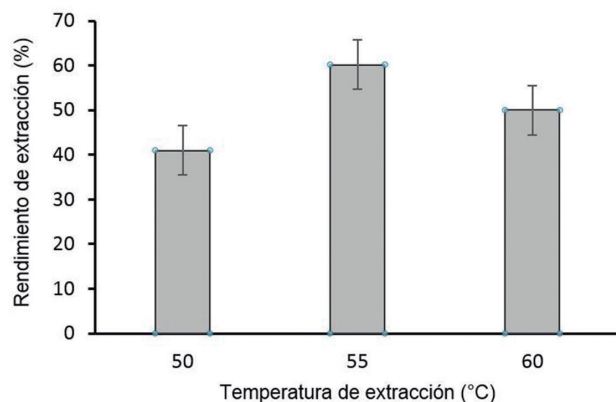


Figura 1. Porcentaje de rendimiento de aceite extraído de aguacate (*Persea americana* Mill. cv. Hass). Las barras representan la media y las líneas verticales los valores $\pm$ del error estándar para $n = 3$

Otros métodos de extracción como el enzimático han reportado rendimientos del 80% (Costa, 2001), el tratamiento con microondas y disolventes orgánicos arrojó resultados entre el 80% y el 90% (Jiménez, Aguilar, Zambrano & Kolar, 2001). En la aplicación del método termomecánico se encontraron rendimientos menores a los reportados por otros investigadores, no obstante la tecnología aplicada se considera relativamente sencilla, económica y de fácil transferencia al sector agroindustrial del aguacate. En especial, es un proceso de extracción de aceite que se considera más saludable para los potenciales consumidores al no utilizar solventes orgánicos. La Figura 2A y 2B presenta el procedimiento de extracción termomecánica de la fracción lipídica de las emulsiones de pulpa de aguacate y el proceso de purificación del aceite mediante centrifugación, respectivamente.



Figura 2. Extracción termomecánica de la fracción lipídica de las emulsiones de aguacate (2ª) y purificación del aceite de aguacate por centrifugación

La Tabla 1 muestra los índices de calidad del aceite de aguacate extraído a 55 °C.

Tabla 1. Índices de calidad del aceite de aguacate (*Persea americana* Mill. cv. Hass)

Análisis fisicoquímico	
Resultado	
Índice de yodo	80,98
Índice de acidez (%) expresado como ácido oleico	0,38
Punto de fusión (°C)	22-24
Índice de saponificación (mg KOH/g)	195,55
Índice de refracción a 25°C	1,4686
Índice de peróxidos (meq O ₂ /Kg)	5,56
Punto de humo (°C)	210
Vitamina E (α tocoferol, en mg/100g muestra)	10,11

De acuerdo con la Tabla 1, se encontró un índice de yodo de 80,98, el cual es relativamente alto, aspecto que puede estar relacionado con un alto porcentaje de ácidos grasos insaturados, este valor es mayor que el reportado por Costa (2001). Otros aceites como el de palma, presentan un valor promedio de 53 para el índice de yodo (Rincón & Martínez 2009). Según la NTC 258 (1996), para el aceite de oliva se exige un índice de yodo promedio de 85, por lo tanto el índice encontrado para el aceite de aguacate está muy cercano a este valor.

El índice de acidez de 0,38% para el aceite de aguacate extraído es un valor bajo, de acuerdo con la NTC 199, lo cual permite clasificar al aceite como extra virgen, pues su acidez es menor a 0,8%. Jiménez, et al. (2001) reportan distintos valores dependiendo del método de extracción, sin embargo están en un rango de 0,50% a 1,50%. Rincón

y Martínez(2009), reporta valores de 2,40% para el aceite de palma africana. Con los valores encontrados de acidez se podría clasificar el aceite de aguacate obtenido como de excelente calidad, debido al bajo contenido de ácidos grasos libres.

El índice de saponificación hallado de 195,55 mg KOH/g coincide con el obtenido por Costa (2001) y por el exigido por la NTC 258 (1996), para el aceite de oliva, mientras que para aceites como el de coco, cuyo peso molecular promedio es mayor por su contenido de ácidos grasos saturados, el índice de saponificación exigido por el Codex (1999) es de 250 mg KOH/g.

El índice de peróxidos para un aceite en óptimas condiciones debe ser bajo, el resultado encontrado de 5,56 meq O₂/kg es mayor que el reportado por Bora, Narain, Rocha, y Queiroz Paulo, (2001) de 3,78 meq O₂/kg obtenido para el aceite de palma de Milpesos, lo anterior se debe probablemente a algún proceso de oxidación durante el almacenamiento, sin embargo se encuentra dentro de los valores especificados por la NTC 258 (1996).

El índice de refracción encontrado a 25 °C, de 1,4686 coincide con el obtenido por Human (1987) y por Jiménez, et al. (2001), indicando la calidad y pureza del aceite.

El punto de fusión, entre 22 °C y 24 °C indica que este aceite es líquido a temperatura ambiente, lo que también es válido para aceites como el de oliva y el de soya, los cuales pueden almacenarse a temperatura ambiente; a diferencia del aceite de palma africana que presenta un punto de fusión entre 34 °C a 40 °C (Rincón & Martínez, 2009), aspecto que implica implementar sistemas de calentamiento durante el transporte y almacenamiento para mantenerlo líquido.

El punto de humo de 210 °C para el aceite de aguacate es un poco menor que el hallado por Human (1987) para aceite crudo del mismo fruto; otros aceites como los de soya y maíz presentan puntos de humo de 257 °C y 246 °C respectivamente, lo que les confiere mayor resistencia a altas temperaturas de tratamiento; mientras que para el aceite de oliva es de 191 °C (Rincón. & Martínez, 2009); esto indica que el aceite de aguacate tiene mayor resistencia a las altas temperaturas que el de oliva, por lo que podría ser más adecuado para el uso en frituras.

La concentración de vitamina E (α tocoferol) de 10,11 mg/100 g indica que el aceite de aguacate posee de manera natural un agente protector a la oxidación, además del aporte nutricional. Savage, Webster y Plows, (1994) sostienen que el contenido de tocoferol en el aceite de

aguacate puede ser de hasta 3.700 ppm mientras que en el aceite de oliva varía de 12 a 150 ppm. Los niveles de tocoferol en aceite de aguacate y en el fruto varían dependiendo del grado de madurez. Lozano, Dhuique, Bannon, y Gaydou, (1993) reportaron niveles más bajos de tocoferol en el aceite extraído del fruto maduro (5,7 a 10,3 mg/100 g aceite) que de los frutos inmaduros que presentaron concentraciones de (20,1 a 45,6 mg/100 g de aceite).

La vitamina E ayuda a prolongar la vida útil del aceite de aguacate, ya que destruye radicales libres producidos durante las reacciones de oxidación por presencia de hidroperóxidos (Coppen, 1994). Los tocoferoles son inestables y sensibles a la luz, por lo tanto durante el proceso de extracción del aceite se recomiendan bajos niveles de oxígeno y de luz. Situación que no fue aplicada en la presente investigación, por lo tanto los bajos niveles de tocoferol pudieron ser debidos a no controlar las variables luz y oxígeno durante la experimentación.

La Tabla 2 presenta el perfil lipídico de los ácidos grasos del aceite de aguacate e indica claramente la gran proporción de ácidos grasos insaturados en relación con la cantidad de los saturados. El ácido palmítico fue el principal ácido saturado, con una concentración de 21,52%, casi el total de la grasa saturada, esto concuerda con lo encontrado por Bora, et al. (2001). El ácido graso insaturado más representativo fue el ácido oleico, con un 53,25%, menor que el encontrado por Human (1987) de 70,54% y por Costa (2001) de 75,12%. El porcentaje de ácidos grasos poliinsaturados fue de 13,62%, mayor al reportado por Parra (2005) de 12,1%, pero coincide con lo reportado por Pérez, Villanueva, y Cosio, (2005). Puede observarse además que no contiene colesterol, en cambio posee ácidos grasos esenciales omega 3 y omega 6, indispensables en la dieta.

Otros aceites vegetales han presentado un contenido de ácido palmítico promedio de 43% y ácido oleico de 40%, mientras que según la NTC 258 (1996), el aceite de oliva debe tener un porcentaje de ácido oleico entre 55% a 83%; el aceite de soya, en cambio, posee las mayores cantidades de ácido linoleico y ácido linolénico, 48,60% y 10,85% respectivamente, al igual que el aceite de canola comercial que tiene porcentajes elevados de estos ácidos (Osuna, Judis, Avallone, & Romero, 2009). Las especificaciones señaladas para aceite de aguacate comercial en California, indican que el ácido palmítico (C16:0) debe fluctuar entre el 5% y 25%, un máximo de 3,0% de ácido esteárico (C18:0) y un intervalo de ácido oleico entre 50% y 74% (Parra, 2005).

