



REVISTA COLOMBIANA DE INVESTIGACIONES AGROINDUSTRIALES

Vol. 10 Núm. 2 Jul - Dic 2023 E-ISSN: 2422-4456

The SennaNova logo is located in the bottom right corner, enclosed in a white circular frame. It features the word "SENN" in green and "NOVA" in blue, with a stylized circular graphic element between them.

SENNNOVA

Sistema de Investigación,
Desarrollo Tecnológico e Innovación

COMITÉ CIENTÍFICO

GILLERMO SALAMANCA GROSSO
Posdoctorado en Ingeniería de Alimentos
Profesor Titular
Facultad de Ciencias, Departamento de Química
Universidad del Tolima
Ibagué, Colombia

JUAN SEBASTIÁN RAMÍREZ
PhD. en Ingeniería de Alimentos
Universidad del Valle
Cali - Colombia

ANA FUENTES LÓPEZ
PhD. en Ciencias de los Alimentos
Universidad Politécnica de Valencia, España.

JAVIER MAURICIO OBANDO ULLOA
PhD. en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE)
Instituto Tecnológico de Costa Rica, TEC. Sede Regional
San Carlos, Costa Rica

RAMÓN GONZALO ARAGADVAY YUNGAN
PhD. En Veterinaria
Universidad Técnica de Ambato.
Ecuador.

JULIANA GAMBOA SANTOS
PhD.
Universidad Nacional de la Plata
Argentina

LUZ MARINA FLÓREZ PARDO
Ph.D.
Universidad Autónoma de Occidente.
Colombia.

JAVIER MAURICIO OBANDO ULLOA,
Ph.D.
Instituto Tecnológico de Costa Rica.
Costa Rica

ALESSANDRA LOPES DE OLIVEIRA
Ph.D.
Universidad de São Paulo.
Brasil.

GERMÁN AYALA VALENCIA
Ph.D.
Universidad Federal de Santa Catarina.
Brasil.

MANUEL CASTILLO ZAMBUDIO
Ph.D.
Universitat Autònoma de Barcelona (UAB).
España.

SIMÓN PÉREZ MARTÍNEZ
Ph.D.
Universidad Estatal de Milagro (UNEMI).
Ecuador.

ALEJANDRO ISABEL LUNA MALDONADO
Ph.D.
Universidad Autónoma de Nuevo León
Mexico.

RAMÓN FELIPE MOREIRA MARTÍNEZ
Ph.D.
Universidad de Santiago de Compostela
España.

COMITÉ EDITORIAL

JOSÉ LIBARDO TAPIERO CUÉLLAR
Editor Jefe
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA
Colombia

JOSÉ EDISON ESCOBAR SALCEDO
Editor de Asociado
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA
Colombia.

ADRIANA PAOLA BONILLA SÁNCHEZ
Gestora Editorial
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA
Colombia.

JOVANY PERTÚZ CRESPO
Auxiliar Editorial
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA
Colombia.

ISSN electrónico: 2422-4456
Julio - Diciembre 2023

REVISTA COLOMBIANA DE INVESTIGACIONES AGROINDUSTRIALES VOL.10 NÚM 2 JULIO-DICIEMBRE 2023

La Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales con ISSN 2422-4456 es una revista de acceso abierto, digital. Arbitrada por pares internacionales y periodicidad continúa. Su principal objetivo es la circulación de conocimiento especializado a través de la publicación de investigaciones científicas y tecnológicas, relacionadas con las áreas de Ciencias Agroalimentarias, Metabolitos Secundarios, Biotecnología Agropecuaria, vida Apícola y Desarrollo Tecnológico e Innovación Empresarial.

Incluye adicionalmente, aplicaciones de otras ciencias afines que puedan enriquecer la disciplina como lo son: Biotecnología, Bioprocesos, Nutrición e Inocuidad, Informática Aplicada, Economía Aplicada y Matemática Aplicada. La revista es editada por el Centro Agropecuario del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Buga-Valle, Colombia.

Copyright

La publicación de los artículos en la Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales es responsabilidad de los autores, los artículos publicados vía electrónica están autorizados por los autores mediante cesión derechos de autor.

Calidad editorial y propiedad intelectual

La Revista se acoge a una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional.

Esta licencia permite que otros puedan descargar las obras y compartirlas con otras personas, siempre que se reconozca su autoría, pero no se pueden cambiar de ninguna manera ni se pueden utilizar comercialmente. Para más información remitirse al sitio web: <http://co.creativecommons.org/tipos-de-licencias/>



Indexada en:



Redes sociales:



TABLA DE CONTENIDO

INVESTIGACIÓN

Las disciplinas ómicas en la ciencia de los alimentos	1
Juan Sebastián Ramírez Navas, Fressia Jaramillo López, Lizbeth Lorena López Parra	
Sustitución parcial de la harina de trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.) por harina de chocho (<i>Lupinus mutabilis</i>) en la elaboración de galletas	23
Víctor Jhoel Cabrera Mera, Jennifer Ivana Benavides Panchana, Andrea Cristina Cortez, Jhonnatan Placido, Karol Yannela Revilla	
Caracterización fisicoquímica de los cereales y funcionalidad de las harinas de amaranto (<i>Amaranthus caudatus</i>) y quinoa (<i>Chenopodium quinoa</i>)	33
Karen Solange Urbina Dicao, Stalin Gustavo Santacruz Terán, Gina Mariuxi Guapi Álava, Karol Yannela Revilla Escobar, Jhonnatan Placido Aldas Morejon	
Physicochemical evaluation of acid whey obtained from doble crema cheese produced in Belén, Boyacá, Colombia	42
Erika Marcela Pineda, Golda Meyer Torres Vargas, Heley Estefany Cepeda Fonseca	
Influencia de aditivos en humectabilidad del bionemático HeberNem-S obtenido mediante secado por atomización	55
Yunier Luis Paneque Díaz, Nemecio González Fernández, Lourdes Mariana Crespo Zafra, Jesús Zamora Sánchez, Rutdali María Segura Silva, Amaury Pérez-Sánchez	
Efecto de la deshidratación de desechos de tomate en el contenido de compuestos fenólicos, carotenoides y capacidad antioxidante	67
Julio Cesar Armenta Gorosave, Vianey Méndez Trujillo, Daniel González Mendoza, Daniela Guadalupe González Valencia, Carlos Olvera-Sandoval	
Extraction and characterization of proteins present in concentrates from quality protein maize (QPM)	76
Mariel Garrido-Balam, Luis Antonio Chel Guerrero, Arturo Francisco Castellanos Ruelas, Yolanda Moguel Ordóñez, David Abram Betancur Ancona	
Morfometría de cladodios de nopal cultivado en Santander - Colombia: estudio exploratorio	88
Adriana Patricia Ramírez Castaño, Francisco Javier León, Yudy Mariana Alfaro Wisaquillo, Rafael Mariano Alvarez Quintero, Paola Andrea Zapata Ocampo	
Evaluación de las características fisicoquímicas y sensoriales del pan de molde enriquecido con Kiwicha (<i>Amaranthus caudatus</i> L.) y Cañihua (<i>Chenopodium pallidicaule</i> Aellen)	102
Ruth Esther Chamorro Gómez, Dani Abad Villar, Ángel David Natividad Bardales, Roger Estacio Laguna, Geanine Ríos García, Sergio Grimaldo Muñoz Garay, Ruben Max Rojas Portal, César Robert Cueto Rosales, Juan Edson Villanueva Tiburcio	
Compuestos orgánicos volátiles presentes en el aroma de 17 frutas exóticas en Colombia: revisión	117
Daniela Andrea Aguirre López, Angela María López Calvo, Sandra Milena López Calvo, Gonzalo Taborda Ocampo	

Las disciplinas ómicas en la ciencia de los alimentos

Omics disciplines in food science

Juan Sebastián Ramírez-Navasa^a  juan.ramirez@javerianacali.edu.co; Fressia Jaramillo-López^{ab}  fressia960124@javerianacali.edu.co; Lizbeth Lorena López-Parra^c  lizabeth.lopez@correounivalle.edu.co

^aPontificia Universidad Javeriana Cali, Departamento de Alimentación y Nutrición, Centro de Estudios Interdisciplinarios en Salud, Grupo de Investigación en Ciencias Básicas y Clínicas de la Salud; ^bPontificia Universidad Javeriana Cali, Departamento de Alimentación y Nutrición, Semillero de Investigación en Nutrición Molecular; ^cUniversidad del Valle, Grupo de Investigación en Productos Naturales y Alimentos (GIPNA).

Recibido: 26/05/2023 Aceptado: 28/06/2023

Citar, APA: Ramírez-Navas, J. S., Jaramillo-López, F. y López-Parra, L. L. (2023). Las disciplinas ómicas en la ciencia de los alimentos. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 10 (2), 1–22. <https://doi.org/10.23850/24220582.5694>

Resumen Las ciencias ómicas son un conjunto de disciplinas científicas que estudian de manera integral y sistemática los procesos biológicos y bioquímicos que se dan en un organismo o sistema biológico. En esta revisión narrativa, se abordaron particularmente las disciplinas (genómica, la transcriptómica, la proteómica y la metabolómica) y subdisciplinas ómicas (nutrigenómica, la nutrigenética, epigenómica, entre otras) que integra la foodómica, con el objetivo de presentar sus aplicaciones en las ciencias de los alimentos, dilucidando el alcance de cada una de éstas. Para esto, se realizó una búsqueda en diversas bases de datos empleando operadores booleanos y la estructuración de ecuaciones de búsqueda combinando palabras clave relacionadas a ómicas y ciencia de los alimentos. De los artículos identificados, se seleccionaron los que cumplían con los criterios de inclusión. Los resultados demuestran que la foodomics es la ciencia ómica más estrechamente relacionada con la ciencia de los alimentos. La foodómica estudia los procesos moleculares de los alimentos durante su producción, transformación, y como el consumo de dichos alimentos impacta en la salud humana. Además, esta ciencia ómica ha tenido uso aplicativo en el campo de las ciencias de los alimentos, incluyendo la mejoría del contenido de nutrientes en las plantas con el objetivo de tratar problemas de salud. Se concluye que el actuar de las ciencias ómicas en la ciencia de los alimentos es poco conocido y aplicado, sin embargo, presenta un potencial de acción es muy amplio.

Palabras clave: disciplinas y subdisciplinas ómicas, análisis multiómico, metodologías analíticas instrumentales, foodómica.

Abstract The omics sciences comprise a group of scientific disciplines that systematically and comprehensively investigate the biological and biochemical processes occurring in organisms or biological systems. This narrative review focuses on the omics disciplines (genomics, transcriptomics, proteomics, and metabolomics) as well as their subdisciplines (such as nutrigenomics, nutrigenetics, epigenomics, among other) within the field of foodomics. The objective is to present the applications of these disciplines in food sciences and to elucidate their individual scopes. To achieve this, a search was conducted using Boolean operators and search equations that combined omics and food science-related keywords across various databases. Relevant articles meeting the inclusion criteria were selected. The findings demonstrate that Foodomics is the omics science most closely related to Food Science. Foodomics explores the molecular processes of food production and transformation, while also examining the impact of food consumption on human health. Additionally, this interdisciplinary science has found practical applications in improving nutrient content in plants with a high potential for addressing health concerns. It is concluded that the action of omic sciences in food science is little known and applied, however, it has a very broad potential for action.

Keywords: omics disciplines and subdisciplines, multiomics analysis, instrumental analytical methodologies, foodomic.

Introducción

Los alimentos se consideran compuestos nutricionales básicos, para garantizar la existencia de todo organismo vivo. Su ingesta es necesaria para lograr una adecuada nutrición y mantener un estado de salud en equilibrio. Este conocimiento no es nuevo, así lo manifestó Hipócrates al acuñar su frase célebre (aforismo) “*Que tu alimento sea tu medicina, y que tu medicina sea tu alimento*”, también quedó registrado en El ingenioso hidalgo don Quijote de la Mancha, de Miguel de Cervantes Saavedra, donde reza “*La salud de todo el cuerpo se fragua en la oficina del estómago*” (Cervantes Saavedra, 1605). Sin embargo, los alimentos también pueden ser la causa de varios problemas de salud. Algunos alimentos, generalmente en mal estado o con algún tipo de contaminación microbiana, pueden causar náuseas e indigestión, intoxicación, alergias, enfermedades intestinales, entre otros. Comprender cómo los alimentos afectan positiva o negativamente la salud humana que han convertido a la ciencia de los alimentos en un área de importancia médica (Gallo., 2020).

Las ciencias ómicas son un conjunto de disciplinas científicas que estudian de forma integral y sistemática (enfoque multiómico) los procesos biológicos y bioquímicos que se dan en un organismo o sistema biológico, en este caso particular, los alimentos. Se enfocan, principalmente, en recopilar y analizar datos a gran escala para comprender a profundidad dichos procesos. Estas disciplinas utilizan tecnologías de alta complejidad y robusto rendimiento para examinar grandes conjuntos de datos y generar información valiosa para diferentes áreas de la ciencia (Barh *et al.*, 2013; Ning, 2023; Poetsch & Li, 2023).

El enfoque multiómico aborda, desde un enfoque holístico, los problemas biológicos. Éstos entrelazan la respuesta a interacciones

biológicas complejas que ocurren a varios niveles (p. ej., genes, proteínas y metabolitos) para estudiar mecanismos biológicos, como el efecto de los nutrientes en la salud celular. Los resultados de estos estudios permiten aumentar el impacto de la nutrición en la salud y el bienestar. Además, la integración de datos de varios niveles de ómica puede diferenciar el impacto de los factores ambientales y la nutrición en el desarrollo de enfermedades o trastornos de la salud. De igual manera, el enfoque multiómico permite el estudio de la composición química de una planta a nivel molecular, lo que puede derivar en una "huella digital" profunda para evaluar el valor nutricional (Gallo & Ferranti, 2016; Ning, 2023).

Este documento presenta una revisión narrativa de aplicaciones de las disciplinas ómicas en el área de las ciencias de los alimentos. Inicialmente, se describe el alcance de las disciplinas y subdisciplinas ómicas, se expone el análisis ómico y metodologías analíticas empleadas, y finalmente, se brindan ejemplos de aplicación.

Materiales y métodos

Para la estructuración de esta revisión, se realizó una búsqueda bibliográfica priorizando la literatura científica en el área de la ciencia ómica y su aplicación en las ciencias de los alimentos. Los artículos de interés, fueron seleccionados empleando un algoritmo de búsqueda, siguiendo la metodología propuesta por Campo & Ramirez Navas (2021), con algunas modificaciones (Figura 1).

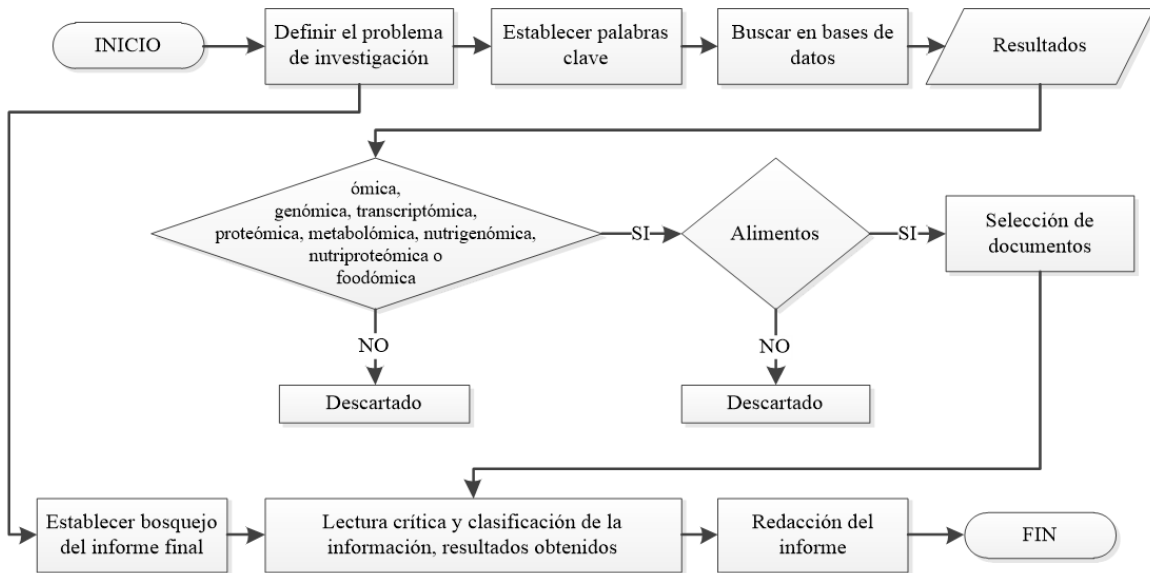
-Las palabras clave utilizadas fueron: ómica, genómica, transcriptómica, proteómica, metabolómica, nutrigenómica, nutripoteómica o (OR) foodómica, cada una de ellas enlazada (AND) a ciencia de los alimentos.

-Los criterios de selección establecidos fueron: 1) análisis ómico, y 2) alimentos. Para la búsqueda se empleó ScienceDirect, Wiley, Scopus, Francis Tyler y ACS, donde se encontraron artículos, libros y capítulos de libros, en un

rango de tiempo de 15 años. Posteriormente, se seleccionaron, recopilaron y clasificaron los estudios encontrados. Para la selección de los ejemplos de aplicación se eligieron los artículos más citados.

Figura 1

Algoritmo aplicado para la búsqueda bibliográfica.



Nota. Adaptado de "Antioxidant capacity in ice cream and dairy products" (p. 25) por Campo & Ramirez Navas (2021), *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 8 (1), 23-41

Resultados y Discusión

Ciencias ómicas

Las ciencias ómicas han revolucionado el campo de la investigación, principalmente en el área biomédica (Li & Ning, 2023). El término ómica se deriva del griego "ómos", que significa "todo" o "completo". Por lo tanto, el objetivo de las ciencias ómicas es estudiar los componentes moleculares

de los seres vivos en su totalidad, empleando un conjunto de disciplinas interconectadas. Entre las disciplinas ómicas se incluyen: la genómica, la transcriptómica, la proteómica y la metabolómica. Entre las subdisciplinas ómicas se tienen la nutrigenómica, la nutrigenética, la microbiómica, la epigenómica, la exposómica, entre otras. En la **Tabla 1**, se listan las principales disciplinas y subdisciplinas ómicas.

Tabla 1

Disciplinas Ómicas

Disciplina	Enfoque (Estudio de...)	Ejemplo de aplicación	Ref.
Genómica	... los genes	Secuenciación del genoma humano	(Lander <i>et al.</i> , 2001; Singh & Datta, 2018)
Transcriptómica	... los transcritos (ARN)	Identificación de genes expresados en un tejido específico	(Hubbard <i>et al.</i> , 2005; Puttamreddy <i>et al.</i> , 2008; Rajawat, 2018)
Proteómica	... las proteínas	Identificación de proteínas diferencialmente expresadas en enfermedades	(Lentsch, 2009; Vaz & Tanavde, 2018)

Disciplina	Enfoque (Estudio de...)	Ejemplo de aplicación	Ref.
Metabolómica	... los metabolitos	Identificación de biomarcadores para enfermedades	(Fiehn, 2002; Sengupta & Narad, 2018)
Volatilómica	... los metabolitos volátiles	Identificación y cuantificación de los compuestos volátiles responsables del aroma de los alimentos	(Medina <i>et al.</i> , 2020; Zhang <i>et al.</i> , 2023)
Nutrigenómica	... cómo los nutrientes afectan la expresión génica	Estudio de cómo la dieta afecta la expresión de genes relacionados con el cáncer	(Mutch <i>et al.</i> , 2005)
Nutriproteómica	... las proteínas en respuesta a la dieta	Identificación de proteínas que cambian en respuesta a una dieta alta en grasas	(Ganesh & Hettiarachchy, 2012; Sauer & Luge, 2015)
Foodómica	... los alimentos y su relación con la salud	Identificación de compuestos bioactivos en alimentos y su efecto en la salud	(Capozzi & Bordoni, 2012)
Microbiómica	... los microorganismos presentes en un ecosistema	Caracterización del microbioma intestinal humano	(Cho & Blaser, 2012; Paul <i>et al.</i> , 2018)
Epigenómica	... las modificaciones químicas en el ADN que afectan la expresión génica	Identificación de cambios epigenéticos en enfermedades crónicas	(Henikoff <i>et al.</i> , 2008)
Exposómica	... la exposición a factores ambientales y su impacto en la salud	Identificación de biomarcadores de exposición a contaminantes ambientales exposición a contaminantes ambientales	(Juarez <i>et al.</i> , 2020; Vineis <i>et al.</i> , 2017)

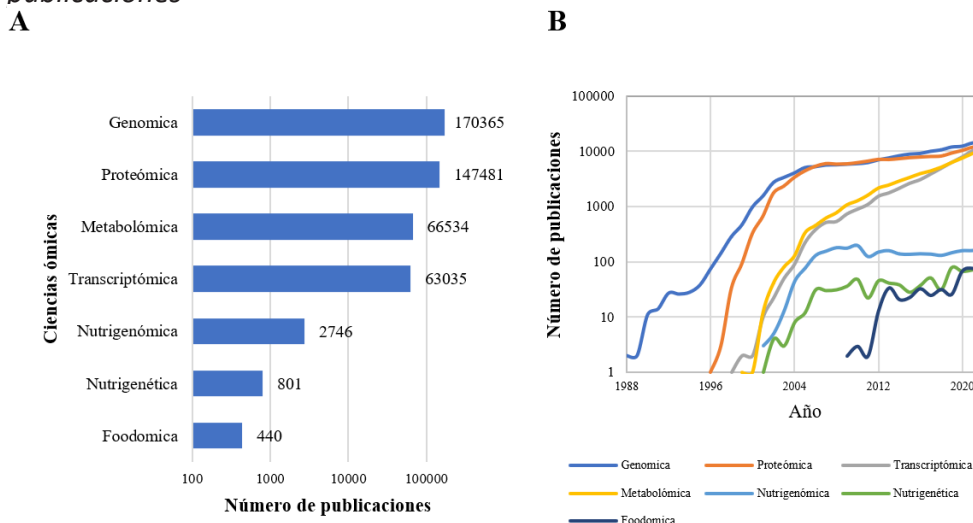
Nota. Elaboración propia

Realizando una exploración del estado actual de crecimiento de las publicaciones en cada una de estas disciplinas, se observa en la **Figura 2a**, que, a partir de 1988, se encuentran en constante crecimiento. En el caso de las disciplinas

más actuales (**Figura 2b**): nutrigenómica y nutrigenética y foodómica, las publicaciones científicas comenzaron luego del año 2000, evidenciando también un continuo aumento.

Figura 2

Estado actual de las publicaciones por disciplina y subdisciplina de las ciencias ómicas: a) número de publicaciones totales; b) tendencia de las publicaciones



Genómica

Esta rama de la biología molecular se encarga del estudio de los genomas. Estudia el conjunto completo de información genética (ADN) que posee un organismo en sus cromosomas, ya sean virus, bacterias, plantas o animales, incluyendo al ser humano. Abarca técnicas y herramientas que permiten la secuenciación, análisis, interpretación y comparación de los genomas de diferentes organismos, permitiendo una mejor comprensión de la estructura y función de los genes, la variabilidad genética entre individuos y poblaciones, y la relación entre la genética y la salud (Lander *et al.*, 2001). Ha tenido un gran impacto en la investigación biomédica, especialmente en la identificación de genes asociados a enfermedades, la predicción de riesgos y la personalización de tratamientos. También ha tenido aplicaciones en la agricultura, la biotecnología, la conservación de especies y la evolución (Guarnaccia *et al.*, 2014).

La genómica ha tenido importantes aplicaciones en la ciencia de los alimentos, en particular en la mejora de su calidad, la seguridad e innovación alimentaria. Las aplicaciones de la genómica en la ciencia de los alimentos incluyen: 1) Identificación precisa de especies y variedades de alimentos, lo que es importante para garantizar la autenticidad y calidad de los alimentos. 2) Identificar los genes responsables de las características deseadas en los alimentos como: el sabor, el aroma, la textura y el valor nutricional, lo que puede ser utilizado para seleccionar y mejorar las variedades de alimentos. 3) Identificar genes relacionados con la resistencia a los agentes patógenos y la tolerancia a los factores ambientales adversos, lo que puede mejorar la seguridad alimentaria. 4) Identificar nuevas fuentes de nutrientes, desarrollar alimentos funcionales y mejorar la eficiencia en la producción de alimentos (Roberts *et al.*, 2001).

Entre los trabajos más relevantes de esta disciplina en relación con la ciencia de los alimentos se encuentran: La secuenciación del

genoma del arroz (*Oryza sativa L. ssp. japonica*) (Goff *et al.*, 2002), que proporcionó información sobre la estructura y función de los genes del arroz. La secuenciación del genoma del tomate (Tomato Genome Consortium, 2012), donde se obtuvo información sobre la evolución de los frutos y se identificaron genes involucrados en la síntesis de compuestos que contribuyen al sabor y aroma en el fruto. La secuenciación del genoma de la mosca de la fruta (*Drosophila melanogaster*) (Adams *et al.*, 2000), que proporcionó información sobre la organización del genoma y la función de los genes de esta mosca. Y la secuenciación del genoma del pollo doméstico (International Chicken Genome Sequencing Consortium, 2004), que aportó información sobre la evolución y la biología del pollo, generando un considerable impacto en la economía de este clúster.

Transcriptómica

Se enfoca en el análisis de la transcripción de los genes. Estudia la síntesis de ARN mensajero (ARNm) a partir del ADN. También se encarga del análisis cuantitativo y cualitativo del ARNm en diferentes tejidos y condiciones, permitiendo identificar los genes que están activos en una determinada célula o tejido en un momento dado. El análisis de la transcriptómica se realiza a través de la secuenciación masiva de ARNm utilizando técnicas de secuenciación de nueva generación (NGS, por sus siglas en inglés), lo que permite obtener información sobre la abundancia relativa y la diversidad de los transcritos (Hubbard *et al.*, 2005; Puttamreddy *et al.*, 2008; Rajawat, 2018). Esto ha permitido una mejor comprensión de la regulación génica y la identificación de genes que están involucrados en enfermedades y otros procesos biológicos (Pedrotty *et al.*, 2012).

En la ciencia de los alimentos, la transcriptómica se ha utilizado para estudiar la expresión génica en diferentes tejidos y órganos de las plantas, animales y microorganismos utilizados en la producción de alimentos (Valdés *et al.*, 2013). Se ha utilizado para estudiar la

respuesta de los organismos a los factores ambientales, como el estrés térmico, la falta de nutrientes, entre otros (Cecchetto *et al.*, 2023). Se ha empleado en la identificación de los genes que están involucrados en la producción de compuestos bioactivos, como los antioxidantes y los péptidos bioactivos; y, en la producción de alimentos, como la leche, la carne y los cereales (Beaulieu, 2019; Bongiorno *et al.*, 2016; Dai *et al.*, 2018; Guo & Dalrymple, 2017). Ha servido para comprender los cambios en la expresión génica durante el desarrollo de la fruta (Zeng *et al.*, 2012) y la respuesta de cultivos al estrés térmico (Mangelsen *et al.*, 2011).

Proteómica

Esta rama de la biología molecular se enfoca en el estudio (cuantitativo y cualitativo) de todas las proteínas expresadas por un organismo, tejido o célula en particular. Esto implica la identificación de las proteínas presentes, su localización, su función y su nivel de expresión. La proteómica se basa en técnicas de separación de proteínas, como la electroforesis y la cromatografía, y en técnicas de análisis de espectrometría de masas, que permiten la identificación y cuantificación de proteínas (Govorun & Archakov, 2002).