Tabla 2. Perfil lipídico de ácidos grasos del aceite de aguacate (*Persea americana* Mill.cv. Hass)

Perfil lipídico de ácidos grasos	Resultado
Grasa saturada (%)	22,1059
Grasa insaturada (%)	77,377
Grasa monoinsaturada (%)	63,7555
Grasa poliinsaturada (%)	13,6216
Ácido palmítico (%)	21,5194
Ácido oleico (%)	53,2511
Ácido linoléico (%)	12,8726
Ácido linolénico (%)	0,7599
Ácido esteárico (%)	0,4806
Omega 3 (mg/100g)	759,292
Omega 6 (mg/100g)	12862,302
Omega 9 (mg/100g)	53208,499

El aceite de aguacate obtenido en el presente estudio se encuentra dentro de los rangos señalados. Es importante hacer notar el bajo porcentaje de ácido esteárico (C18:0) y en general de ácidos grasos saturados y el alto porcentaje de ácidos grasos monoinsaturados. Bergh (1992), señala que aunque los ácidos monoinsaturados y poliinsaturados están relacionados con la disminución del colesterol en la sangre, solo los monoinsaturados influyen en la reducción de la presión sanguínea.

La importancia de la biodisponibilidad de los ácidos grasos insaturados oleico y linoléico radica en que estos son hipocolesterolemiantes, por lo que disminuyen las concentraciones del colesterol LDL (lipoproteína de baja densidad) que se deposita en las arterias y potencian las acciones beneficiosas del colesterol HDL (lipoproteína de alta densidad) (Stanley, 2008). Por estas razones el aceite de aguacate cumple con las recomendaciones nutricionales y además se considera un alimento funcional por el aporte de sustancias de conocido aporte a la buena salud de los consumidores. Las diferencias encontradas en este trabajo con respecto a otras investigaciones, en los índices fisicoquímicos y el perfil lipídico del aceite de aguacate, se deben probablemente a las técnicas empleadas en la extracción, a las condiciones ambientales en que se cultivó el fruto, a la variedad y al estado de madurez.

De acuerdo con la Tabla 3 se puede apreciar cómo los porcentajes de inhibición del radical DPPH fueron muy bajos, en un orden de 6,15% para la pulpa y 3,4% para el aceite extraído, lo anterior indica que tanto la pulpa como el aceite no son buenos atrapadores de radicales por la técnica

DPPH, ya que gran parte del radical queda sin estabilizar. Una muestra con buena actividad antioxidante por DPPH se encuentra en el orden de un porcentaje de inhibición mayor del 50 % (Corral, Yahia,, Carrillo, & González, 2008). La actividad antioxidante del aceite por el método ORAC también fue baja 518 μ M Trolox/100 g aceite, comparado con la actividad antioxidante de las bayas pequeñas, para fresa por ejemplo fue encontrado un valor de 3600 μ M Trolox/100 g (Fraternal, Giamperi, Bucchini, & Ricci, 2009; Wang, Bostic, & Gu, 2010), evaluaron en la pulpa, piel y semilla de aguacate (*Persea americana* Mill. cv. Hass) la capacidad antioxidante por los métodos DPPH y ORAC, encontrando valores muy bajos en la pulpa de 1,3 μ M TE/g y 11,6 μ M Trolox/g respectivamente, comparado con lo hallado en la semilla de 428,8 μ M Trolox/g.

Tabla 3. Capacidad antioxidante de aceite y pulpa de aguacate (*Persea americana* Mill. cv. Hass)

Método	Pulpa	Aceite
DPPH (% de inhibición)	6,15 $\pm$ 0,45	3,4 $\pm$ 0,22
ORAC (μ M Trolox/100 g Aceite)	---	518 $\pm$ 14

En aceites vegetales es normal encontrar valores bajos con la aplicación de las diferentes técnicas ya que durante el proceso de extracción generalmente se pierden muchos compuestos de actividad antioxidante, probablemente por la exposición al calor, la luz y el oxígeno. Además, es importante mencionar que algunos antioxidantes son polares, así que para evaluar la capacidad antioxidante es importante obtener extractos hidrofílicos y lipofílicos tanto del fruto como del aceite y así determinar la capacidad antioxidante en cada extracto ya que los diferentes compuestos antioxidantes se encuentran distribuidos de acuerdo con su afinidad con el medio (Cheng, Moore, & Yu, 2006; Villa, Molina, Ayala, Oliva, & González, 2011).

Hasta ahora, la mayoría de los estudios realizados sobre la actividad antioxidante de aguacate se han centrado principalmente en la evaluación de los compuestos hidrofílicos, como el ácido ascórbico y compuestos fenólicos, porque normalmente están muy relacionados con la actividad antioxidante importante en frutas y hortalizas (Wang, et al. 2010; Corral, et al. 2008) reportaron menor capacidad antioxidante en los extractos lipofílicos que en los extractos hidrofílicos de varias frutas tropicales como el mango, la papaya y el aguacate medidos por DPPH y expresados como TEAC.

Los fitoquímicos lipofílicos contribuyen a la actividad antioxidante total del aguacate, (Richard, Kefi, Barbe, Bausero, & Visiolo, 2008) han reportado que los ácidos

grasos insaturados pueden actuar como antioxidantes en función de su grado de saturación, sin embargo es necesario tener en cuenta los posibles efectos sinérgicos y/o antagonistas de estos compuestos ya que al hacer análisis específicos no se pueden evaluar estos comportamientos (Hidalgo, Sánchez, & Pascual, 2010).

La Tabla 4 presenta los valores de fenoles totales para la pulpa y aceite, los cuales son bajos, si se compara con otras frutas como la papaya en la que se encontró un valor de 57,8 mg GAE/100 g, el níspero con 56,9 mg GAE/100 g y el higo con 61 mg GAE/100 g (Pande & Akoh, 2010). Los valores hallados coinciden con el contenido total de fenoles encontrados en ocho cultivares diferentes de aguacate; la pulpa y semillas del cv. Hass con 4,9 mg GAE/g y 51,6 mg GAE/g respectivamente, fue el más alto comparado con los demás cultivares (Wang, et al., 2010; Wong, et al., 2009) señalan que hasta el momento los compuestos fenólicos no se encuentra en altas concentraciones en los aceites de aguacate, ya que la naturaleza y la concentración de los fenoles presentes en el mismo dependen de la composición del fruto y de las condiciones de extracción, siendo estos compuestos fácilmente modificables por la oxidación.

Tabla 4. Fenoles totales en aceite y pulpa de aguacate (*Persea americana* Mill.cv. Hass)

Muestra	Fenoles totales (mg ácido tánico/g muestra)
Pulpa	0,38 ± 0,01
Aceite	0,17 ± 0,01

Los bajos valores encontrados en la capacidad antioxidante y en los fenoles totales en la pulpa y aceite de aguacate podría tener relación con lo propuesto por Jayaprakasha, y Patil, (2007) quienes demostraron una relación causal entre el contenido de fenoles totales y la actividad antioxidante.

Conclusiones

La extracción termomecánica del aceite de aguacate representa una buena alternativa tecnológica para el sector agroindustrial de este cultivo, por tratarse de un procedimiento sencillo y asequible, brindando un producto final de excelente calidad y con alto potencial agroindustrial. La temperatura óptima de extracción del aceite para este proceso fue de 55 °C, con un rendimiento del 60,2%, sin causar deterioro a la calidad del aceite. De acuerdo con la norma NTC 199, el aceite de aguacate obtenido puede clasificarse como un producto extra virgen con

características similares a las del aceite de oliva, además se encontró un contenido de ácidos grasos insaturados $\omega 3$, $\omega 6$ de 759,292 mg/100 g, 12862,302 mg/100 g respectivamente y de Vitamina E de 10,11 mg/100 g, lo cual convierte al aceite de aguacate en un alimento altamente nutritivo y funcional.

Agradecimientos

Los autores agradecen de manera especial al técnico del laboratorio de frutas y hortalizas, Ingeniero Fernando Arenas Gil, además al personal de los laboratorios de Control de Calidad de Alimentos, Análisis instrumental y planta de lácteos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, por el apoyo brindado durante la etapa experimental del presente trabajo, igualmente, al Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Centro Textil y de Gestión Industrial, por la cofinanciación de la investigación.

Bibliografía

- Ashton, O., Wong, M., McGhie, T., Vather, R., Wang, Y., Requejo-Jackman, C., Ramankutty P., Woolf, A. (2006). Pigments in Avocado Tissue and Oil. J. Agric. Food Chem., 54 (26), pp 10151–10158. doi: <https://doi.org/10.1021/jf061809j>
- Association Of Official Analytical Chemist. (A.O.A.C.). (1984). Official methods on analysis of Association of Official Analytical Chemist. 14th ed. Virginia, U.S.A.
- Association Of Official Analytical Chemist. (A.O.A.C.). (1990). Official methods on analysis of Association of Official Analytical Chemist. 15th ed. U.S.A.
- Beltrán, G., Jiménez, A., Del Rio, C., Sánchez, S., Martínez, L., Uceda, M., Aguilera, M. (2010). Variability of vitamin E in virgin olive oil by agronomical and genetic factors. Journal of Food Composition and Analysis 23(6), 633–639. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2010.03.003>
- Bergh, B. (1992). The avocado an human nutrition. Avocados and your heart. Proceedings of the second world avocado congress. University of California, Riverside. California. 25-35 p