La proteómica tiene importantes aplicaciones en la investigación biomédica y en la industria de la biotecnología (Govorun & Archakov, 2002; Mischak *et al.*, 2015). Su aplicación se enfoca principalmente, a la identificación de biomarcadores de enfermedades, para el descubrimiento de nuevos fármacos y terapias, así como la identificación de proteínas diana en enfermedades, sin descartar la optimización de procesos de producción de proteínas en la industria farmacéutica (Carrasco-Castilla *et al.*, 2012; Mischak *et al.*, 2015).

En la ciencia de los alimentos, la proteómica tiene una amplia gama de aplicaciones (Gallardo *et al.*, 2013), que incluyen: 1) La identificación de las proteínas presentes

en los alimentos, para evaluar su calidad y seguridad. Por ejemplo, puede utilizarse para detectar proteínas alergénicas en los alimentos y para identificar los alérgenos responsables de las reacciones alérgicas en los consumidores (Monaci & Visconti, 2009). También puede utilizarse para detectar contaminantes en los alimentos, como toxinas microbianas y residuos de plaguicidas (Qi & Li, 2010). 2) Identificación y caracterización de las proteínas que confieren propiedades funcionales a los alimentos, como la textura, el sabor y la estabilidad (Mora *et al.*, 2018). 3) Evaluación y optimización de los procesos de producción de alimentos, como la fermentación (Zhang *et al.*, 2021), el procesamiento térmico (Chen *et al.*, 2019) y la conservación (Afzaal *et al.*, 2022). 4) Identificación de las proteínas presentes en los alimentos que son importantes para la nutrición humana y para entender cómo se metabolizan en el cuerpo (Ganesh & Hettiarachchy, 2012). La proteómica ayuda a descifrar las vías de señalización y los procesos celulares a los que se dirigen los componentes bioactivos de los alimentos y proporciona claridad sobre los mecanismos funcionales y las moléculas intermedias involucradas (Srinivasan, 2020).

Metabolómica

Esta disciplina científica se dedica a la identificación y cuantificación de todos los metabolitos presentes en una muestra biológica, utilizando técnicas analíticas avanzadas como la espectrometría de masas y la resonancia magnética nuclear. La información obtenida a partir de estos análisis puede utilizarse para entender mejor los procesos biológicos y bioquímicos que ocurren en un organismo, y para identificar biomarcadores de enfermedades y trastornos metabólicos (Wishart, 2008).

La metabolómica tiene varias aplicaciones en la ciencia de los alimentos (Cevallos-Cevallos *et al.*, 2009), entre las cuales se destacan: 1) La identificación de biomarcadores específicos que pueden indicar la calidad y seguridad de

los alimentos. Por ejemplo, se han identificado metabolitos específicos en el aceite de oliva que indican su calidad y frescura (Cavaliere *et al.*, 2007). 2) Análisis de la composición de los alimentos y cómo esta varía en función de factores como el cultivo, la madurez, la manipulación y el almacenamiento. Su principal uso, está ligado a determinar la composición de los tomates en diferentes etapas de maduración (Hédiji *et al.*, 2010). 3) Identificación de los metabolitos bioactivos presentes en los alimentos, los cuales pueden tener efectos benéficos para la salud, como propiedades antioxidantes o antiinflamatorias (Safriani *et al.*, 2022; Xiong *et al.*, 2022). 4) Identificación de adulteraciones alimentarias o contaminaciones en los alimentos, mediante la detección de metabolitos anómalos o no esperados. En este sentido, se ha utilizado la metabolómica para detectar la presencia de aditivos ilegales en los alimentos (Cevallos-Cevallos *et al.*, 2009). La metabolómica también se utiliza para identificar los metabolitos que contribuyen a las características organolépticas de los alimentos, como el sabor y el aroma (Pavagadhi & Swarup, 2020).

Volatilómica

Es una disciplina ómica emergente que se enfoca en el análisis de los compuestos volátiles presentes en matrices biológicas y químicas (Berenguer *et al.*, 2022). Estos compuestos, también conocidos como metabolitos volátiles, son sustancias químicas que se evaporan fácilmente y se pueden detectar mediante técnicas analíticas especializadas, como la cromatografía de gases acoplada a la espectrometría de masas (GC - MS). El objetivo de la volatilómica es identificar y cuantificar estos compuestos volátiles para comprender su origen, su relación con el metabolismo y su posible aplicación en diferentes áreas del conocimiento (Lytou *et al.*, 2019). En la ciencia de los alimentos su principal objetivo es analizar compuestos volátiles presentes en los alimentos y su relación con el aroma, el sabor, la calidad y la autenticidad de los productos alimenticios. Es

una herramienta clave en el desarrollo de nuevos productos y en la comprensión de la ciencia sensorial de los alimentos (Noshad *et al.*, 2023).

Epigenética

El campo de estudio de esta subdisciplina se centra en el análisis y la comprensión de los cambios en la actividad génica que no están determinados por la secuencia de ADN, sino por modificaciones químicas en el genoma. Estas modificaciones, como la metilación del ADN y las modificaciones de las histonas, pueden influir en la expresión génica y desempeñar un papel crucial en diversos procesos biológicos y enfermedades (Bernal & Jirtle, 2010). La epigenómica ofrece una comprensión más profunda de cómo los factores ambientales y la dieta pueden influir en la expresión génica y la salud humana. Por ejemplo, se han realizado estudios que investigan cómo la dieta materna durante el embarazo puede afectar la metilación del ADN en los genes relacionados con el desarrollo fetal y la predisposición a enfermedades en la descendencia (Anderson *et al.*, 2018). La epigenómica también se utiliza para evaluar la calidad y autenticidad de los alimentos, ya que los patrones epigenéticos pueden servir como biomarcadores útiles.

Nutrigenómica

Esta disciplina deriva de la genómica, y estudia los efectos de la dieta y los nutrientes en la expresión de los genes y cómo esta interacción puede influir en los procesos de salud -enfermedad (Neeha & Kinth, 2012). La nutrigenómica busca comprender cómo las variaciones en la dieta pueden afectar y predisponer la presencia de ciertas enfermedades y cómo se pueden utilizar los nutrientes para prevenir, tratar o incluso revertir algunas enfermedades crónicas. Al analizar la relación entre la nutrición y la genética, la nutrigenómica puede ayudar a identificar biomarcadores de riesgo, a diseñar dietas personalizadas y a mejorar la prevención y el tratamiento de enfermedades relacionadas con la nutrición (Kusmann & Fay, 2008; Müller

& Kersten, 2003). Además, la nutrigenómica comprende el impacto de la dieta en el microbioma del cuerpo humano, influenciando el funcionamiento del sistema inmune con un efecto directo en la salud humana (Mathers, 2016).

Esta disciplina apoya a la foodómica al abordar el impacto de nutrientes o dietas específicas en la expresión génica. Al igual que con otras subdisciplinas ómicas, los avances en nutrigenómica dependen de enfoques analíticos para estudiar la interrelación de la bioactividad y los alimentos (García-Cañas *et al.*, 2010).

Algunas de las aplicaciones específicas de la nutrigenómica en la ciencia de los alimentos incluyen: 1) Desarrollo de alimentos personalizados, ayudando a identificar las necesidades nutricionales y los requerimientos de cada individuo en función de su perfil genético único. En consecuencia, se pueden diseñar alimentos personalizados que proporcionen los nutrientes necesarios y se ajusten a las necesidades individuales (Kusmann & Fay, 2008). 2) Desarrollo de alimentos funcionales, ayudando a identificar compuestos bioactivos presentes en los alimentos que pueden tener efectos benéficos sobre la expresión génica y la salud. Por ejemplo, se han identificado compuestos en ciertos alimentos, como el té verde y la cúrcuma, que pueden tener efectos antiinflamatorios y antioxidantes (Adetunji *et al.*, 2023; Odoh *et al.*, 2023). 3) Prevención y tratamiento de enfermedades, ayudando a identificar biomarcadores de riesgo genético para ciertas enfermedades y su relación con la nutrición (Chua-Lim *et al.*, 2023).

Nutrigenética

Esta rama de la nutrición se enfoca en el estudio de cómo la variabilidad genética de los individuos puede influir en su respuesta a los nutrientes y en su riesgo de enfermedades relacionadas con la nutrición. Junto a las subdisciplinas ómicas estudian cómo los genes afectan la forma en

que el cuerpo procesa y utiliza los nutrientes, en otras palabras, la respuesta del cuerpo a un nutriente (Mutch *et al.*, 2005). Considera que cada individuo tiene un perfil genético único que puede influir en su capacidad para absorber, metabolizar y utilizar ciertos nutrientes.

La nutrigenética tiene importantes aplicaciones en la ciencia de los alimentos, algunas de éstas incluyen: 1) Identificación de alimentos y nutrientes adecuados para cada persona según su perfil genético único (Dieta personalizada) (Kusmann & Fay, 2008; Yang, 2023). Por ejemplo, si se identifica una variante genética que aumenta el riesgo de deficiencia de vitamina D (Aji *et al.*, 2022; Alathari *et al.*, 2021) u otros micronutrientes (Yang, 2023), se puede recomendar una dieta rica en alimentos que contenga estos nutrientes o un suplemento para prevenir la deficiencia. 2) Identificación de individuos propensos a desarrollar enfermedades relacionadas con la nutrición, como la diabetes y las enfermedades cardiovasculares (Alsulami *et al.*, 2020; Desjardins & Vohl, 2023; Perez-Diaz-del-Campo *et al.*, 2023). 3) Identificación de biomarcadores genéticos que se relacionan con la respuesta individual a ciertos nutrientes o alimentos (Zheng *et al.*, 2023). Por ejemplo, se encontró que en poblaciones con alto consumo de almidón hay mayor número de copias del gen AMY1 que codifica para la amilasa salival, derivando en una mayor expresión de amilasa y mayor concentración sérica de la enzima (Perry *et al.*, 2007).

Nutriproteómica

Estudia la interacción entre los nutrientes y la traducción, expresión y modificación post-traducciona de las proteínas, caracterizando y cuantificando todo proteoma humano relacionado a la nutrición. La nutriproteómica, en conjunto con la nutrigenómica, se han empleado como herramienta en la medicina personalizada para comprender la expresión génica como respuesta a la dieta y los productos de dicha expresión (Bragazzi, 2013; Ozdemir *et al.*, 2010).

Como subdisciplina ómica, la nutripoteómica trabaja en conjunto con las ciencias de los alimentos para: 1) Caracterizar y cuantificar biomarcadores, producto del consumo de alimentos (Kusmann, 2010). 2) Evaluar la respuesta inmune de cada individuo al consumo de determinado nutriente, así como la salud digestiva, la inflamación, las alergias, entre otras. Por ejemplo, la respuesta intestinal a nivel proteómico, al consumo de glutamina, en condición basal y de inflamación (Deniel *et al.*, 2007). 3) Desarrollar alimentos personalizados basados en ingredientes funcionales que contribuyan a mejorar el perfil de biomarcadores biológicos en los seres humanos (Kusmann, 2010). Un ejemplo de esta mejora, es el consumo de alimentos que contienen EPA y DHA, que ayudan a reducir la permeabilidad mediada por un incremento de IL4, una glicoproteína que actúa como antiinflamatorio (De Santis *et al.*, 2015).

Foodómica

El término "foodómica" se acuñó por primera vez en 2009 en el prefacio titulado "*Food analysis and Foodomics*" publicado en el *Journal of Chromatography A* por el profesor Alejandro Cifuentes (Investigador del CSIC y director del Laboratorio de Alimentómica) (Cifuentes, 2009). La foodómica se refiere a la aplicación del análisis ómico para el estudio de los alimentos y la nutrición (García-Cañas *et al.*, 2012). En otras palabras, se podría decir que es la integración de todas las disciplinas y subdisciplinas ómicas que son relevantes para los alimentos y las matrices alimentarias.

Esta disciplina científica tiene como objetivo comprender los procesos moleculares involucrados en la producción de alimentos, su transformación y su impacto en el cuerpo humano, así como también el desarrollo de herramientas (app, etiquetas y empaques, entre otras) para mejorar la calidad y la seguridad alimentaria (Cifuentes & Ibáñez, 2022; Valdés,

Álvarez-Rivera, *et al.*, 2021). Esto incluye el estudio de la variabilidad genética de las plantas y animales utilizados para la producción de alimentos, el análisis de los componentes nutricionales y no nutricionales y el seguimiento de las respuestas del cuerpo humano a la ingesta de diferentes tipos de alimentos. Esta aplicación relativamente nueva de la ómica ya ha impactado en varias líneas de la ciencia de los alimentos, incluida la mejora del contenido de nutrientes en las plantas para combatir problemas de salud (León *et al.*, 2018; Srinivasan, 2020; Valdés *et al.*, 2017).

A futuro se espera que la Foodómica siga creciendo y evolucionando en áreas claves, como: 1) Aplicación de la Foodómica en la industria para mejorar la calidad y la seguridad alimentaria, así como para desarrollar productos innovadores saludables. 2) Uso de la Foodómica en la agricultura ayudando a mejorar la calidad de los cultivos, la identificación de los componentes moleculares de los alimentos, y el estudio de su impacto en la salud y el bienestar. 3) Mayor integración de datos ómicos de diferentes fuentes y tecnologías, como la genómica, la proteómica, la metabolómica y la transcriptómica con los alimentos. 4) Desarrollo de herramientas de análisis de datos más avanzadas: a medida que la cantidad de datos de Foodómica aumenta, se espera contar con herramientas de análisis más robustas para analizar y visualizar grandes conjuntos de datos de manera más efectiva y eficiente.

Análisis ómico

El análisis ómico es un enfoque de la biología molecular utilizado para estudiar de manera integral la expresión, función y regulación de los componentes moleculares de un organismo o una muestra biológica, con el fin de identificar biomarcadores útiles en el diagnóstico de enfermedades o evaluar la eficacia de un tratamiento (Tang *et al.*, 2023). Este enfoque combina técnicas de análisis de

alto rendimiento para obtener información detallada (identificación y cuantificación) sobre los componentes moleculares (ADN, ARN, proteínas, metabolitos, entre otros).

En el caso de la ciencia de los alimentos, se ha empleado el análisis ómico para analizar los componentes en un nivel molecular y sistémico (Benkeblia, 2012). El análisis ómico puede ser útil en la identificación de alérgenos alimentarios y la prevención de reacciones alérgicas en personas sensibles; así como de alimentos que contienen compuestos bioactivos que poseen propiedades benéficas para la salud. En este contexto, algunos alimentos pueden contener antioxidantes que pueden prevenir el daño celular y reducir el riesgo de enfermedades crónicas como la diabetes, enfermedades cardiovasculares, el cáncer, entre otras. Este es el caso de la curcumina, un compuesto bioactivo conocido por su propiedad antioxidante que se encuentra en la cúrcuma. Los estudios ómicos y clínicos indican que este compuesto puede ser efectivo en la prevención y el tratamiento del cáncer, actuando en diferentes moléculas diana (Kocaadam & Şanlier, 2015).

El análisis ómico de alimentos es un proceso complejo que implica múltiples pasos. Y de forma resumida se describe a través de la siguiente secuencia: 1) diseño del experimento (DoE). 2) Selección de la muestra. 3) Extracción de los componentes (proteínas, metabolitos, ácidos nucleicos u otros componentes). 4) Preparación de las muestras (purificación, concentración o derivatización de las muestras). 5) Análisis de las muestras (LC-MS, NMR o GC-MS, secuenciación de ADN o ARN, cromatografía de afinidad u otras técnicas o un enfoque multiplataforma para maximizar la cobertura de componentes). 6) Extracción y tratamiento del conjunto de datos. 7) Análisis estadístico de datos. 8) Identificación de componentes clave o discriminatorios; Y, 9) Interpretación de los resultados. La adquisición y recuperación de datos se puede lograr mediante un análisis dirigido cuando se analizan moléculas

específicas o mediante un enfoque basado en hipótesis (análisis no dirigido). Ambos tienen ventajas y desventajas, y el enfoque adoptado depende en última instancia del estudio en cuestión (Sébédio & Malpuech-Brugère, 2022).

Para el análisis ómico se requiere de la participación de diferentes métodos analíticos y de análisis de datos. A continuación, se describen brevemente algunos de ellos.

Métodos instrumentales de análisis (MIA)

Existen diversas formas de agrupar los MIA. El primer grupo de MIA se basa en la interacción de fotones de radiación electromagnética con la materia, a estas técnicas se las denomina espectroscópicas. Estas a su vez, se subdividen en dos grupos: las técnicas que implican transferencia de energía entre el fotón y la muestra; y las técnicas donde la radiación electromagnética sufre un cambio de amplitud, ángulo de fase, dirección de propagación o polarización como resultado de su refracción, reflexión, dispersión, difracción o dispersión por la muestra.

Entre las técnicas espectroscópicas están: la espectroscopía infrarroja, la espectroscopía raman, la resonancia magnética nuclear, Difracción de rayos X, entre otras. El segundo grupo de MIA (técnicas electroquímicas interfaciales) se basa en la medición de carga, corriente o potencial en la superficie de un electrodo, a veces mientras se controla una o ambas de las otras dos variables, y en algún momento mientras se agita la solución. El tercer grupo de MIA reúne una variedad de otras mediciones que pueden proporcionar una señal analítica útil; por ejemplo: análisis térmico diferencial, calorimetría diferencial de barrido, espectrometría de masas, entre otras. El cuarto y último grupo de MIA se utilizan para separar mezclas basadas en el reparto de equilibrio de especies entre dos fases o la migración de especies en respuesta a un

campo eléctrico aplicado. Entre las técnicas están: cromatografía de gases, cromatografía líquida, electroforesis, entre otras. En síntesis, estos MIA se emplean para separar, analizar, identificar y/o cuantificar los componentes de una muestra. A continuación, se describen brevemente algunas técnicas, cabe aclarar que existen textos especializados donde se puede consultar detalladamente la información sobre cada una de las técnicas listadas y no listadas, pero que se aplican en las ciencias ómicas (Gallo & Ferranti, 2016; Hyötyläinen & Wiedmer, 2013; Robinson *et al.*, 2021).

Cromatografía de gas (GC)

Se basa en la distribución de los componentes entre una fase móvil gaseosa y una fase estacionaria sólida o líquida. La separación se produce debido a las diferencias en las propiedades físicas y químicas de los componentes en la muestra. En la GC, la muestra se introduce en la columna de cromatografía de gas, que contiene la fase estacionaria. La fase móvil, que suele ser un gas inerte como el nitrógeno o el helio, se hace pasar por la columna, arrastrando los componentes de la muestra a través de la fase estacionaria. A medida que los componentes pasan por la columna, se separan según su afinidad por la fase estacionaria (Robinson *et al.*, 2021). La GC se utiliza en foodómica para analizar los componentes volátiles de los alimentos y bebidas, así como para determinar la presencia y concentración de metabolitos específicos, como ácidos grasos, aminoácidos y vitaminas. También se utiliza para el análisis de residuos de plaguicidas y otros contaminantes en los alimentos (Peng *et al.*, 2022; Stilo *et al.*, 2021; Wachsmuth *et al.*, 2013).

Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC)

El principio básico de la HPLC es la separación de los componentes de una muestra, en función de su interacción con una fase estacionaria y una fase móvil. La muestra se inyecta en una

columna empacada con partículas estacionarias y se separa a medida que se mueve a través de la columna con la ayuda de la fase móvil. Existen diferentes tipos de HPLC que utilizan diferentes modos de separación, como la cromatografía de fase inversa, la cromatografía de interacción hidrofóbica, la cromatografía de interacción iónica, entre otras. La HPLC se puede acoplar a una variedad de detectores, como el espectrómetro de masas, el detector de UV y el detector de fluorescencia, lo que permite una mayor especificidad y sensibilidad en la detección y cuantificación de los componentes de la muestra (Robinson *et al.*, 2021). En cuanto a su aplicación en foodómica, la HPLC se utiliza ampliamente para analizar y caracterizar los aminoácidos, los péptidos, los lípidos, carbohidratos y demás componentes de los alimentos. La HPLC también se utiliza para detectar y cuantificar contaminantes, como plaguicidas y metales pesados, en los alimentos (Peng *et al.*, 2022; Theodoridis *et al.*, 2013).

Espectrometría de masas (MS)

Esta técnica se basa en la separación de iones gaseosos en campos eléctricos y magnéticos de acuerdo con sus relaciones masa-carga. Para realizar la MS, primero se debe ionizar la muestra, lo que la transforma en iones cargados eléctricamente. Luego, los iones se aceleran y se someten a campos eléctricos y magnéticos que los separan según su relación masa-carga. Los iones separados se detectan y se registran como un espectro de masa. La MS se puede acoplar a una variedad de detectores, y la selección depende del tipo de análisis que se pretenda realizar. Por ejemplo, si se requiere un análisis global del perfil metabólico es necesario el uso de espectrometría de masas de alta resolución HRAM (*high-resolution accurate mass determination*), junto con el análisis de masa en tándem para la caracterización estructural. Esta metodología de alta resolución permite además determinar las proporciones isotópicas de los componentes desconocidos. Sin embargo, para un análisis dirigido es más utilizado un

sistema de MS con un sistema de cuadrupolo, como lo son el uso de un triple cuadrupolo para cromatografía líquida o de cuadrupolo simple para cromatografía de gases. Los tipos de analizadores más comunes en espectrometría de masas son: 1) cuadrupolo simple (Single quadrupole) el cual es de baja resolución y comprende de cuatro varillas paralelas en el que cada par opuesto están conectados eléctricamente, y al seleccionar una determinada masa, estas tendrán una amplitud inferior a la del radio de los cuadrupolos atravesando el analizador, mientras que los demás iones se perderán por colisiones con las varillas. 2) QqQ o triple cuadrupolo. Q1 y Q3 están separados por un cuadrupolo Q2 el cual funciona como una celda de colisión. En este sistema se pueden realizar experimentos de MS/MS, incluyendo así el escaneo de los iones de los productos, la detección de las pérdidas neutras y el monitoreo de reacciones. 3) Ión-trap, el cual comprende un anillo y dos electrodos que mantienen los iones en órbitas oscilatorias estables, siendo la detección la desestabilización de esas orbitas que expulsan los iones al detector. 4) Orbitrap, en el cual los iones orbitan en un electrodo central en direcciones axiales y radiales, a través de un equilibrio de fuerzas electrostáticas y centrífugas entre unos electrodos externos y se utiliza la transformada de Fourier para tener la relación de tiempo a frecuencia. 5) TOF, este mide el tiempo de vuelo del ion desde la fuente hasta el detector en el vacío, el cual depende de la relación masa/carga, detectándose así las masas más bajas primero (Pöhö & Hyötyläinen, 2013; Robinson *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2019).

En el campo de la foodómica, la MS se ha utilizado en la caracterización de proteínas y metabolitos en alimentos y en la detección de contaminantes y alérgenos alimentarios. Su principal uso, radica en la identificación de contaminantes en alimentos, como plaguicidas y metales pesados, así como en la identificación de alérgenos en alimentos, como el gluten en productos de trigo (Colgrave *et al.*, 2014).

Electromigración capilar (CE)

La (CE), es una técnica de separación de moléculas basada en su carga eléctrica y tamaño. En la CE, las moléculas se mueven a través de un capilar estrecho bajo la influencia de un campo eléctrico, separándose según su movilidad electroforética. Para llevar a cabo la Electromigración Capilar, se llena el capilar con un electrolito y se aplica un voltaje a través de este. La muestra se inyecta en un extremo del capilar y se arrastra hacia el otro extremo a través de la migración electroforética. La separación de las moléculas en la muestra se logra debido a las diferencias en su carga y tamaño, lo que produce distintos tiempos de migración. La CE se ha utilizado en la caracterización de componentes alimentarios, como proteínas, aminoácidos, carbohidratos y ácidos grasos. Su mayor aplicación radica en la identificación y cuantificación de péptidos bioactivos en diferentes alimentos y bebidas, así como también para el análisis de aminoácidos en proteínas alimentarias. Además, la CE se ha utilizado para la determinación de la composición de ácidos grasos en aceites y grasas alimentarias (Amorim & de Oliveira, 2020; Štěpánová & Kašička, 2022; Valdés, Álvarez-Rivera, *et al.*, 2021).

Resonancia magnética nuclear (RMN)

La resonancia magnética nuclear es una técnica que se utiliza comúnmente para elucidar estructuras moleculares utilizando la detección de los núcleos atómicos cuando son sometidos en un campo magnético. Una condición para la detección de estos núcleos es que su momento magnético debe ser diferente de cero, siendo los más utilizados en química orgánica el ^1H , ^{13}C , ^{31}P , ^{19}F y ^{15}N (Zhan, 2021).

En el análisis de las ciencias ómicas, la resonancia magnética nuclear cuenta con diversas ventajas, al compararse con metodologías más comunes como la espectrometría de masas, entre ellas la alta repetibilidad, las pocas cantidades de muestra,

la capacidad de analizar metabolitos polares y no polares, volátiles o no, siendo además una técnica no destructiva. Sin embargo, su desventaja principal al comparar con MS es su baja sensibilidad y resolución. Esto implica que no es muy utilizada para detectar metabolitos que se encuentren en bajas cantidades (Zhan, 2021).

En foodómica ha sido utilizada la técnica de resonancia magnética nuclear por ejemplo en la comparación del café colombiano con el café de países vecinos como lo son Brasil y Perú. La etiqueta referente a “100 % Café Colombiano” representa un plus para los productores y es un certificado de calidad. Utilizando RMN fue posible identificar el origen del café, así como las condiciones ambientales y las técnicas agrícolas (Medina *et al.*, 2017).

PMF, peptide mass fingerprinting

PMF es una técnica analítica utilizada para la identificación de proteínas en muestras biológicas. PMF se basa en la medición de la masa de péptidos generados a partir de la digestión enzimática de proteínas, lo que permite la identificación de proteínas en la muestra. Esta técnica ha sido ampliamente utilizada en la proteómica para la identificación de proteínas desconocidas. En general, la PMF se lleva a cabo mediante la digestión de proteínas con una enzima proteolítica, como la tripsina. Los péptidos resultantes se separan mediante cromatografía líquida y se someten a análisis de espectrometría de masas. La identificación de proteínas se realiza comparando los espectros de masa de los péptidos detectados con las bases de datos de proteínas. En el ámbito de la foodómica, la PMF se ha utilizado para la identificación de proteínas en alimentos y en la evaluación de su calidad. Un estudio reciente utilizó la PMF para identificar proteínas en diferentes variedades de trigo y evaluó la relación entre la composición proteica y la calidad del pan producido a partir de estas variedades. Otro estudio utilizó la PMF

para identificar proteínas en vinos y evaluar la influencia de diferentes prácticas enológicas en la composición proteica del vino.

Análisis de datos

Finalmente, uno de los pasos cruciales en las ciencias ómicas es el procesamiento de datos. Esto implica partir de archivos e instrumentos sin procesar, hasta logar la producción de una matriz de datos que se puede utilizar para analizar los mismos y con esto proporcionar no solo la identificación de los metabolitos presentes en una muestra compleja sino también la explicación de como los grupos de moléculas pueden afectar o no un estímulo externo.

Librerías espectrales

Las bibliotecas espectrales permiten la desreplicación y la identificación de los espectros utilizando redes moleculares. Plataformas como lo son el GNPS (Global Natural Products Social Molecular Networking) recopila las bibliotecas espectrales de MS/MS en productos naturales (Mingxun Wang, 2016). El GNPS es una plataforma de análisis que reúne tanto espectros de referencia recién adquiridos como también la biblioteca colaborativa por toda la comunidad científica, incluyendo productos naturales como también compuestos con diversas actividades biológicas.

Para la identificación de metabolitos especializados utilizando metabolómica por espectrometría de masas se pueden usar colecciones de referencia como: 1) MassBank, tienen bases de datos diferenciadas para Europa, Norte América y Japón, siendo esta última la primera base de datos pública a gran escala. 2) ReSpec, presenta gran cantidad de espectros de metabolitos en plantas. 3) HMDB, es una biblioteca pública para metabolitos en humanos. 4) XCMS/Metlin, usado para metabolómica, aunque no es una biblioteca comercial y no está disponible para redistribución pública.