- Bernal, I. (1993). *Análisis de Alimentos*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C, 127 pp.
- Bora, P., Narain, N., Rocha, R., & Queiroz, P.M. (2001). Characterization of the oils from the pulp and seeds of avocado (cultivar: Fuerte) fruits. *Grasas Y Aceites*, 52(3-4). doi: <https://doi.org/10.3989/gya.2001.v52.i3-4.353>
- Brand-Williams, W. Cuvelier, M. E. & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT Food Science and Technology*, 28(1), 25–30. doi: [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Buenrostro, M. & López-Munguía, A.C. (1986). Enzymatic extraction of avocado oil. *Biotechnology Letters*, 8, 505–506. doi: <https://doi.org/10.1007/BF01025210>
- Cheng, Z., Moore, J. & Yu, L. (2006). High-throughput relative DPPH radical scavenging capacity assay. *Agricultural and Food Chemistry*, 54, 7429–7436. doi: <https://doi.org/10.1021/jf0611668>
- Codex Stan 210. (1999). Norma del Codex para aceites vegetales especificados.
- Coppen, P. (1994). Rancidity in Food. The use of antioxidants. London: Blackie Academic & Professional. 84-103.
- Corral, R., Yahia, E., Carrillo, A., & González, G. (2008). Correlation between some nutritional components and the total antioxidant capacity measured with six different assays in eight horticultural crops. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(22), 498–504.
- Costa, V. (2001). Tesis de pregrado Extracción enzimática y caracterización del aceite de palta (*Persea americana* Mill). Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Egan, H., Kirk, R. & Sawyer, R. (1991). *Análisis químico de alimentos de Pearson*. Editorial Continental, S.A. México, 520 pp.
- Fraternale, D., Giamperi, L., Bucchini, A. & Ricci, D. (2009). Antioxidant activity of prunus spinosa L. fruit juice. *Food Sci.*, 21, 337–346.
- Gómez-Coca, R., Moreda, W., & Pérez-Camino, M. (2012). Fatty acid alkyl esters presence in olive oil vs. organoleptic assessment. *Food Chemistry*, 135, 1205–1209. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.05.053>
- Hidalgo, M., Sánchez, C. & Pascual, T. (2010). Flavonoid-flavonoid interaction and its effect on their antioxidant activity. *Food Chemistry*, 691–696. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.12.097>
- Human, T. P. (1987). Oil as a byproduct of avocado. *South African Avocado Growers' Assoc. Yearbook*, 10, 159–162.
- Jayaprakasha, G. K. & Patil, B. S. (2007). In vitro evaluation of the antioxidant activities in fruit extracts from citron and blood orange. *Food Chemistry*, 101, 410–418. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.12.038>
- Jiménez, M.E., Aguilar, M., Zambrano, M., Kolar, E. (2001). Propiedades físicas y químicas del aceite de aguacate obtenido de puré deshidratado por microondas. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 45 (2), 89-92. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47545209>
- Kalt, W., Forney, C., Martin, A., & Prior, R. (1999). Antioxidant Capacity, Vitamin C, Phenolics, and Anthocyanins after Fresh Storage of Small Fruits. *J. Agric. Food Chem*, 47(11), 4638-4644. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.12.038>
- Kiritsakis, A.P., Lenart, E.B., Willet, W.C. & Hernandez, R.J (1998). *Olive Oil: From the Tree to the Table*. Food & Nutrition Press, cop. 2nd ed, 348.
- Lozano, Y., Dhuique, C., Bannon, E. & Gaydou, E. (1993). Unsaponifiable matter, total sterol and tocopherol contents of avocado oil varieties. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 70(6), 561-565. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02545319>

- Márquez, Cj., Yepes, D., Sánchez, L. & Osorio, J.A. (2014). Cambios físico-químicos del aguacate (*Persea americana* Mill. cv. "Hass") en poscosecha para dos municipios de Antioquia. *Temas Agrarios*, 19(1), 34-49. doi: <https://doi.org/10.21897/rta.v19i1.723>
- Norma Técnica Colombiana NTC 258 . (1996). Grasas y aceites comestibles vegetales y animales. Aceite de oliva. Norma Técnica Colombiana. Editado por Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC
- Norma Técnica Colombiana NTC 5209. (2003). Frutas frescas. Aguacate. Variedades mejoradas. Especificaciones. Norma Técnica Colombiana. Editado por Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC
- Norma Técnica Colombiana NTC 241.. (2014). Grasas y aceites comestibles vegetales y animales. Margarinas, esparcibles y minarinas para Uso en mesa y cocina. Editado por Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC
- Olaeta, J.A. (2003). Industrialización del aguacate: Estado actual y perspectivas futuras. *Actas V Congreso Mundial del Aguacate*. Granada, Málaga, España, 749-754.
- Osuna, M., Judis, M., Avallone, C., y Romero, A. (2009). Análisis del perfil lipídico de harinas y aceites funcionales para la elaboración de panes fortificados. *Comunicaciones científicas y tecnológicas*. Universidad Nacional del Nordeste, Argentina.
- Ou, B., Hampsch, M., & Prior, R., (2001). Development and validation of an improved oxygen radical absorbance capacity assay using fluorescein as the fluorescent probe. *J. Agric. Food Chem*, 49(10), 4619-4626. doi: <https://doi.org/10.1021/jf010586o>
- Pande, G. & Akoh, C. (2010). Organic acids, antioxidant capacity, phenolic content and lipid characterisation of Georgia-grown underutilized fruit crops. *Food Chemistry*. 120, 1067-1075. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.11.054>
- Parra, J. (2005). Rendimiento y calidad de pulpa y aceite en nueve selecciones de palto (*Persea americana* Mill.) en Chile. Tesis de pregrado Fac. de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Pérez, R., Villanueva, S. & Cosío, S. (2005). El aceite de aguacate y sus propiedades nutricionales. *Revista e-Gnosis*, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México.
- Reed. (2001) Avocados: The new wonder oil?. *Food New Zealand*, 31 (1) 20- 25.
- Richard, D., Kefi, K., Barbe, T., Bausero, P. & Visiolo, F. (2008). Polyunsaturated fatty acids as antioxidants. *Pharmacological Research*, 57(6), 451-455. doi: <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2008.05.002>
- Rincón, S. & Martínez, D., (2009). Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria. *Revista Palmas* 30(2), 11-23.
- Savage, G., Webster, G., & Plows, E. (1994). The advantages of increasing olive oil in the diet: Proceedings of a Continuing Education Seminar. Oils & Fats Specialist Group of the NZ Institute of Chemistry.
- Smith, L. M. & Winter, F. H. (1970). Research on avocado processing at the University of California Davis. *California Avocado Soc. Yearbook*, 54, 79-84.
- Stanley, J. (2008). The nutritional reputation of palm oil. *Lipid technology*, 20(5), 2. doi: <https://doi.org/10.1002/lite.200800024>
- Swisher, H. E. (1988). Avocado oil— from food use to skin care. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 65, 1704-1706.
- Velásquez, J. (2006). Identificación del aguacate como un rubro importante de grandes oportunidades comerciales, según los acuerdos de integración, los nuevos tratados comerciales y el comercio mundial globalizado. Secretaria de Productividad y Competitividad. Gobernación de Antioquia.

- Villa, J., Molina, F., Ayala, J., Oliva, G. & González, G. (2011). Effect of maturity stage on the content of fatty acids and antioxidant activity of 'Hass' avocado. *Food Research International*, 44, 1231-1237. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.11.012>
- Wang, W., Bostic, T. & Gu, L. (2010). Antioxidant capacities, procyanidins and pigments in avocados of different strains and cultivars. *Food Chemistry*, 122, 1193–1198. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.03.114>
- Werman, M. J. & Neeman, I. (1987). Avocado oil production and chemical characteristics. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 64, 229–232. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02542007>
- Wong, M., Ashton, O., Requejo-Jackman, C., McGhie, T., White, A., Eyres, L., Sherpa, N., and Woolf, A. (June, 2008). Avocado Oil: The Color of Quality, Color Quality of Fresh and Processed Foods. Simposio dirigido por American Chemical Society, Vol. 983. Washington DC.

Conservación de uchuva (*Physalis peruviana*) mediante la aplicación de un recubrimiento a base de quitosano y áloe vera, utilizando el método de aspersión

Conservation of Uchuva (*Physalis Peruviana*) by applying a coating based on chitosan and aloe vera, using the spray method

Recibido: 07- 12 - 2016 Aceptado: 20-05-2017

Ana Muñoz¹
Angie Barbosa²
Daniela Bustos³
Yenifer Ramírez⁴
Yesenia Vásquez⁵
Jaqueline García⁶
Marcelo Guancha⁷

Resumen

El objetivo de esta investigación fue estimar la vida útil de la uchuva por efecto de la aplicación de un recubrimiento a base de quitosano y áloe vera utilizando el método de aspersión. La Norma Técnica Colombiana (NTC 4580) se empleó para comparar las características físicas de las uchuvras, utilizando como indicadores de deterioro, pérdida de peso, carotenoides totales e índice de color. Las muestras evaluadas se mantuvieron a dos condiciones de almacenamiento; bajo refrigeración (4 °C) y a temperatura ambiente de la ciudad de Cali (28 °C), durante un periodo de 21 y 6 días, respectivamente. Cuatro muestreos se realizaron para cada temperatura y los resultados obtenidos se utilizaron para definir la cinética de deterioro. La cinética fue de orden cero, siendo la pérdida de peso el indicador que limitó el tiempo de vida útil. Las variables como pH, acidez e índice de madurez no mostraron diferencia significativa a un nivel de significancia $p < 0,05$. Finalmente, el modelamiento cinético para la pérdida de peso presentó un incremento de 1 día para las muestras almacenadas a temperatura ambiente y de 2 días para las muestras refrigeradas a 4 °C.