5) MzCloud, es un motor de búsqueda para metabolómica y su biblioteca no está disponible para descargar.

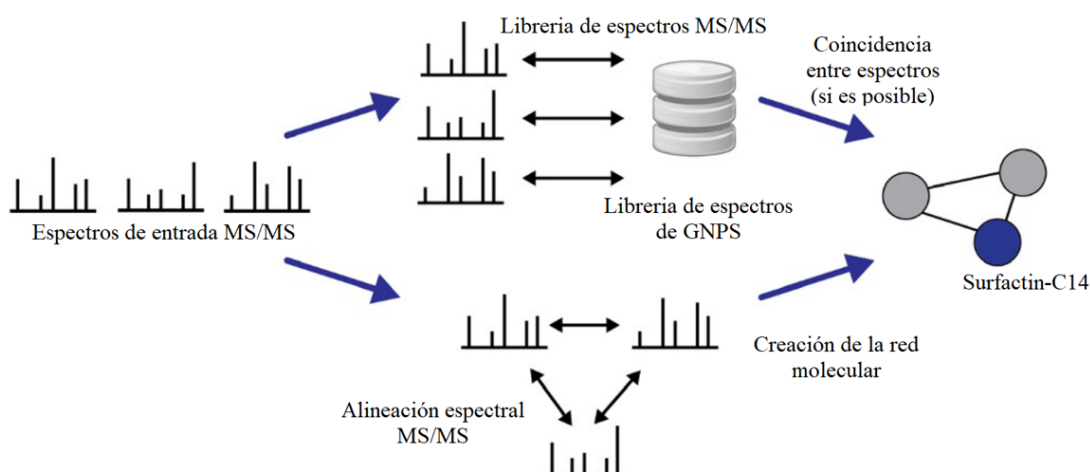
Redes moleculares

Para la interpretación de los datos de espectros de masas se utilizan comúnmente las redes moleculares, las cuales se generan a partir de la alineación entre espectros (Figura 3). Con el fin

de correlacionar metabolitos específicos que se encuentren en diferentes muestras o variando procedimientos, se determinan las similitudes entre dos espectros con puntuaciones que van desde 0 (totalmente diferente) a 1 (completamente idéntico). Estos espectros también se buscan en las bibliotecas de espectros de GNPS, lo que genera coincidencias de nodos en las redes moleculares.

Figura 3

Creación de las redes moleculares



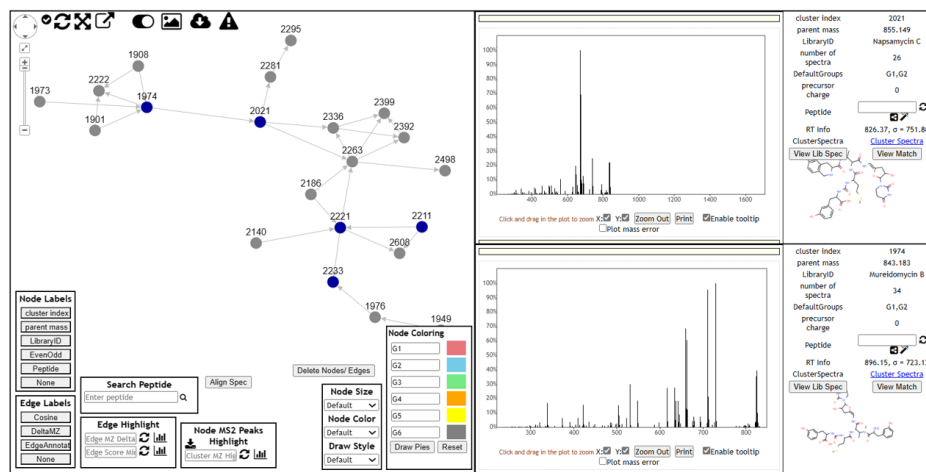
Nota. Adaptado de “Sharing and community curation of mass spectrometry data with Global Natural Products Social Molecular Networking” (p. 29), por Mingxun Wang (2016), *Nature biotechnology*, 34, 828 – 837.

Estas redes pueden observarse en línea en el navegador (Figura 4) y pueden exportarse en

softwares de visualización como por ejemplo Cytoscape (Paul Shannon, 2003).

Figura 4

Visualización de las redes moleculares utilizando GNPS



El uso del navegador para visualizar las redes permite que la interactividad entre los usuarios sin el uso de ningún software externo, en donde se pueden definir los datos de entrada y los nodos en la red se representan como una torta donde puede contener diferentes colores dependiendo a los grupos ingresados. En el panel de la derecha de la **Figura 4** se presentan los espectros de determinado nodo al hacer clic en el nodo de interés.

Análisis estadístico multivariante

La mayoría de los estudios ómicos opera a través de un conjunto de datos altamente complejo que necesita el uso de métodos matemáticos y estadísticos para extraer la información (Zhang & Wang, 2022). Hay diversas formas de análisis estadístico multivariado, sin embargo, en alimentos comúnmente se analizan todos los metabolitos de manera exploratoria (análisis no supervisado). Este tipo de análisis se realiza para determinar si los componentes tienen alguna agrupación dentro de todo el conjunto de datos, con el fin de realizar una separación entre grupos o moléculas químicas como los flavonoides, de las antocianinas, entre otros compuestos fenólicos. Se utiliza mayoritariamente el análisis de componentes principales PCA (*Principal Component Analysis*). El PCA es un procedimiento matemático que evalúa la diferenciación estadística entre los grupos, siendo uno de los principales métodos utilizados en quimiometría haciendo que sea posible extraer y mostrar la variación sistemática de los datos, encontrando agrupaciones, tendencias y valores atípicos. Por lo tanto, los métodos basados en proyección representan una base sólida para la metabolómica (Trygg *et al.*, 2007).

Aplicaciones.

Frutas y verduras

Entre una gran lista de actúales, las diferentes técnicas de análisis ómico han permitido 1) identificar compuestos bioactivos como los

polifenoles, los carotenoides y las vitaminas y su potencial antioxidante, corroborando que las frutas y las verduras son mezclas complejas de moléculas hidrosolubles y liposolubles. 2) mejorar procesos de conservación de la agrobiodiversidad como base de la adaptación futura (Manganaris *et al.*, 2018), y 3) evidenciar los efectos benéficos de los polifenoles en la salud humana, actuando principalmente como antiinflamatorio, antitumoral y como regulador de la microbiota intestinal (Si *et al.*, 2021).

Cereales, raíces y tubérculos

Las ciencias ómicas han propiciado el análisis de los perfiles metabólicos, presentes en raíces y tubérculos de especies como: la arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*), papa Asterix (*Solanum tuberosum* cv. Asterix), yuca (*Manihot esculenta*), papa (*Solanum tuberosum*), batata (*Ipomoea batatas*), papa china (*Colocasia esculenta*), y ñame (*Dioscorea* sp.), empleando la Resonancia Magnética Nuclear (NMR), logrando la identificación de ocho metabolitos principales: colina, γ -aminobutyrato (GABA), glutamina, asparagina, isoleucina, fructosa, glucosa y sacarosa (Do Prado Aparecido *et al.*, 2022). Esta caracterización es útil para el desarrollo de nuevas variedades más resistentes a las plagas o el perfeccionamiento de las sustancias presentes en estos alimentos, como beneficio para la salud. En este sentido, la nutrigenómica es una herramienta útil para conocer el efecto del consumo de colina en la expresión de los genes. Este aminoácido presente en las raíces y los tubérculos, funciona como mecanismo epigenético metilando el ADN y las histonas, siendo un factor protector para cáncer de hígado, obesidad y diabetes (Brunaud *et al.*, 2003; Zeisel, 2017).

Lácteos

En el caso de los lácteos, con el análisis ómico se han identificado proteínas, lípidos, carbohidratos y compuestos bioactivos que contribuyen a su sabor, textura, aroma y

valor nutricional. Además, el análisis ómico también ha permitido identificar los factores que influyen en la calidad y la seguridad de los productos lácteos, como la presencia de patógenos y la detección de alérgenos (Zhu *et al.*, 2022). En particular, la aplicación de la proteómica en la foodómica ha permitido el análisis de la composición proteica de la leche y sus productos derivados, lo que ha llevado a la identificación de proteínas bioactivas que tienen propiedades antimicrobianas, antioxidantes e inmunomoduladoras, así como la detección de proteínas alergénicas (Agregán *et al.*, 2021).

Cárnicos

En las ciencias ómicas particularmente la proteómica, ha sido una herramienta útil para la evaluación de la biodisponibilidad de los aminoácidos presentes en los alimentos cárnicos. Por ejemplo, en un estudio proteómico de la bresaola, un embutido a base de carne de res se obtuvo que, desde la fase inicial de digestión estomacal, la concentración proteica era menor que en la muestra sin digerir. Este descenso en la concentración se otorgó a la acción mecánica de la masticación, así como la reducción de la concentración proteica en las siguientes fases a la acción de la pepsina, una enzima clave en la digestión gástrica; y los cambios en el pH gástrico y duodenal (Bordoni *et al.*, 2014).

Bebidas

El análisis ómico estudiando las bebidas fermentativas, se ha focalizado en la identificación de los polifenoles presentes en el vino tinto, esto para determinar su influencia en la salud a nivel cardiovascular. Los resultados más destacados señalan que algunos compuestos, como el resveratrol, están asociados con una mayor actividad antioxidante y una reducción del colesterol LDL, favoreciendo la salud cardiovascular (He *et al.*, 2012a, 2012b; Vázquez-Fresno *et al.*, 2016). En cuanto a su aplicación, cabe destacar el análisis metabolómico de la kombucha, logrando identificarse diferentes

metabolitos presentes, como polifenoles, péptidos y ácidos grasos. Estos productos son el resultado de los procesos metabólicos llevados a cabo por levaduras y bacterias que componen el SCOBY, que es la colonia simbiótica, materia prima de la kombucha (Tran *et al.*, 2022).

Grasas y aceites

En la identificación de componentes fenólicos y su relación con la calidad del aceite de oliva se han empleado las disciplinas ómicas. En las investigaciones realizadas se ha encontrado que los compuestos fenólicos del aceite de oliva, especialmente el hidroxitirosol y el tirosol, están relacionados con la calidad del aceite y su estabilidad oxidativa. Además, se ha demostrado que la concentración de estos compuestos fenólicos está influenciada por factores como la variedad de la aceituna, el momento de la cosecha y la región de cultivo (Ballus *et al.*, 2011; Boussahel *et al.*, 2020; Godoy-Caballero *et al.*, 2012; Kalogiouri *et al.*, 2020; Lioupi *et al.*, 2020).

Alimentos procesados

En el caso de fórmulas infantiles, se ha empleado el análisis ómico en la evaluación analítica de contaminaciones excesivas inesperadas, problema generalizado de la seguridad alimentaria. La foodómica basada en técnicas de metabolómica proporciona herramientas poderosas para la detección de casos de manipulación con contaminaciones intencionales. En este estudio, los investigadores analizaron una gran cantidad de señales moleculares sin procesar de la fórmula infantil empleando cromatografía líquida con espectrometría de masas (LC - MS) y resonancia magnética nuclear (NMR), y procesaron y analizaron los datos empleando análisis de componentes principales (PCA). Mediante PCA lograron trazar las tendencias de las firmas visualizadas en los lotes de datos de señales complejas de cada exceso de contaminación con sustancias químicas detectables por LC-MS y NMR (Inoue *et al.*, 2016).

Conclusiones

La presente revisión, detalla las disciplinas ómicas y algunas aplicaciones metodológicas, para trabajar de forma transversal en productos novedosos con impacto positivo en la salud de los consumidores. En este sentido, la foodómica se apalanca del estudio genómico, apoyándose en la transcriptómica, proteómica y metabolómica como herramientas que describen el ARNm específico de un tejido en un momento específico, las proteínas expresadas de un organismo en particular; y los metabolitos producidos por los procesos bioquímicos que ocurren en una muestra biológica. También, se relaciona con la nutrigenética, la nutrigenómica y la nutriproteómica, que interaccionan las variables genéticas propias de cada individuo, la expresión génica y las proteínas resultantes de los procesos de alimentación – nutrición. La sensibilidad y la precisión de estos métodos son superiores a los procedimientos analíticos estándares utilizados anteriormente y los nuevos métodos son adecuados para abordar una serie de requisitos novedosos que plantea el sector de producción de alimentos y el mercado mundial de alimentos.