Palabras clave: Recubrimiento; vida útil; uchuva; áloe vera; quitosano.

Abstract

The objective of this research was to estimate the useful life of the uchuva by the application of a coating based on chitosan and aloe vera using the spray method. The Colombian Technical Standard (NTC 4580) was used to compare the physical characteristics of uchuvras, using

¹ Colombiana. Tecnóloga. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro ASTIN.

² Colombiana. Tecnóloga. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro ASTIN.

³ Colombiana. Tecnóloga. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro ASTIN.

⁴ Colombiana. Tecnóloga. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro ASTIN.

⁵ Colombiana. Tecnóloga. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro ASTIN.

⁶ Colombiana. Espc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro ASTIN. Grupo de Investigación GIDEMP.

⁷ Colombiano. M.Sc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro ASTIN. Grupo de Investigación GIDEMP.

as indicators of deterioration, weight loss, total carotenoids and color index. The evaluated samples were maintained under two storage conditions; Under refrigeration (4 °C) and at room temperature of the city of Cali (28 °C), during a period of 21 and 6 days respectively. Four samples were taken for each temperature and the results obtained were used to define the deterioration kinetics. The kinetics were of zero order, with weight loss being the indicator that limited the shelf life. Variables such as pH, acidity and maturity index did not show a significant difference at a significance level of $p < 0.05$. Inally, the kinetic model for weight loss showed a 1-day increase for samples stored at room temperature and 2 days for samples refrigerated at 4 °C.

Keywords: coating; shelf life; uchuva; aloe vera; chitosan.

Introducción

La uchuva (*Physalis peruviana* L.) es una fruta tropical nativa de la región andina, perteneciente a la familia de las *Solanaceae*s (Carvalho, Villaño, Moreno, Serrano, & Valero, 2015; Caballero, Ortiz, Maldonado, & Rivera, 2011), se caracteriza porque sus frutos están envueltos por un cáliz o capacho (Caballero et al., 2011), siendo Colombia y Sudáfrica los mayores productores (Carvalho et al., 2015). Es una de las frutas exóticas más prometedoras debido a su composición nutricional ya que contiene altos niveles de minerales como hierro, fósforo, vitaminas A y C, así como carotenoides (Carvalho et al., 2015; Mendoza, Rodríguez, & Millan, 2012). Se le atribuyen propiedades medicinales, tales como: purificar la sangre, disminuir la albúmina de los riñones, fortalecer el nervio óptico, limpiar las cataratas y aliviar las afecciones de garganta (Novoa, 2006).

La uchuva se exporta en fresco a Europa con el cáliz debido a que este incrementa su vida útil (Carvalho et al., 2015), sin embargo, el cáliz dificulta su transporte, manipulación, conteo y exhibición (Balaguera-López, Martínez, & Herrera-Arévalo, 2014). En Colombia y EE.UU se comercializa el fruto sin el cáliz (Balaguera-López et al., 2014) lo que genera una disminución del periodo de vida útil debido a que se acelera el proceso de maduración, la producción de etileno, pérdida de peso y se incrementa el índice de madurez (Balaguera-López et al., 2014). En consecuencia, para incrementar la vida útil del fruto sin el cáliz es necesario buscar alternativas que permitan reducir los procesos de degradación y favorezcan la comercialización; una de ellas es la aplicación de recubrimientos sobre la superficie de las frutas, los

cuales en diversas investigaciones se han utilizado para incrementar el período de almacenamiento y preservar la calidad proporcionando una barrera que permite disminuir la velocidad de intercambio de oxígeno, dióxido de carbono y agua, así como la protección contra agentes microbianos (Andrade, Skurtys, & Osorio, 2012; Kaviani, Shariati, Joshevska, Tomovska, & Vanaei, 2015; Rojas-Graü, Soliva-Fortuny, & Martín-Belloso, 2009).

Algunos compuestos que se han utilizado para la obtención de recubrimientos son biopolímeros como almidones, derivados de celulosa, quitosano, proteínas y lípidos entre otros (Elsabee & Abdou, 2013). En este trabajo se planteó el uso del quitosano como alternativa para obtener recubrimientos debido a sus propiedades antifúngicas y antimicrobianas, su característica de ser comestible y su perfil no tóxico (Elsabee & Abdou, 2013; Vieira et al., 2016). Particularmente los recubrimientos de quitosano tienen una permeabilidad selectiva a los gases (CO_2 y O_2) pero una alta permeabilidad al vapor de agua, lo que limita su uso en alimentos con alto contenido de humedad (Elsabee & Abdou, 2013), por lo tanto, dentro de las alternativas para mejorar las propiedades de barrera de recubrimientos a base de quitosano, usualmente se utilizó en mezcla con otros hidrocoloides como los constituyentes del gel de áloe vera, el cual se compone aproximadamente de 99,5% de agua, el 0,5% restante lo integran polisacáridos y otros componentes (Sepulcre, Benítez, Achaerandio, & Pujol, 2015). El polisacárido más importante del gel de áloe vera es el glucomanano, que es una estructura química formada por glucosa y manosa, que le da la propiedad de retener agua (Dominguez et al., 2012; Sepulcre et al., 2015). Por lo anterior su incorporación en recubrimientos con quitosano permitiría disminuir la permeabilidad al vapor de agua e incrementar la resistencia mecánica (Khoshgozaran-Abras, Azizi, Hamidy, & Bagheripoor-Fallah, 2012).

En frutas y verduras las propiedades físicas y químicas dependen del espesor y homogeneidad del recubrimiento, razón por la cual el método de aspersión es la técnica más adecuada, este consiste en incrementar el área superficial del líquido a través de la formación de pequeñas gotas que se forman en un conjunto de boquillas y permiten una distribución uniforme de la solución del recubrimiento sobre la superficie del alimento y un control del espesor (Andrade et al., 2012). Por el contrario, en métodos como el de inmersión no se puede controlar el espesor debido a la falta de homogeneidad, por el escurrimiento natural que ocurre durante el secado sobre la superficie del fruto; además las cantidades de solución de revestimiento no se pueden controlar fácilmente, debido a que el fruto se tiene

que sumergir en la solución de este (Andrade et al., 2012). Un espesor alto restringe el intercambio gaseoso durante la respiración del tejido vegetal causando acumulación de gases de desecho que traen como efecto la muerte de los tejidos internos del alimento (Guancha, Caicedo, Ruiz, & Valencia, 2016). Por lo anterior, en este trabajo se evaluó el efecto del uso de un recubrimiento de quitosano y aloe vera utilizando el método de aplicación por aspersión sobre el cambio de color, carotenoides totales, pH, acidez total, contenido de sólidos solubles y pérdida de peso en uchuva durante el almacenamiento a temperatura ambiente (TA 28 °C) y en refrigeración (4 °C).

Materiales y Métodos

Materiales

Se utilizó quitosano comercial suministrado por la empresa Polímeros Naturales S.A.S.. El gel mucilaginoso empleado fue extraído de hojas de penca de sábila (*áloe barbadensis miller*) adquiridos en un supermercado, las cuales se seleccionaron según atributos de sanidad, se lavaron y desinfectaron con hipoclorito de sodio a una concentración de 100 mg/L y se estabilizó según protocolo realizado por Kaviani y colaboradores (Kaviani et al., 2015). Se utilizó glicerol como plastificante, y vinagre grado alimenticio. La uchuva (*Physalis peruviana* L.) empleada para la evaluación presentó un diámetro aproximado de 2,5 cm (con peso entre 4 a 5 g) obtenida de una finca del municipio de Silvia (Cauca, Colombia), en estado adecuado para el procesamiento o consumo en fresco. Las uchuvas se desinfectaron con hipoclorito de sodio a una concentración de 100 mg/L y se lavaron con agua destilada, procediendo a su secado a TA y se almacenaron a 4 °C.

Preparación y aplicación del recubrimiento

Se prepararon soluciones de quitosano en vinagre (1%, v/v) a 3,5%, las cuales se mezclaron con Aloe vera estabilizado en proporciones de 80:20. Se utilizó como plastificante glicerol al 1,0% con respecto al total de la mezcla (Guancha et al., 2016). Para cada ensayo se seleccionaron lotes de 400 uchuvas. A 200 unidades se les aplicó el recubrimiento utilizando un aerógrafo metálico previamente esterilizado acoplado a un compresor de aire, el tamaño de la boquilla utilizada fue de 0,5mm, la presión del compresor se conservó a 2,0 bar y se mantuvo una distancia aproximada de 40 cm entre la boquilla y el producto, quedando las restantes (200 unidades

como control – sin recubrimiento). Se realizaron 3 ciclos de aplicación, cada ciclo consistió en la aplicación del recubrimiento y un secado por 10 min. Finalmente, las muestras se almacenaron en bandejas, las cuales se repartieron en lotes de 25 unidades. 4 bandejas con recubrimiento (CR) y 4 bandejas sin recubrimiento (SR) se llevaron a refrigeración y se mantuvieron almacenadas durante 21 días a 4 °C, la misma cantidad (CR y SR) se dejó almacenada a 28 °C (temperatura promedio de la ciudad de Cali) durante 8 días. Los parámetros fisicoquímicos se determinaron cada 7 días para las muestras refrigeradas, y cada 2 días para las muestras almacenadas a TA. Las temperaturas y los tiempos se tomaron de acuerdo con las recomendaciones reportadas en (Balaguera-López et al., 2014; Pinzón, Reyes, Álvarez-Herrera, Leguizamo, & Joya, 2015).