Referencias

- Adams, M. D., Celniker, S. E., Holt, R. A., Evans, C. A., Gocayne, J. D., Amanatides, P. G., ..., Venter, J. C. (2000). The Genome Sequence of *Drosophila melanogaster*. *Science*, 287 (5461), 2185–2195. <https://doi.org/10.1126/science.287.5461.2185>
- Adetunji, C. O., Olaniyan, O. T., Rebezov, M., Shariati, M. A., Ijabadeniyi, O. A., Ajayi, O. O., ..., Odoh, U. E. (2023). Roles of nutrigenomics in drug discovery and development. In *Role of Nutrigenomics in Modern-day Healthcare and Drug Discovery* (pp. 277–299). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-824412-8.00016-3>
- Afzaal, M., Saeed, F., Hussain, M., Shahid, F., Siddeeq, A., & Al-Farga, A. (2022). Proteomics as a promising biomarker in food authentication, quality and safety: A review. *Food Science & Nutrition*, 10 (7), 2333–2346. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2842>
- Agregán, R., Echegaray, N., Nawaz, A., Hano, C., Gohari, G., Pateiro, M., & Lorenzo, J. M. (2021). Foodomic-Based Approach for the Control and Quality Improvement of Dairy Products. *Metabolites*, 11 (12). <https://doi.org/10.3390/metabo11120818>
- Aji, A. S., Lipoeto, N. I., Yusrawati, Y., Malik, S. G., Kusmayanti, N. A., Susanto, I., ..., Vimalaswaran, K. S. (2022). Impact of maternal dietary carbohydrate intake and vitamin D-related genetic risk score on birth length: the Vitamin D Pregnant Mother (VDPM) cohort study. *BMC Pregnancy and Childbirth*, 22 (1). <https://doi.org/10.1186/s12884-022-05020-3>
- Alathari, B. E., Aji, A. S., Ariyasra, U., Sari, S. R., Tasrif, N., Yani, F. F., ..., Vimalaswaran, K. S. (2021). Interaction between Vitamin D-Related Genetic Risk Score and Carbohydrate Intake on Body Fat Composition: A Study in Southeast Asian Minangkabau Women. *Nutrients*, 13 (2). <https://doi.org/10.3390/nu13020326>
- Alsulami, S., Nyakotey, D. A., Dudek, K., Bawah, A.-M., Lovegrove, J. A., Annan, R. A., ..., Vimalaswaran, K. S. (2020). Interaction between Metabolic Genetic Risk Score and Dietary Fatty Acid Intake on Central Obesity in a Ghanaian Population. *Nutrients*, 12 (7). <https://doi.org/10.3390/nu12071906>
- Amorim, T. L., & de Oliveira, M. A. L. (2020). Advances in Lipid Capillary Electromigration Methods to Food Analysis Within the 2010s Decade. *Food Analytical Methods*, 13 (7), 1503–1522. <https://doi.org/10.1007/s12161-020-01772-w>
- Anderson, C. M., Gillespie, S. L., Thiele, D. K., Ralph, J. L., & Ohm, J. E. (2018). Effects of Maternal Vitamin D Supplementation on the Maternal and Infant Epigenome. *Breastfeeding Medicine*, 13 (5), 371–380. <https://doi.org/10.1089/bfm.2017.0231>
- Ballus, C. A., Meinhardt, A. D., Bruns, R. E., & Godoy, H. T. (2011). Use of multivariate statistical techniques to optimize the simultaneous separation of 13 phenolic compounds from extra-virgin olive oil by capillary electrophoresis. *Talanta*, 83 (4), 1181–1187. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2010.07.013>
- Barh, D., Zambare, V., & Azevedo, V. (2013). *Omics: Applications in Biomedical, Agricultural, and Environmental Sciences*. CRC Press. Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/b14289>
- Beaulieu, L. (2019). Insights into the Regulation of Algal Proteins and Bioactive Peptides Using Proteomic and Transcriptomic Approaches. *Molecules*, 24 (9). <https://doi.org/10.3390/molecules24091708>
- Benkeblia, N. (2012). *OMICS Technologies: Tools for Food Science*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11534>
- Berenguer, C. V., Pereira, F., Pereira, J. A. M., & Câmara, J. S. (2022). Volatilomics: An Emerging and Promising Avenue for the Detection of Potential Prostate Cancer Biomarkers. *Cancers*, 14 (16). <https://doi.org/10.3390/cancers14163982>
- Bernal, A. J., & Jirtle, R. L. (2010). Epigenomic disruption: The effects of early developmental exposures. *Birth Defects Research Part A: Clinical and Molecular Teratology*, 88 (10), 938–944. <https://doi.org/10.1002/bdra.20685>
- Bongiorni, S., Gruber, C. E. M., Bueno, S., Chillemi, G., Ferrè, F., Failla, S., ..., Valentini, A. (2016). Transcriptomic investigation of meat tenderness in two Italian cattle breeds. *Animal Genetics*, 47 (3), 273–287. <https://doi.org/10.1111/age.12418>

- Bordoni, A., Laghi, L., Babini, E., Di Nunzio, M., Picone, G., Ciampa, A., ..., Capozzi, F. (2014). The foodomics approach for the evaluation of protein bioaccessibility in processed meat upon in vitro digestion. *Electrophoresis*, 35 (11), 1607–1614. <https://doi.org/10.1002/elps.201300579>
- Boussahel, S., Di Stefano, V., Muscarà, C., Cristani, M., & Melilli, M. G. (2020). Phenolic Compounds Characterization and Antioxidant Properties of Monocultivar Olive Oils from Northeast Algeria. *Agriculture*, 10 (11). <https://doi.org/10.3390/agriculture10110494>
- Bragazzi, N. L. (2013). Situating Nutri-Ethics at the Junction of Nutrigenomics and Nutriproteomics in Postgenomics Medicine. *Current Pharmacogenomics and Personalized Medicine*, 11 (2), 162–166. <https://doi.org/10.2174/1875692111311020008>
- Brunaud, L., Alberto, J.-M., Ayay, A., Gérard, P., Namour, F., Antunes, L., ..., Gueant, J.-L. (2003). Effects of Vitamin B12 and Folate Deficiencies on DNA Methylation and Carcinogenesis in Rat Liver. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, 41 (8). <https://doi.org/10.1515/cclm.2003.155>
- Campo, L. M., & Ramirez Navas, J. S. (2021). Antioxidant capacity in ice cream and dairy products. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 8 (1), 23–41. <https://doi.org/10.23850/24220582.3982>
- Capozzi, F., & Bordoni, A. (2012). Foodomics: a new comprehensive approach to food and nutrition. *Genes & Nutrition*, 8 (1), 1–4. <https://doi.org/10.1007/s12263-012-0310-x>
- Carrasco-Castilla, J., Hernández-Álvarez, A. J., Jiménez-Martínez, C., Gutiérrez-López, G. F., & Davila-Ortiz, G. (2012). Use of Proteomics and Peptidomics Methods in Food Bioactive Peptide Science and Engineering. *Food Engineering Reviews*, 4 (4), 224–243. <https://doi.org/10.1007/s12393-012-9058-8>
- Cavaliere, B., De Nino, A., Hayet, F., Lazez, A., Macchione, B., Moncef, C., ..., Tagarelli, A. (2007). A Metabolomic Approach to the Evaluation of the Origin of Extra Virgin Olive Oil: A Convenient Statistical Treatment of Mass Spectrometric Analytical Data. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (4), 1454–1462. <https://doi.org/10.1021/jf062929u>
- Cecchetto, M., Peruzza, L., Giubilato, E., Bernardini, I., Rovere, G. D., Marcomini, A., ..., Milan, M. (2023). An innovative index to incorporate transcriptomic data into weight of evidence approaches for environmental risk assessment. *Environmental Research*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115745>
- Cervantes Saavedra, M. D. (1605). *El ingenioso hidalgo Don Quijote de la Mancha*. Editorial Juan de la Cuesta a costa de Francisco de Robles. <https://books.google.com.co/books?id=JEQoAQAAIAAJ>
- Cevallos-Cevallos, J. M., Reyes-De-Corcuera, J. I., Etxeberria, E., Danyluk, M. D., & Rodrick, G. E. (2009). Metabolomic analysis in food science: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 20 (11–12), 557–566. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.07.002>
- Chen, D., Li, X., Zhao, X., Qin, Y., Wang, J., & Wang, C. (2019). Comparative proteomics of goat milk during heated processing. *Food Chemistry*, 275, 504–514. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.129>
- Cho, I., & Blaser, M. J. (2012). The human microbiome: at the interface of health and disease. *Nature Reviews Genetics*, 13 (4), 260–270. <https://doi.org/10.1038/nrg3182>
- Chua-Lim, L. A., Vergara, A. S., Ulamarulama, R. M., Valencia, E. K. A., Vergara, A. R. N., Dable-Tupas, G., & Escalante-Llavore, C. (2023). Role of nutrigenomics in diabetes care and prevention. In *Role of Nutrigenomics in Modern-day Healthcare and Drug Discovery* (pp. 115–133). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-824412-8.00001-1>
- Cifuentes, A. (2009). Food analysis and Foodomics. *Journal of Chromatography A*, 1216(43). <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.09.018>
- Cifuentes, A., & Ibáñez, E. (2022). Exploration of Foods and Foodomics: a new adventure. *Exploration of Foods and Foodomics*, 1 (1), 1–4. <https://doi.org/10.37349/eff.2022.00001>
- Colgrave, M. L., Goswami, H., Blundell, M., Howitt, C. A., & Tanner, G. J. (2014). Using mass spectrometry to detect hydrolysed gluten in beer that is responsible for false negatives by ELISA. *Journal of Chromatography A*, 1370, 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2014.10.033>
- Dai, W., Wang, Q., Zhao, F., Liu, J., & Liu, H. (2018). Understanding the regulatory mechanisms of milk production using integrative transcriptomic and proteomic analyses: improving inefficient utilization of crop by-products as forage in dairy industry. *BMC Genomics*, 19 (1). <https://doi.org/10.1186/s12864-018-4808-5>
- De Santis, S., Cavalcanti, E., Mastronardi, M., Jirillo, E., & Chieppa, M. (2015). Nutritional Keys for Intestinal Barrier Modulation. *Frontiers in Immunology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2015.00612>
- Deniel, N., Marion-Letellier, R., Charlionet, R., Tron, F., Leprince, J., Vaudry, H., ..., Thébaud, S. (2007). Glutamine Regulates the Human Epithelial Intestinal HCT-8 Cell Proteome under Apoptotic Conditions. *Molecular & Cellular Proteomics*, 6 (10), 1671–1679. <https://doi.org/10.1074/mcp.M600428-MCP200>
- Desjardins, L.-C., & Vohl, M.-C. (2023). Precision Nutrition for Cardiovascular Diseases Prevention. *Lifestyle Genomics*. <https://doi.org/10.1159/000529054>
- Do Prado Aparecido, R., Barros Lopes, T. I., & Braz Alcantara, G. (2022). NMR-based foodomics of common tubers and roots. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2021.114527>
- Fiehn, O. (2002). Metabolomics — the link between genotypes and phenotypes. In *Functional Genomics* (pp. 155–171). https://doi.org/10.1007/978-94-010-0448-0_11
- Gallardo, J. M., Carrera, M., & Ortea, I. (2013). Proteomics in Food Science. In A. Cifuentes (Ed.), *Foodomics: Advanced Mass Spectrometry in Modern Food Science and Nutrition* (pp. 125–165). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118537282.ch5>

- Gallo, M., & Ferranti, P. (2016). The evolution of analytical chemistry methods in foodomics. *Journal of Chromatography A*, 1428, 3-15. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2015.09.007>
- Gallo, M., Ferrara, L., Calogero, A., Montesano, D., & Naviglio, D. (2020). Relationships between food and diseases: What to know to ensure food safety. *Food Research International*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109414>
- Ganesh, V., & Hettiarachchy, N. S. (2012). Nutriproteomics: A promising tool to link diet and diseases in nutritional research. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Proteins and Proteomics*, 1824 (10), 1107-1117. <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2012.06.006>
- García-Cañas, V., Simó, C., Herrero, M., Ibáñez, E., & Cifuentes, A. (2012). Present and Future Challenges in Food Analysis: Foodomics. *Analytical Chemistry*, 84 (23), 10150-10159. <https://doi.org/10.1021/ac301680q>
- García-Cañas, V., Simó, C., León, C., & Cifuentes, A. (2010). Advances in Nutrigenomics research: Novel and future analytical approaches to investigate the biological activity of natural compounds and food functions. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 51 (2), 290-304. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2009.04.019>
- Godoy-Caballero, M. d. P., Galeano-Díaz, T., & Acedo-Valenzuela, M. I. (2012). Simple and fast determination of phenolic compounds from different varieties of olive oil by nonaqueous capillary electrophoresis with UV-visible and fluorescence detection. *Journal of Separation Science*, 35 (24), 3529-3539. <https://doi.org/10.1002/jssc.201200696>
- Goff, S. A., Ricke, D., Lan, T.-H., Presting, G., Wang, R., Dunn, M., ..., Briggs, S. (2002). A Draft Sequence of the Rice Genome (*Oryza sativa* L. ssp. *japonica*). *Science*, 296 (5565), 92-100. <https://doi.org/10.1126/science.1068275>
- Govorun, V. M., & Archakov, A. I. (2002). Proteomic Technologies in Modern Biomedical Science. *Biochemistry (Moscow)*, 67 (10), 1109-1123. <https://doi.org/10.1023/a:1020959106412>
- Guarnaccia, M., Gentile, G., Alessi, E., Schneider, C., Petralia, S., & Cavallaro, S. (2014). Is this the real time for genomics? *Genomics*, 103 (2-3), 177-182. <https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2014.02.003>
- Guo, B., & Dalrymple, B. P. (2017). Transcriptomics of Meat Quality. In P. Purslow (Ed.), *New Aspects of Meat Quality* (pp. 259-320). Woodhead Publishing <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100593-4.00012-6>
- He, F., Liang, N.-N., Mu, L., Pan, Q. H., Wang, J., Reeves, M. J., & Duan, C. Q. (2012a). Anthocyanins and Their Variation in Red Wines I. Monomeric Anthocyanins and Their Color Expression. *Molecules*, 17 (2), 1571-1601. <https://doi.org/10.3390/molecules17021571>
- He, F., Liang, N.-N., Mu, L., Pan, Q.-H., Wang, J., Reeves, M. J., & Duan, C.-Q. (2012b). Anthocyanins and Their Variation in Red Wines II. Anthocyanin Derived Pigments and Their Color Evolution. *Molecules*, 17 (2), 1483-1519. <https://doi.org/10.3390/molecules17021483>
- Hédiji, H., Djebali, W., Cabasson, C., Maucourt, M., Baldet, P., Bertrand, A., ..., Gallusci, P. (2010). Effects of long-term cadmium exposure on growth and metabolomic profile of tomato plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73 (8), 1965-1974. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.08.014>
- Henikoff, S., Strahl, B. D., & Warburton, P. E. (2008). Epigenomics: A Roadmap to Chromatin. *Science*, 322 (5903), 853-853. <https://doi.org/10.1126/science.322.5903.853a>
- Hubbard, S. J., Grafham, D. V., Beattie, K. J., Overton, I. M., McLaren, S. R., Croning, M. D. R., ..., Wilson, S. A. (2005). Transcriptome analysis for the chicken based on 19,626 finished cDNA sequences and 485,337 expressed sequence tags. *Genome Research*, 15(1), 174-183. <https://doi.org/10.1101/gr.3011405>
- Hyötyläinen, T., & Wiedmer, S. (2013). *Chromatographic Methods in Metabolomics*. The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781849737272>
- Inoue, K., Tanada, C., Hosoya, T., Yoshida, S., Akiba, T., Min, J. Z., ..., Toyooka, T. (2016). Principal component analysis of molecularly based signals from infant formula contaminations using LC-MS and NMR in foodomics. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(11), 3876-3881. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7584>
- International Chicken Genome Sequencing Consortium. (2004). Sequence and comparative analysis of the chicken genome provide unique perspectives on vertebrate evolution. *Nature*, 432(7018), 695-716. <https://doi.org/10.1038/nature03154>
- Juarez, P. D., Hood, D. B., Song, M.-A., & Ramesh, A. (2020). Use of an Exposome Approach to Understand the Effects of Exposures From the Natural, Built, and Social Environments on Cardio-Vascular Disease Onset, Progression, and Outcomes. *Frontiers in Public Health*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00379>
- Kalogiouri, N. P., Aalizadeh, R., Dasenaki, M. E., & Thomaidis, N. S. (2020). Application of High Resolution Mass Spectrometric methods coupled with chemometric techniques in olive oil authenticity studies - A review. *Analytica Chimica Acta*, 1134, 150-173. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2020.07.029>
- Kocaadam, B., & Sanlier, N. (2015). Curcumin, an active component of turmeric (*Curcuma longa*), and its effects on health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(13), 2889-2895. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1077195>
- Kussmann, M. (2010). Nutriproteomics - Linking Proteomics Variation with Personalized Nutrition. *Current Pharmacogenomics and Personalized Medicine*, 8 (4), 245-256. <https://doi.org/10.2174/187569210793368177>
- Kussmann, M., & Fay, L. B. (2008). Nutrigenomics and personalized nutrition: science and concept. *Personalized Medicine*, 5 (5), 447-455. <https://doi.org/10.2217/17410541.5.5.447>
- Lander, E. S., Linton, L. M., Birren, B., Nusbaum, C., Zody, M. C., Baldwin, J., ..., Morgan, M. J. (2001). Initial sequencing and analysis of the human genome. *Nature*, 409(6822), 860-921. <https://doi.org/10.1038/35057062>

- Lentsch, A. B. (2009). Proteomics in Practice: A Laboratory Manual of Proteome Analysis. *Journal of Investigative Surgery*, 16 (5), 305–305. <https://doi.org/10.1080/08941930390230405>
- León, C., Cifuentes, A., & Valdés, A. (2018). Foodomics Applications. In *Data Analysis for Omic Sciences: Methods and Applications* (pp. 643–685). <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2018.06.008>
- Li, Y., & Ning, K. (2023). Biomedical Applications: The Need for Multi-Omics. In K. Ning (Ed.), *Methodologies of Multi-Omics Data Integration and Data Mining* (pp. 13–31). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8210-1_2
- Lioupi, A., Nenadis, N., & Theodoridis, G. (2020). Virgin olive oil metabolomics: A review. *Journal of Chromatography B*, 1150. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2020.122161>
- Lytou, A. E., Panagou, E. Z., & Nychas, G.-J. E. (2019). Volatilomics for food quality and authentication. *Current Opinion in Food Science*, 28, 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.10.003>
- Manganaris, G. A., Goulas, V., Mellidou, I., & Drogoudi, P. (2018). Antioxidant Phytochemicals in Fresh Produce: Exploitation of Genotype Variation and Advancements in Analytical Protocols. *Frontiers in Chemistry*, 5. <https://doi.org/10.3389/fchem.2017.00095>
- Mangelsen, E., Kilian, J., Harter, K., Jansson, C., Wanke, D., & Sundberg, E. (2011). Transcriptome Analysis of High-Temperature Stress in Developing Barley Caryopses: Early Stress Responses and Effects on Storage Compound Biosynthesis. *Molecular Plant*, 4 (1), 97–115. <https://doi.org/10.1093/mp/ssq058>
- Mathers, J. C. (2016). Nutrigenomics in the modern era. *Proceedings of the Nutrition Society*, 76 (3), 265–275. <https://doi.org/10.1017/s002966511600080x>
- Medina, J., Caro Rodríguez, D., Arana, V. A., Bernal, A., Esseiva, P., & Wist, J. (2017). Comparison of Attenuated Total Reflectance Mid-Infrared, Near Infrared, and ¹H-Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopies for the Determination of Coffee's Geographical Origin. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2017, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2017/7210463>
- Medina, S., Perestrelo, R., Pereira, R., & Câmara, J. S. (2020). Evaluation of Volatilomic Fingerprint from Apple Fruits to Ciders: A Useful Tool to Find Putative Biomarkers for Each Apple Variety. *Foods*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/foods9121830>
- Mingxun Wang, J. J. C., Vanessa V Phelan. (2016). Sharing and community curation of mass spectrometry data with Global Natural Products Social Molecular Networking. *Nature biotechnology*, 34, 828–837. <https://doi.org/10.1038/nbt.3597>
- Mischak, H., Delles, C., Vlahou, A., & Vanholder, R. (2015). Proteomic biomarkers in kidney disease: issues in development and implementation. *Nature Reviews Nephrology*, 11 (4), 221–232. <https://doi.org/10.1038/nrneph.2014.247>
- Monaci, L., & Visconti, A. (2009). Mass spectrometry-based proteomics methods for analysis of food allergens. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 28 (5), 581–591. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2009.02.013>
- Mora, L., Gallego, M., & Toldrá, F. (2018). New approaches based on comparative proteomics for the assessment of food quality. *Current Opinion in Food Science*, 22, 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.01.005>
- Müller, M., & Kersten, S. (2003). Nutrigenomics: goals and strategies. *Nature Reviews Genetics*, 4 (4), 315–322. <https://doi.org/10.1038/nrg1047>
- Mutch, D. M., Wahli, W., & Williamson, G. (2005). Nutrigenomics and nutrigenetics: the emerging faces of nutrition. *The FASEB Journal*, 19 (12), 1602–1616. <https://doi.org/10.1096/fj.05-3911rev>
- Neeha, V. S., & Kint, P. (2012). Nutrigenomics research: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 50(3), 415–428. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0775-z>
- Ning, K. (2023). *Methodologies of Multi-Omics Data Integration and Data Mining*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-8210-1>
- Noshad, M., Behbahani, B. A., & Karabagias, I. K. (2023). Volatilomic with chemometrics: a toward authentication approach for food authenticity control. *European Food Research and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00217-023-04291-0>
- Odoh, U. E., Onyegbulam, C. M., mba, T., Onugwu, O. S., Chikeokwu, I., & Odoh, L. C. (2023). Nutrigenomics, plant bioactives, and healthy aging. In K. B. Pandey & M. Suttajit (Eds.), *Plant Bioactives as Natural Panacea Against Age-Induced Diseases* (pp. 49–61). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90581-7.00011-6>
- Ozdemir, V., Armengaud, J., Dube, L., Karam Aziz, R., & M. Knoppers, B. (2010). Editorial (Nutriproteomics and Proteogenomics: Cultivating Two Novel Hybrid Fields of Personalized Medicine with Added Societal Value). *Current Pharmacogenomics and Personalized Medicine*, 8 (4), 240–244. <https://doi.org/10.2174/187569210793368230>
- Paul, D., Choudhury, S., & Bose, S. (2018). Microbiome. In P. Arivaradarajan & G. Misra (Eds.), *Omics Approaches, Technologies And Applications* (pp. 99–128). Springer Nature Singapore Pte Ltd. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2925-8_6
- Paul Shannon, A. M., Owen Ozier, Nitin S Baliga, Jonathan T Wang, Daniel Ramage, Nada Amin, Benno Schwikowski, Trey Ideker. (2003). Cytoscape: a software environment for integrated models of biomolecular interaction networks. *Genome Research*, 13(11), 2498–2504. <https://doi.org/10.1101/gr.1239303>
- Pavagadhi, S., & Swarup, S. (2020). Metabolomics for Evaluating Flavor-Associated Metabolites in Plant-Based Products. *Metabolites*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/metabo10050197>
- Pedrotty, D. M., Morley, M. P., & Cappola, T. P. (2012). Transcriptomic Biomarkers of Cardiovascular Disease. *Progress in Cardiovascular Diseases*, 55(1), 64–69. <https://doi.org/10.1016/j.pcad.2012.06.003>

- Peng, L., Gao, X., Wang, L., Zhu, A., Cai, X., Li, P., & Li, W. (2022). Design of experiment techniques for the optimization of chromatographic analysis conditions: A review. *Electrophoresis*, 43 (18–19), 1882–1898. <https://doi.org/10.1002/elps.202200072>
- Perez-Díaz-del-Campo, N., Dileo, E., Castelnuevo, G., Rosso, C., Caviglia, G. P., D'Amato, D., ..., Bugianesi, E. (2023). A nutrigenetic precision approach for the management of NAFLD. *Digestive and Liver Disease*, 55, S23–S24. <https://doi.org/10.1016/j.dld.2023.01.042>
- Perry, G. H., Dominy, N. J., Claw, K. G., Lee, A. S., Fiegler, H., Redon, R., ..., Stone, A. C. (2007). Diet and the evolution of human amylase gene copy number variation. *Nature Genetics*, 39 (10), 1256–1260. <https://doi.org/10.1038/ng2123>
- Poetsch, A., & Li, Y. (2023). Omics Technologies and Big Data. In K. Ning (Ed.), *Methodologies of Multi-Omics Data Integration and Data Mining* (pp. 33–54). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8210-1_3
- Pöhö, P., & Hyötyläinen, T. (2013). Mass Spectrometric Detection for Chromatography. In T. Hyötyläinen & S. Wiedmer (Eds.), *Chromatographic Methods in Metabolomics* (pp. 43–63). The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781849737272-00043>
- Puttamreddy, S., Carruthers, M. D., Madsen, M. L., & Minion, F. C. (2008). Transcriptome Analysis of Organisms with Food Safety Relevance. *Foodborne Pathogens and Disease*, 5 (4), 517–529. <https://doi.org/10.1089/fpd.2008.0112>
- Qi, S.-w., & Li, Q. X. (2010). Proteomics in Pesticide Toxicology. In R. Krieger (Ed.), *Hayes' Handbook of Pesticide Toxicology* (pp. 603–626). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-374367-1.00021-5>
- Rajawat, J. (2018). Transcriptomics. In P. Arivaradarajan & G. Misra (Eds.), *Omics Approaches, Technologies And Applications* (pp. 39–56). Springer Nature Singapore Pte Ltd. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2925-8_3
- Roberts, M.-A., Mutch, D. M., & German, J. B. (2001). Genomics: food and nutrition. *Current Opinion in Biotechnology*, 12 (5), 516–522. [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(00\)00256-1](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(00)00256-1)
- Robinson, J. W., Skelly Frame, E. M., & Frame, G. M. (2021). *Instrumental Analytical Chemistry*. <https://doi.org/10.1201/b21879>
- Safriani, N., Zakaria, F. R., Prangdimurti, E., Suwarti, Verpoorte, R., & Yuliana, N. D. (2022). Using metabolomics to discover the immunomodulator activity of food plants. *Heliyon*, 8 (5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09507>
- Sauer, S., & Luge, T. (2015). Nutriproteomics: Facts, concepts, and perspectives. *Proteomics*, 15 (5–6), 997–1013. <https://doi.org/10.1002/pmic.201400383>
- Sébédo, J. L., & Malpuech-Brugère, C. (2022). Implementation of foodomics in the food industry. In *Innovation Strategies in the Food Industry* (pp. 239–251). <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85203-6.00008-6>
- Sengupta, A., & Narad, P. (2018). Metabolomics. In P. Arivaradarajan & G. Misra (Eds.), *Omics Approaches, Technologies And Applications* (pp. 75–97). Springer Nature Singapore Pte Ltd. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2925-8_5
- Si, W., Zhang, Y., Li, X., Du, Y., & Xu, Q. (2021). Understanding the Functional Activity of Polyphenols Using Omics-Based Approaches. *Nutrients*, 13 (11). <https://doi.org/10.3390/nu13113953>
- Singh, D. D., & Datta, M. (2018). Genomics. In P. Arivaradarajan & G. Misra (Eds.), *Omics Approaches, Technologies And Applications* (pp. 11–38). Springer Nature Singapore Pte Ltd. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2925-8_2
- Srinivasan, M. (2020). Foodomics: The What, Why and How of It. In S. Singh (Ed.), *Metagenomic Systems Biology* (pp. 185–205). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8562-3_9
- Štěpánová, S., & Kašička, V. (2022). CE–MS Approaches for Peptidomics. In *Capillary Electrophoresis–Mass Spectrometry for Proteomics and Metabolomics* (pp. 235–259). <https://doi.org/10.1002/9783527833092.ch9>
- Stilo, F., Bicchi, C., Reichenbach, S. E., & Cordero, C. (2021). Comprehensive two-dimensional gas chromatography as a boosting technology in food-omic investigations. *Journal of Separation Science*, 44 (8), 1592–1611. <https://doi.org/10.1002/jssc.202100017>
- Tang, M., Liu, Y., & Gong, X. (2023). Multi-Omics Data Mining Techniques: Algorithms and Software. In K. Ning (Ed.), *Methodologies of Multi-Omics Data Integration and Data Mining* (pp. 55–74). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8210-1_4
- Theodoridis, G. A., Michopoulos, F., Gika, H. G., Plumb, R. S., & Wilson, I. D. (2013). Liquid Chromatographic Techniques in Metabolomics. In T. Hyötyläinen & S. Wiedmer (Eds.), *Chromatographic Methods in Metabolomics* (pp. 64–86). The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781849737272-00064>
- Tomato Genome Consortium. (2012). The tomato genome sequence provides insights into fleshy fruit evolution. *Nature*, 485 (7400), 635–641. <https://doi.org/10.1038/nature11119>
- Tran, T., Romanet, R., Roullier-Gall, C., Verdier, F., Martin, A., Schmitt-Kopplin, P., ..., Tourdot-Maréchal, R. (2022). Non-Targeted Metabolomic Analysis of the Kombucha Production Process. *Metabolites*, 12 (2). <https://doi.org/10.3390/metabo12020160>
- Trygg, J., Holmes, E., & Lundstedt, T. (2007). Chemometrics in Metabonomics. *Journal of Proteome Research*, 6(2), 469–479. <https://doi.org/10.1021/pr060594q>
- Valdés, A., Álvarez-Rivera, G., Socas-Rodríguez, B., Herrero, M., Ibáñez, E., & Cifuentes, A. (2021). Foodomics: Analytical Opportunities and Challenges. *Analytical Chemistry*, 94 (1), 366–381. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.1c04678>