Determinación de parámetros fisicoquímicos

El porcentaje de pérdida de peso se determinó durante el almacenamiento por diferencia de peso para cada temperatura de estudio en el intervalo establecido, utilizando una balanza analítica (Guancha et al., 2016) y se realizó por quintuplicado para cada ensayo. Para establecer el contenido de carotenoides totales las muestras de uchuva se homogenizaron en un extractor de jugos, posteriormente se pesa 0,50 g de muestra en un tubo de ensayo de vidrio de 15 mL, se adicionan 7 mL de una mezcla 3:4 (hexano:etanol). Las muestras obtenidas se cubren con papel aluminio y se agita durante 1 h en baño de hielo utilizando un agitador orbital. Finalmente, se adiciona 1 mL de agua destilada y se agita durante 20 min adicionales. Para las medidas de absorbancias se toma 3 mL de la fase orgánica y se mide la absorbancia utilizando como blanco hexano en un espectrofotómetro. La concentración (µg/g) se determina utilizando un coeficiente de extinción molar de 2560 a 450 nm (Ordóñez-Santos, Martínez-Álvarez, & Vázquez-Riascos, 2014; Ordóñez-Santos, Vázquez-Oderiz, & Romero-Rodríguez, 2011). Los cálculos de carotenoides totales se determinan de acuerdo con la ecuación 1 (Cuesta, Andrade, Moreno, & Concellón, 2013). El proceso se realiza por quintuplicado para cada muestra.

$$C[\mu\text{g/g}] = \frac{A_{450\text{nm}} \text{Volumen final}(\text{ml}) 10^4}{2560 \text{peso muestra}(\text{g})} \quad (1)$$

Donde, C es la concentración de carotenoides, $A_{450\text{nm}}$ absorbancia a una longitud de onda de 450 nm, 2560 es el coeficiente de extinción molar de β-caroteno en hexano.

A las muestras con recubrimiento y control (sin recubrimiento) que se utilizaron para determinar la pérdida de peso también se les determina el color superficial empleando un colorímetro Minolta CR-400 (D65, 2°, Y=89,5; x=0,3176; y=0,3347). Los datos se recolectaron en el espacio de color CIELab y los valores de L (brillantez), a (oscila entre rojo y verde) y b (oscila entre amarillo y azul) se registraron durante cada ensayo por triplicado. Además, se estimó el Índice de Color IC=[1000*a]/[L*b] (Ordóñez-Santos, Hurtado-Aguilar, Ríos-Solarte, & Arias-Jaramillo, 2014).

Los sólidos solubles totales se determinan por triplicado para cada una de las muestras usando un refractómetro digital Atago PR-101 y se expresan como °Brix. La acidez titulable se determinó por triplicado por valoración con NaOH 0,1 N hasta pH 8,1, utilizando 5 mL de jugo extraído de la muestra diluida en 50 mL de agua destilada, los resultados se expresan g equivalentes de ácido cítrico por 100 g peso fresco. El índice de madurez (IM) se determina por la relación entre los sólidos solubles totales y la acidez titulable.

Modelamiento cinético

La variación del color, pérdida de peso y contenido de carotenoides en los alimentos con el tiempo responde a modelos cinéticos de orden cero o de primer orden (García, Chacón, & Molina, 2011). Por lo tanto, las anteriores variables de respuesta se pueden modelar de acuerdo con la ecuación 2 (Ghidouche, Rey, Michel, & Galaffu, 2013; Valencia, Cortés, & Román, 2013):

$$-\frac{dC}{dt} = kC^n \quad (2)$$

Donde, C es la variable de respuesta (parámetros fisicoquímicos), t es el tiempo, k es la constante de velocidad y n el orden de la reacción. El modelo se determina de acuerdo al valor del coeficiente de correlación (R^2) más alto para un orden de reacción determinado.

Análisis estadístico

Para determinar diferencias significativas con las muestras CR y SR para cada una de las temperaturas se utilizó una correlación del 95% (Tukey, p <0,05).

Resultados y discusión

Propiedades fisicoquímicas (acidez, °Brix, pH e índice de madurez (IM))

En la Tabla 1 se muestran los resultados del porcentaje de acidez, °Brix e índice de madurez para cada uno de los tratamientos (a 4 °C y a TA, a muestras con recubrimiento (CR) y sin recubrimiento (SR)).

En el pH, %Acidez, °Brix e IM no se observaron diferencias significativas a (P<0,05) durante el almacenamiento y no se observaron diferencias entre los tratamientos (CR y SR). Es decir que el recubrimiento no es un factor que influye sobre el pH, acidez, °Brix e IM. Sin embargo, los resultados de °Brix oscilaron entre 13,40 ± 0,10 y 15,43 ± 0,12 para las muestras almacenadas a 4 °C y entre 13,90 ± 0,20 y 15,70 ± 0,61 para las muestras almacenadas a temperatura ambiente los cuales coinciden con los reportados en la NTC 4580 (ICONTEC, 1999) cuyos valores oscilan entre 14,1 y 15,1 correspondientes a estados de madurez comprendidos entre 4 y 6 (ICONTEC, 1999). Por el contrario, los resultados del IM oscilaron entre 10,64 y 12,37 para las muestras almacenadas a 4 °C y entre 10,97 y 16,66 para muestras almacenadas a temperatura ambiente, valores que están por encima de los mínimos recomendados para el IM según la NTC 4580 (ICONTEC, 1999) cuyo límite máximo es 9.

Modelamiento cinético

Los parámetros utilizados para el modelamiento cinético fueron el porcentaje de pérdida de peso, carotenoides totales e índice de color (IC). Para determinar el modelo cinético de cada uno de los parámetros de estudio, se evaluaron modelos de cero, primero y segundo orden. Con respecto al porcentaje de pérdida de peso no se observaron cambios a un nivel de significancia de p<0,05 durante el almacenamiento CR y SR a las dos temperaturas de estudio. Sin embargo, los resultados revelan velocidades superiores de pérdida de peso para las muestras sin recubrimiento. En la Figura 1 se muestran los resultados de la pérdida de peso para las muestras CR y SR para las dos temperaturas evaluadas. Los resultados muestran que el modelamiento cinético de orden cero es el que mejor se ajusta a los datos debido a que presenta los coeficientes de regresión más altos ($R^2>0,90$), es decir que presenta una velocidad de pérdida de peso constante.

Tabla 1. Resultados de propiedades fisicoquímicas

Tratamiento	Día	CR			SR			IM	
		%Acidez	°Brix	Ph	%Acidez	°Brix	pH	CR	SR
4 °C	0	0,943±0,030	13,40±0,10	3,947±0,012	0,943±0,030	13,40±0,10	3,980±0,040	14,40	14,40
	7	1,327±0,020	13,87±0,12	3,937±0,006	1,374±0,007	14,07±0,06	3,883±0,006	10,64	10,43
	14	1,190±0,034	14,50±0,00	3,993±0,015	1,267±0,013	14,10±0,10	3,950±0,010	12,37	11,32
	21	1,242±0,717	13,97±0,06	3,955±0,007	1,382±0,798	15,43±0,12	3,985±0,007	11,44	11,36
TA	0	0,964±0,007	13,90±0,20	4,082±0,006	0,964±0,007	13,90±0,20	4,137±0,025	14,61	14,61
	2	0,875±0,007	14,40±0,26	4,363±0,006	0,969±0,007	13,73±0,06	4,363±0,006	16,66	14,37
	4	1,216±0,111	15,70±0,61	4,637±0,015	0,9600,000±	14,30±0,62	4,640±0,053	13,11	15,09
	6	1,024±0,000	15,33±0,15	4,420±0,036	1,045±6,015	11,27±0,49	4,503±0,032	15,17	10,97

Medias ±desviación estándar. SR: Sin recubrimiento, CR: con recubrimiento

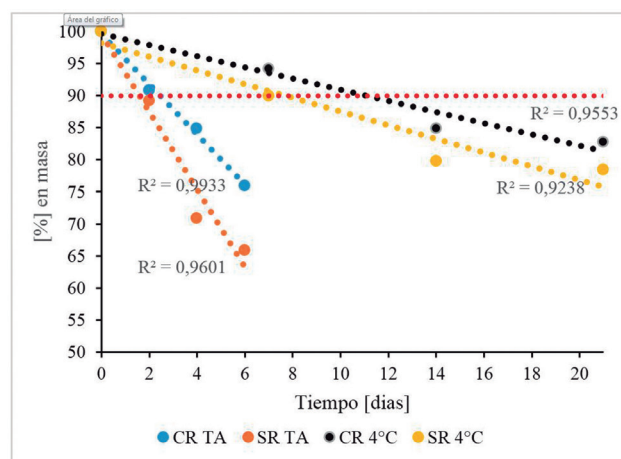


Figura 1. Variación de pérdida de peso en el tiempo para uchuva

De acuerdo con lo reportado por Pinzón y colaboradores (Pinzón, Reyes, Álvarez-Herrera, Leguizamó, & Joya, 2015) cuando las muestras superan pérdidas mayores o iguales al 10% del peso, desaparece la frescura de frutas y verduras. En la Figura 1 el almacenamiento a 4 °C favoreció el incremento de la vida útil de las uchuvas ya que el rango aceptable se mantiene por mayor tiempo en comparación con las muestras almacenadas a TA. Además, es evidente el efecto del recubrimiento dado que el rango aceptable se incrementa para las dos temperaturas de estudio. En la Tabla 2 se muestran los resultados de los parámetros del modelamiento cinético para el factor de pérdida de peso.

Con respecto a los resultados de la constante k (valor absoluto), esta es mayor para las muestras SR (6,049, 1,071) en comparación con las muestras CR (3,910, 0,871) lo que se traduce en una mayor velocidad de pérdida. Hay que tener en cuenta que si el límite de la pérdida de peso es el 10% para

el tratamiento a TA se incrementaría de 1,7 a 2,6 días por efecto de la adición del recubrimiento (aproximadamente 1 día). Para el tratamiento a 4 °C el incremento del tiempo sería de 9,3 a 11,5 días.

Tabla 2. Resultados del modelamiento cinético de pérdida de peso

Tratamiento		R²	K	Tiempo [días]
TA	CR	0,993	-3,910	2,6
	SR	0,960	-6,049	1,7
4 °C	CR	0,955	-0,871	11,5
	SR	0,924	-1,071	9,3

En la Figura 2 se muestran los resultados de la variación de los carotenoides totales con el tiempo de almacenamiento para cada una de las temperaturas de estudio (a) y del modelamiento cinético (b). No se presentan diferencias significativas a un nivel de significancia de $P < 0,05$ para las muestras almacenadas a TA. Por el contrario, para las muestras almacenadas a 4 °C se observan diferencias significativas en el tercer muestreo (día 14) entre las muestras CR y SR.

De acuerdo con la Figura 2(a) para las muestras almacenadas a 4 °C se estima un incremento en el contenido de carotenoides totales con el tiempo. Sin embargo, para el día 14 se observa un punto de inflexión para las muestras SR. Así mismo para las muestras almacenadas a temperatura ambiente el punto de inflexión se presenta en el día 2. Por lo anterior, estos puntos de inflexión se toman como valor límite para realizar el modelamiento cinético, el cual se presenta en la Figura 2(b) y se muestra como la variación del porcentaje del contenido de carotenoides en función del tiempo de almacenamiento. El punto de inflexión se presenta cuando el contenido de carotenoides totales se ha

incrementado un 34,7% para las muestras almacenadas a 4 °C y en 69,2% para las muestras almacenadas a temperatura ambiente. Los resultados revelan que el modelamiento cinético de orden cero es el que mejor se ajusta a los datos ya que presenta los coeficientes de regresión más altos ($R^2 > 0,80$) para las muestras almacenadas a 4 °C, para las muestras almacenadas a TA la regresión se realizó solo para tener un criterio de comparación dado que solo existen dos puntos cuando se presenta la inflexión. En la Tabla 3 se muestran los resultados de los parámetros del modelamiento cinético para carotenoides totales.

Con respecto a los resultados de la constante k , esta es mayor para las muestras SR (34,63 y 2,48) en comparación con las muestras CR (26,74 y 1,28), lo que se traduce en una mayor velocidad en el incremento de carotenoides totales. Teniendo en cuenta el punto de inflexión menor (34,7% para el tratamiento a temperatura ambiente) el tiempo de vida útil se incrementó de 1,0 a 1,3 días por efecto de la adición del recubrimiento. Para el tratamiento a 4 °C el tiempo se incrementó de 13,97 a 27,19 días.

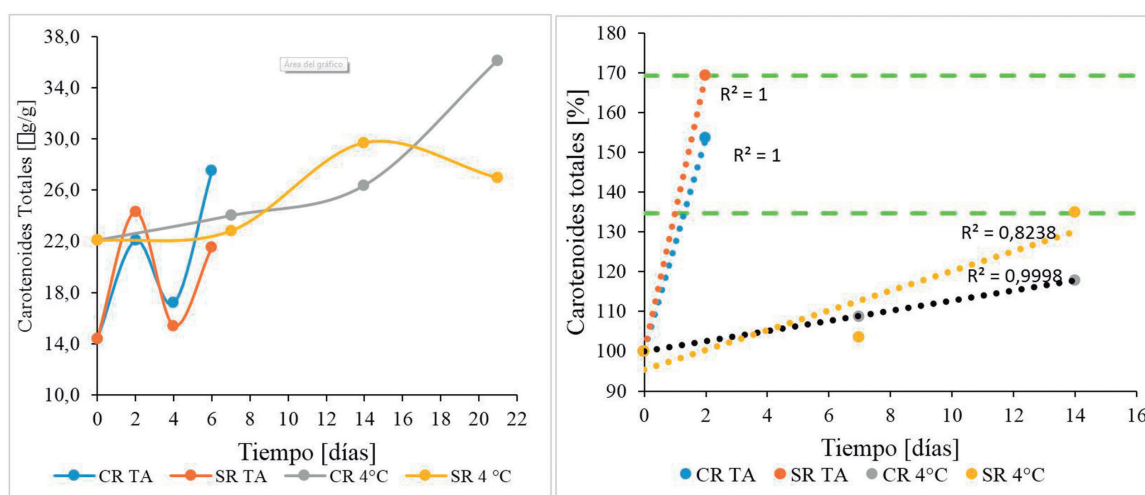


Figura 2. Resultado de la variación de carotenoides totales (a) Variación de carotenoides totales con el tiempo de almacenamiento (b) Modelamiento cinético

Tabla 3. Parámetros de modelamiento cinético para carotenoides totales

Tratamiento		R^2	K	Tiempo [días]
TA	CR	1,0000	26,74	1,30
	SR	1,0000	34,63	1,00
4 °C	CR	0,9998	1,28	27,19
	SR	0,8238	2,48	13,97

De acuerdo con lo reportado por Cajamar (2014), la variación del IC comprendidos entre 2 y 20 indican colores que van desde el amarillo pálido al naranja intenso. En este trabajo el IC varió entre 5,99 y 6,58 para muestras CR y entre 5,23 y 8,38 para muestras SR a temperatura de almacenamiento de 4 °C. Así mismo, para almacenamiento a TA el IC varió entre 7,15 y 10,22 para muestras SR y 7,38 y 8,75 para muestras CR. Estos valores son cercanos a los reportados por Pinzón y colaboradores (Pinzón et al., 2015) cuyo valor promedio a 4 °C es 7,54 que corresponden a frutos de color amarillo con alta luminosidad. También se reporta que valores del IC mayores a 8 son frutos de color

amarillo naranja, sobre maduros y de baja luminosidad; dichos valores se presentan para muestras SR.

Por otro lado, la Figura 3 muestra la variación del IC en porcentaje con el tiempo de almacenamiento (a) y el modelamiento cinético (b) para las temperaturas de estudio. No se observan diferencias significativas a un nivel de significancia de $P < 0,05$ para las muestras almacenadas a temperatura ambiente. Por el contrario, para las muestras almacenadas a 4 °C se presentan diferencias significativas en el tercer muestreo (día 14) entre las muestras CR y SR. De acuerdo con la Figura 3(a) para las muestras almacenadas a 4 °C se observa un incremento en el contenido de IC con

el tiempo. Sin embargo, para el día 14 se observa un punto de inflexión para las muestras CR. Así mismo, para las muestras almacenadas a temperatura ambiente el punto de inflexión se presenta en el día 2 para la muestra SR y en el día 4 para la muestra CR. Por lo anterior, estos puntos de inflexión se toman como valor límite para realizar el modelamiento cinético el cual se presenta en la Figura 3(b) y se muestra como la variación del porcentaje del IC en función del tiempo de almacenamiento. El punto de inflexión menor se presenta cuando el IC es de 12,47% para las muestras almacenadas a temperatura ambiente SR y del 10,00% para las muestras almacenadas a 4 °C CR. Los resultados revelan que el modelamiento cinético de orden cero es el que mejor se ajusta a los datos debido a que

presenta los coeficientes de regresión más altos ($R^2 > 0,80$). En la Tabla 4 se muestran los resultados de los parámetros del modelamiento cinético para el IC.

Con respecto a los resultados de la constante k esta mayor a las muestras SR (6,419 y 4,293) en comparación con las muestras CR (3,227 y 0,715) lo que se traduce en una mayor velocidad en el incremento de IC. Teniendo en cuenta el punto de inflexión de 12,47% para el tratamiento a temperatura ambiente se incrementó de 2,0 a 4,0 días por efecto de la adición del recubrimiento (aproximadamente 2 días). Para el tratamiento a 4 °C el tiempo se incrementó de 3,03 a 18,19 días (15 días aproximadamente).

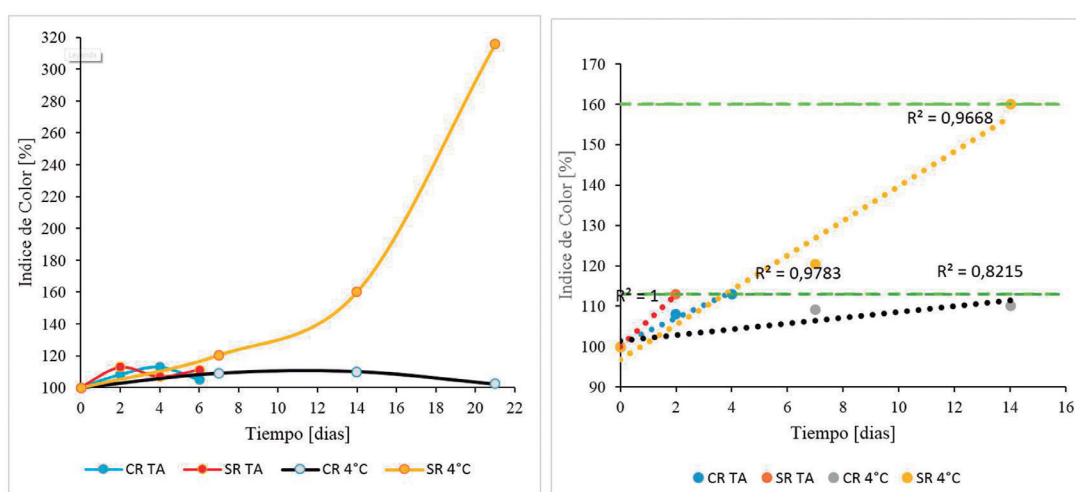


Figura 3. Resultado de la variación de IC (a) Variación de IC con el tiempo de almacenamiento (b) Modelamiento cinético

Tabla 4. Parámetros modelamiento cinético IC

Tratamiento		R^2	K	Tiempo [días]
TA	CR	0,9783	3,227	4,03
	SR	1,0000	6,419	2,03
4 °C	CR	0,9998	0,715	18,19
	SR	0,8238	4,293	3,03

Conclusiones

La cinética de pérdida de color en uchuva puede ser modelada a través de una cinética de orden cero para parámetros como pérdida de peso, carotenoides totales e índice de color a 4 °C y temperatura ambiente. Además, la aplicación de recubrimiento a base de quitosano y áloe vera en uchuva en las condiciones de este trabajo, permite incrementar la conservación de carotenoides totales, el IC y reduce la velocidad de pérdida de peso.

Dentro de las variables críticas para determinar el tiempo de vida útil en uchuva se encuentra la pérdida de peso ya que de acuerdo con los resultados de este trabajo se observa que una pérdida del 10% en peso indica no aceptabilidad del producto, aunque las variables como carotenoides totales e índice de color se mantengan en los rangos establecidos.

Las propiedades de PH, °Brix, acidez, IM evaluadas no muestran diferencias significativas entre los frutos con y sin recubrimiento, por tanto no se recomienda usarlas para

evaluar la incidencia del recubrimiento en frutos como la uchuva.

Los resultados del modelamiento cinético no son concluyentes, por lo que se recomienda para posteriores investigaciones incrementar el número de mediciones y garantizar mayor homogeneidad de las muestras a evaluar.

Agradecimientos

Este trabajo se desarrolló gracias al apoyo del Centro Astin-SENA, al Grupo de Investigación en Desarrollo de Materiales y Productos (GIDEMP) especialmente a Carolina Caicedo y al Laboratorio de Frutas y Hortalizas de la faculta de Ingeniería y Administración de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Palmira por facilitarnos la realización de los ensayos colorimétricos.

Bibliografía

- Andrade, R. D., Skurtys, O., & Osorio, F. A. (2012). Atomizing Spray Systems for Application of Edible Coatings. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 11, 323–337. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2012.00186.x>
- Balaguera-López, H. E., Martínez, C. A., & Herrera-Arévalo, A. (2014). Papel del cáliz en el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) ecotipo Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 8(2), 181–191. doi: <https://doi.org/10.17584/rcch.2014v8i2.3212>
- Caballero P, L.A., Ortiz G, L., Maldonado O, Y. & Rivera, M.E. (2011). Valoración de las características físicas de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) comercializada en el municipio de Pamplona. *Alimentech Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 9(1), 49–55.
- Cajamar. (2014). Parámetros de calidad externa en la industria agroalimentaria.
- Carvalho, C. P., Villaño, D., Moreno, D., Serrano, M., & Valero, D. (2015). Alginate Edible Coating and Cold Storage for Improving the Physicochemical Quality of Cape Gooseberry (*Physalis Peruviana* L.). *Journal of Food Science and Nutrition*, 1(1), 7.
- Cuesta, L., Andrade, M. J., Moreno, C., & Concellón, A. (2013). Contenido de compuestos antioxidantes en tres estados de maduración de tomate de árbol (*Solanum betaceum Cav*). Cultivado a diferentes alturas (msnm). *Universidad Tecnológica Equinoccial*, 4(1) 32–49.
- Dominguez, R., Arzate, I., Chanona, J., Welti, J., Alvarado, J., & Calderón, G. (2012). El gel de áloe vera: Estructura, composición química, procesamiento, actividad biológica e importancia en la industria farmacéutica y alimentaria. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 1, 23–43.
- Elsabee, M. Z., & Abdou, E. S. (2013). Chitosan based edible films and coatings : A review. *Materials Science & Engineering C*, 33(4), 1819–1841. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2013.01.010>
- García, C., Chacón, G., & Molina, M. (2011). Evaluación de la vida útil de una pasta de tomate mediante pruebas aceleradas por temperatura. *Ingeniería*, 21(2), 31–38.
- Ghidouche, S., Rey, B., Michel, M., & Galaffu, N. (2013). A Rapid tool for the stability assessment of natural food colours. *Food Chemistry*, 139(1–4), 978–985. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.12.064>
- Guancha Chalapud, M., Caicedo, C., Ruiz, E., & Valencia, M. (2016). Propiedades de conservación: recubrimiento a base de quitosano y áloe vera aplicado en papa criolla (*Solanum phureja*). *Informador Técnico*, 80(1), 9–19. doi: <https://doi.org/10.23850/22565035.325>

- Mendoza, J.H., Rodríguez, A., & Millán, P. (2012). Caracterización físicoquímica de la uchuva (*Physalis peruviana*) en la región de Silvia Cauca. *Biotecnología En el sector agropecuario Y agroindustrial*, 10(2), 188–196.
- ICONTEC. (1999). NTC 4580 Frutas frescas. Uchuva, especificaciones.
- Kaviani, M., Shariati, M. a., Joshevska, E., Tomovska, J., & Vanaei, M. (2015). Effects of Chitosan and Aloe Vera Gel Coating on Quality Characters of Pistachio. *Journal of Nutritional Health & Food Engineering*, 2(1). doi: <https://doi.org/10.15406/jnhfe.2015.02.00042>
- Khoshgozaran-Abras, S., Azizi, M. H., Hamidy, Z., & Bagheripoor-Fallah, N. (2012). Mechanical, physicochemical and color properties of chitosan based-films as a function of Aloe vera gel incorporation. *Carbohydrate Polymers*, 87(3), 2058–2062. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.10.020>
- Novoa, R. H. (2006). La madurez del fruto y el secado del cáliz influyen en el comportamiento poscosecha de la uchuva, almacenada a 12°C (*Physalis peruviana* L.). *Agronomía Colombiana*, 24(1), 77–86.
- Ordóñez-Santos, L. E., Martínez-Álvarez, G. M., & Vázquez-Riascos, A.M. (2014). Effect of processing on the physicochemical and sensory properties of mammee apple (*Mammea americana* L.) fruit. *Agrociencia*, 48(4), 377–385.
- Ordóñez-Santos, L. E., Hurtado-Aguilar, P., Rios-Solarte O.D. & Arias-Jaramillo, M.E. (2014). Concentración de carotenoides totales en residuos de frutas tropicales *. *Producción + Limpia*, 9(1), 91–98. doi: <https://doi.org/10.22507/pml.v9n1a7>
- Ordóñez-Santos, L. E., Vázquez-Odériz, M. L., & Romero-Rodríguez, M. A. (2011). Micronutrient contents in organic and conventional tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.). *International Journal of Food Science and Technology*, 46(8), 1561–1568. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02648.x>
- Pinzón, E. H., Reyes, A. J., Álvarez-herrera, J. G., Leguizamo, M. F., & Joya, J. G. (2015). Comportamiento del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L), bajo diferentes temperaturas de almacenamiento. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 32(2), 26–35. doi: <https://doi.org/10.22267/rcia.153202.10>
- Rojas-Graü, M. A., Soliva-Fortuny, R., & Martín-Belloso, O. (2009). Edible coatings to incorporate active ingredients to fresh-cut fruits: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 20(10), 438–447. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.05.002>
- Sepulcre, F., Benítez, S., Achaerandio, I., & Pujol, M. (2015). LWT - Food Science and Technology Aloe vera as an alternative to traditional edible coatings used in fresh- cut fruits : A case of study with kiwifruit slices. *LWT - Food Science and Technology*, 61, 184–193. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.11.036>
- Valencia, F., Cortes, M., & Roman, M. (2013). Cinética del color durante el almacenamiento de caramelos blandos de uchuva adicionados de calcio y sin sacarosa. *Revista Lasallista de Investigacion*, 9(2), 11–25.
- Vieira, J. M., Flores-lópez, M. L., Jasso, D., Rodríguez, D., Sousa, M. C., Vicente, A. A., & Martins, J. T. (2016). Postharvest Biology and Technology Effect of chitosan – Aloe vera coating on postharvest quality of blueberry (*Vaccinium corymbosum*) fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 116, 88–97. doi: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.01.011>

Indice de Autores

Authors

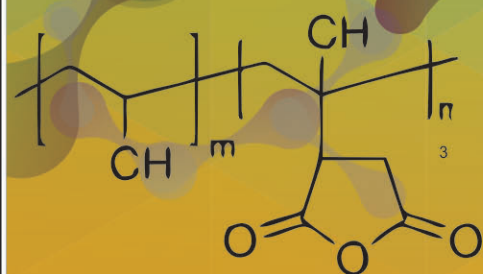
- Ana Muñoz. Colombiana Tecnóloga. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro ASTIN.
- Andrés Fernando Gil Plazas. Colombiano, Ing. Centro de Materiales y Ensayos. SENA. Regional Distrito Capital. Grupo GIMES. E-mail. aisisae@misena.edu.co.
- Angie Barbosa. Colombiana Tecnóloga. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro ASTIN.
- Augusto Rodríguez-Orejuela. Colombiano, Ph.D. en Ciencias de la Empresa. Profesor Titular. Universidad del Valle, Facultad de Ciencias de la Administración, Departamento de Administración y Organizaciones, Director del Grupo de Investigación en Marketing. Calle 4B No 36-00 Cali, Colombia. E-mail: augusto.rodriguez@correounivalle.edu.co.
- Camilo Andrés Páramo Velásquez. Colombiano. Diseñador Industrial Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Gestor de la línea de Ingeniería y Diseño en Tecnoparque. Ingeniero Biomédico.
- Carlos Julio Márquez Cardozo. Colombiano. Ph.D. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agrarias. Medellín, Colombia. Profesor Asociado. cjmarque@unal.edu.co"
- Daniela Bustos. Colombiana Tecnóloga. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro ASTIN.
- Diana Paola Yepes Betancur. Colombiana. Ph.D. (c). Servicio Nacional de Aprendizaje SENA Líder SENNOVA SENA, Centro Textil y de Gestión Industrial. Medellín, Antioquia. *Autor para correspondencia.diayepesb@misena.edu.co
- Edwin Fernando Ramírez Murillo. Colombiano. Ingeniero Electrónico. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. ASTIN, Cali – Colombia, Unidad de Investigación Aplicada, Desarrollo Tecnológico e Innovación, UIADTI – SENA. eramirez@misena.edu.co
- Edwin Flórez-López. Colombiano. Ph.D. Universidad Santiago de Cali, Programa de Química, Facultad de Ciencias Básicas, Grupo de Investigación en Química y Biotecnología-QUIBIO, 4102, Pampalinda, Cali, Colombia
- Gustavo Adolfo Rojas Olave. Colombiano. Químico Industrial. Universidad Tecnológica de Pereira. Escuela de Química, Facultad de Tecnologías, QIAMMSB, Apartado Aéreo 97, 660003, La Julita, Pereira, Colombia
- Jaqueline García. Colombiana Espc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro ASTIN. Grupo de investigación GIDEMP.
- Jhon Fernando Guateque. Colombiano. Químico Industrial. Universidad Tecnológica de Pereira. Escuela de Química, Facultad de Tecnologías, QIAMMSB, Apartado Aéreo 97, 660003, La Julita, Pereira, Colombia.
- Jorge Enrique Moreno Serrano. Colombiano. M.Sc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. CEAI, Cali – Colombia, Unidad de Investigación Aplicada, Desarrollo Tecnológico e Innovación, UIADTI – SENA. jemorenos@sena.edu.co
- Juan Gonzalo Álvarez Díaz. Colombiano. M.Sc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. CEAI, Cali – Colombia, Unidad de Investigación Aplicada, Desarrollo Tecnológico e Innovación, UIADTI – SENA. * jgalvarez@sena.edu.co
- Juliana Vélez López. Colombiana. Tecnóloga en diseño de calzado y marroquinería Servicio Nacional de Aprendizaje SENA del Centro de Diseño y Manufactura del Cuero del SENA. Aprendiz e investigadora Grupo BIOMATIC. * Autora de correspondencia jvelezlopez@gmail.com.

- Laura Sánchez Giraldo. Colombiana. M.Sc. (c). Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agrarias. Laboratorio de Frutas y Hortalizas. Medellín, Colombia. lcsanche@unal.edu.co”
- Liz Karen Herrera Quintero. Colombiana. M.Sc. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Facultad de ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Grupo de análisis de falla, integridad y superficie (AFIS). E-mail. lkherreraq@unal.edu.co.”
- Luis Carlos Ardila Téllez. Colombiano. M.Sc. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Facultad de ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Grupo de análisis de falla, integridad y superficie (AFIS). E-mail. lcardilat@unal.edu.co.
- Marcelo Guancha. Colombiano M.Sc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro ASTIN. Grupo de investigación GIDEMP.
- Marcos Flórez-Álamo. Mexicano. Ph.D. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria Facultad de Química, 04510 México, D.F., México.
- Marisol Gordillo. Colombiana, Profesora Titular, Ph.D. Grupo Materiales Compuestos, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia.
- Miguel Solís-Molina. Colombiano, Ph.D. en Administración. Profesional G06 Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria ASTIN, integrante del Grupo de Investigación en Innovación, Gestión Tecnológica y del Conocimiento INGETEC-ASTIN y del Grupo de Investigación en Marketing de la Universidad del Valle. Calle 52 #2bis-15 Salomia, Cali, Colombia. E-mail: masolis@misena.edu.co.”
- Miguel Hernández-Espallardo. Español, Ph.D. en Ciencias Económicas y Empresariales. Sección Empresa. Profesor Titular de Universidad. Universidad de Murcia, Facultad de Economía y Empresa, Departamento de Comercialización e Investigación de Mercados. Campus de Espinardo, 30100 Murcia, España. E-mail: migher@um.es.
- Patricia Castaño Rivera. Colombiana. Ph.D. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA del Centro de Diseño y Manufactura del Cuero del SENA. Instructora e investigadora Ciencia y Tecnología, mención: materiales. Grupo BIOMATIC.
- Sebastián Valderrama Mejía. Colombiano. M.Sc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA del Centro de Diseño y Manufactura del Cuero del SENA Instructor e investigador Biomecánica. Bioingeniero. Grupo BIOMATIC.
- Silvio Delvasto Arjona. Colombiano, Profesor Titular, Ph.D. Grupo Materiales Compuestos, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Víctor Guillermo Barrientos Sossa. Colombiano. M.Sc. Centro de Materiales y Ensayos. SENA. Regional Distrito Capital. Grupo GIMES. E-mail. vbarrientos@misena.edu.co.
- Yenifer Ramírez. Colombiana Tecnóloga. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro ASTIN.
- Yenny Patricia Ávila-Torres. Colombiana. Ph.D. Universidad Tecnológica de Pereira, Escuela de Química, Facultad de Tecnologías, QIAMMSB, Apartado Aéreo 97, 660003, La Julita, Pereira, Colombia.
- Yesenia Vásquez. Colombiana Tecnóloga. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Centro ASTIN.
- Yimmy Fernando Silva Urrego. Colombiano, Estudiante de Doctorado en Ingeniería de Materiales. Grupo Materiales Compuestos, Universidad del Valle, Cali, Colombia. yimmy.silva@correounivalle.edu.co.



III Simposio DE MATERIALES POLIMÉRICOS

Agosto **2017**
30, 31 Sept.1



$$K = A \cdot e^{\frac{-E_a}{RT}}$$

Curso de Reología Aplicada

A cargo de: TA Instruments

Ponencias Magistrales

Conversatorio

¿Cómo se encamina Colombia al desarrollo
de plásticos Bio-basados?

«Polímeros a partir de fuentes renovables»

EVENTO GRATUITO
Cupo Limitado

II Concurso de posters, videos e infografías
como Método para Divulgación de Resultados Científicos

Inscripciones hasta 31 de Julio de 2017
insc.simposiopolimeros@gmail.com

Cali - Colombia

www.gidemp.blogspot.com



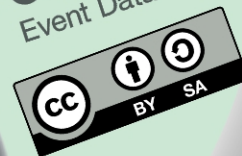
Organiza



Con el Apoyo de



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



ISSN 0122-056X e-ISSN 2256 - 5035



60 AÑOS
CONSTRUYENDO PAZ

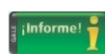
"Aportando conocimiento
para el desarrollo social,
tecnológico y económico del país"



Número DOI

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

Indexada en:



revistaitastin@sena.edu.co



Actualidad Iberoamericana
Índice Internacional de Revistas



CENTRO NACIONAL DE ASISTENCIA
TÉCNICA A LA INDUSTRIA ASTIN

CALLE 52 No. 2Bis -15

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

Fax: (2) 447 1075 - 446 7182

www.sena.edu.co

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

E-mail: astin@sena.edu.co

INFORMADOR TÉCNICO

Calle 52 No. 2Bis - 15

Cali, Valle del Cauca, Colombia

Teléfonos: 57 (2) 431 5800 Ext. 22694

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

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

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