- Valdés, A., Álvarez-Rivera, G., Socas-Rodríguez, B., Herrero, M., & Cifuentes, A. (2021). Capillary electromigration methods for food analysis and Foodomics: Advances and applications in the period February 2019–February 2021. *Electrophoresis*, 43 (1-2), 37–56. <https://doi.org/10.1002/elps.202100201>
- Valdés, A., Cifuentes, A., & León, C. (2017). Foodomics evaluation of bioactive compounds in foods. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 96, 2–13. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2017.06.004>
- Valdés, A., Ibáñez, C., Simó, C., & García-Cañas, V. (2013). Recent transcriptomics advances and emerging applications in food science. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 52, 142–154. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2013.06.014>
- Vaz, C., & Tanavde, V. (2018). Proteomics. In P. Arivaradarajan & G. Misra (Eds.), *Omics Approaches, Technologies And Applications* (pp. 57–73). Springer Nature Singapore Pte Ltd. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2925-8_4
- Vázquez-Fresno, R., Llorach, R., Perera, A., Mandal, R., Feliz, M., Tinahones, F. J., ..., Andres-Lacueva, C. (2016). Clinical phenotype clustering in cardiovascular risk patients for the identification of responsive metabolotypes after red wine polyphenol intake. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 28, 114–120. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2015.10.002>
- Vineis, P., Chadeau-Hyam, M., Gmuender, H., Gulliver, J., Herceg, Z., Kleinjans, J., ..., Wild, C. P. (2017). The exposome in practice: Design of the EXPOSOMICS project. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 220 (2), 142–151. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2016.08.001>
- Wachsmuth, C. J., Vogl, F. C., Oefner, P. J., & Dettmer, K. (2013). Gas Chromatographic Techniques in Metabolomics. In T. Hyötyläinen & S. Wiedmer (Eds.), *Chromatographic Methods in Metabolomics* (pp. 87–113). The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781849737272-00087>
- Wang, X. J., Ren, J. L., Zhang, A. H., Sun, H., Yan, G. L., Han, Y., & Liu, L. (2019). Novel applications of mass spectrometry-based metabolomics in herbal medicines and its active ingredients: Current evidence. *Mass Spectrometry Reviews*, 38 (4–5), 380–402. <https://doi.org/10.1002/mas.21589>
- Wishart, D. S. (2008). Metabolomics: applications to food science and nutrition research. *Trends in Food Science & Technology*, 19 (9), 482–493. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.03.003>
- Xiong, Q., Sun, C., Li, A., Zhang, J., Shi, Q., Zhang, Y., ..., Zhu, J. (2022). Metabolomics and biochemical analyses revealed metabolites important for the antioxidant properties of purple glutinous rice. *Food Chemistry*, 389. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133080>
- Yang, J. (2023). Using nutrigenomics to guide personalized nutrition supplementation for bolstering immune system. *Health Information Science and Systems*, 11 (1). <https://doi.org/10.1007/s13755-022-00208-5>
- Zeisel, S. (2017). Choline, Other Methyl-Donors and Epigenetics. *Nutrients*, 9 (5). <https://doi.org/10.3390/nu9050445>
- Zeng, J., Gao, C., Deng, G., Jiang, B., Yi, G., Peng, X., ..., Liu, K. (2012). Transcriptome analysis of fruit development of a citrus late-ripening mutant by microarray. *Scientia Horticulturae*, 134, 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.10.018>
- Zhan, X. (2021). *Metabolomics - Methodology and Applications in Medical Sciences and Life Sciences*. Intechopen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90987>
- Zhang, A., & Wang, W. (2022). *Mass Spectrometry-Based Metabolomics in Herbal Medicines*. WILEY-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527835751>
- Zhang, C., Zhou, C., Tian, C., Xu, K., Lai, Z., Lin, Y., & Guo, Y. (2023). Volatilomics Analysis of Jasmine Tea during Multiple Rounds of Scenting Processes. *Foods*, 12 (4). <https://doi.org/10.3390/foods12040812>
- Zhang, H., Chen, Y., Guo, Y., Xu, W., Wang, W., Wu, S., ..., Huang, Y. (2021). Label-free quantification proteomics reveals the active peptides from protein degradation during anaerobic fermentation of tea. *Lwt*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111950>
- Zheng, J., Wu, F., Wang, F., Cheng, J., Zou, H., Li, Y., ..., Kan, J. (2023). Biomarkers of Micronutrients and Phytonutrients and Their Application in Epidemiological Studies. *Nutrients*, 15 (4). <https://doi.org/10.3390/nu15040970>
- Zhu, Y., Bu, D., & Ma, L. (2022). Integration of Multiplied Omics, a Step Forward in Systematic Dairy Research. *Metabolites*, 12 (3). <https://doi.org/10.3390/metabo12030225>

Sustitución parcial de la harina de trigo (*Triticum aestivum* L.) por harina de chocho (*Lupinus mutabilis*) en la elaboración de galletas

Partial substitution of wheat flour (*Triticum aestivum* L.) by chocho flour (*Lupinus mutabilis*) in the production of cookies

Víctor Jhoel Cabrera-Mera^a victor.cabrera2016@uteq.edu.ec; Jennifer Ivana Benavides-Panchana^a jennifer.benavides2016@uteq.edu.ec; Andrea Cristina Cortez-Espinoza^a acortez@uteq.edu.ec; Jhonattan Placido Aldas-Morejon^a jhonattan.aldas2015@uteq.edu.ec; Karol Yannela Revilla-Escobar^a karol.revilla2015@uteq.edu.ec

^aUniversidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador. Facultad de Ciencias de la Industria y Producción – Agroindustria.

Recibido: 06/06/2023 Aceptado: 08/08/2023

Citar, APA: Cabrera-Mera, V. J., Benavides-Panchana, J. I., Cortez-Espinoza, A. C., Aldas-Morejon, J. P. y Revilla-Escobar, K. Y (2023). Sustitución parcial de la harina de trigo (*Triticum aestivum* L.) por harina de chocho (*Lupinus mutabilis*) en la elaboración de galletas. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 10 (2), 23–32. <https://doi.org/10.23850/24220582.5736>

Resumen Las galletas son un producto del área de panificación elaborados generalmente con harina de trigo industrial. El objetivo de la presente investigación consistió en evaluar la incidencia de la sustitución parcial de la harina de trigo (*Triticum aestivum* L.) por la harina de chocho (*Lupinus mutabilis*) en la elaboración de galletas y cómo influye en las características texturales, fisicoquímicas y sensoriales. Se aplicó un diseño completo al azar (D.C.A.) y para determinar diferencia significativa se utilizó la prueba de Tukey ($p < 0,05$). Todos los tratamientos arrojaron diferencias estadísticas, estableciendo valores para las variables analizadas: dureza (29,89 – 19,04 N), fracturabilidad (0,49 a 0,24 KgF), humedad (4,83 – 2,93 %), proteína (21,65 – 8,16 %), cenizas (2,28 – 1,57 %), fibra cruda (9,38 – 4,39 %), grasa (26,25 – 37,12 %), carbohidratos (59,49 a 25,57 %) y energía (563,00 – 506,6 kcal). En relación con el perfil sensorial, el T4 (25 % de harina de chocho + 75 % de harina de trigo) obtuvo mejor aceptación por parte de los catadores, así como también, un mejor olor, color, sabor y crujencia. Se concluye que la incorporación de harina de chocho en la formulación de galletas es una excelente alternativa para disminuir la dependencia del trigo en su elaboración, siendo también una fuente de alto valor nutricional.

Palabras clave: alternativa, consumo, harina compuesta, nutrientes.

Abstract Cookies are a bakery product generally made with industrial wheat flour. The goal of the present investigation was to evaluate the incidence of the partial substitution of wheat flour (*Triticum aestivum* L.) by chocho flour (*Lupinus mutabilis*) in the manufacture of cookies and how it influences the textural, physicochemical and sensory characteristics. A complete randomized design (C.R.D.) was applied and a Tukey's test ($p < 0.05$) was used to determine significant differences. All treatments showed statistical differences, establishing values for the variables analyzed: hardness (29,89 – 19,04 N), fracturability (0,49 to 0,24 KgF), moisture (4,83 – 2,93 %), protein (21,65 – 8,16 %), ash (2,28 – 1,57 %), crude fiber (9,38 – 4,39 %), fat (26,25 – 37,12 %), carbohydrates (59,49 to 25,57 %) and energy (563,00 – 506,6 kcal). In relation to the sensory profile, T4 (25 % chocho flour + 75 % wheat flour) obtained better acceptance by the tasters, as well as better odor, color, flavor and crunchiness. Thus, it is concluded that the incorporation of chocho flour in the formulation of cookies is an excellent alternative to reduce the dependence on wheat in its production, being also a source of high nutritional value.

Keywords: alternative, consumption, composite meal, nutrients.

Introducción

Los productos de panadería incluyen las galletas, que han estado en la dieta de las personas desde hace cientos de años, porque son ricas en carbohidratos, producen energía rápidamente y a nivel mundial las galletas se consumen con mucha frecuencia, con diferentes comidas o como un bocadito (Chirinos & Vargas, 2017). Su consumo ha tenido un crecimiento exponencial en los últimos años, siendo los niños y jóvenes los principales consumidores. Sin embargo, los nutricionistas mencionan que la fibra, el calcio y las vitaminas no se consumen lo suficiente y producen un aumento calórico en la dieta (Ponce-Rosa, 2018).

La mayoría de los alimentos a base de cereales y leguminosas, especialmente las galletas y el pan, se elaboran a partir de mezclas de harina de trigo con diversas concentraciones, entre ellas, harina de quinua y chocho, con la finalidad de encontrar mejores formas de promover una alimentación saludable, prevenir enfermedades crónicas degenerativas y afrontar problemas de desnutrición por déficit en poblaciones vulnerables, especialmente en el grupo infantil (García-Lozano *et al.*, 2017).

El chocho (*Lupinus mutabilis*), es una leguminosa originaria de la zona andina de Sudamérica y su distribución va desde Colombia hasta el norte de Argentina. Actualmente, es considerada una especie alimentaria sólo en Ecuador, Perú y Bolivia (Soto-Rueda *et al.*, 2010). La harina de chocho es una buena fuente de macro y micronutrientes, rica en lisina, aminoácidos esenciales, vitaminas y minerales, que puede ser utilizada para fortificación del contenido de proteínas en pasta, pan, galletas, ensaladas, así como también, sustituir la soya y la leche (FAO, 2010).

Por su parte, el trigo (*Triticum aestivum* L.) también posee un alto valor nutricional lo que ha impulsado su comercialización, cabe destacar que este cereal requiere, para su consumo, un

proceso previo de transformación que da como resultado la producción de harina, uno de los principales ingredientes en la elaboración productos de panificación como las galletas (Chirinos-Leal & Vargas-Rincón, 2017).

Se enfatiza que el desarrollo de galletas consiste en la sustitución parcial de la harina de trigo por harina de materias primas no tradicionales y alto valor nutricional. Por esta razón, el objetivo de la presente investigación fue evaluar la incidencia de la sustitución parcial de la harina trigo (*Triticum aestivum* L.) por la harina de chocho (*Lupinus mutabilis*) en la elaboración de galletas y cómo este cambio de materia prima influye en las características texturales, bromatológicas y sensoriales de este producto.

Materiales y métodos

Material

La harina de chocho se adquirió en el mercado municipal de la ciudad de Azogues, provincia de Cañar, mientras que la harina de trigo se obtuvo del cantón Quevedo, provincia de Los Ríos. La elaboración de las galletas se realizó en el laboratorio de chocolatería, los análisis bromatológicos y sensoriales se llevaron a cabo en el laboratorio de bromatología en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador. Mientras que los análisis texturales se ejecutaron en el laboratorio de investigación de alimentos de la Universidad Laica Eloy Alfaro De Manabí, Manta, Ecuador.

Diseño experimental

Se utilizó un Diseño Completamente al Azar (D.C.A), evaluando 5 tratamientos con tres repeticiones. El tamaño de la muestra consistió en evaluar los tratamientos en un total de 20 galletas. Para determinar diferencias entre las medias de los tratamientos se empleó la prueba de rangos múltiples de Tukey ($p < 0.05$), mediante los softwares estadísticos Statgraphics e InfoStat. Los tratamientos y niveles se encuentran descritos en la **Tabla 1**.

Tabla 1

Factores del Diseño Completamente al Azar (DCA)

Tratamiento	Descripción
T1	100 % de harina de chocho + 0 % de harina de trigo
T2	75 % de harina de chocho + 25 % de harina de trigo
T3	50 % de harina de chocho + 50 % de harina de trigo
T4	25 % de harina de chocho + 75 % de harina de trigo
T5	0 % de harina de chocho + 100 % de harina de trigo

Proceso de elaboración

Para garantizar la calidad e inocuidad del producto, se utilizaron equipos de acero inoxidable, es necesario mencionar que se utilizó el método de punto pomada (creaming-method) para mezclar los ingredientes (Kwaku *et al.*, 2016). Se agregó azúcar, mantequilla y se procedió a batir en la primera velocidad con una batidora de mano por 5 minutos, hasta obtener una mezcla suave y sin gránulos de azúcar, se incorporó sal, leche en polvo, esencia de vainilla y agua, se continuó con el batido durante 4 minutos hasta obtener una mezcla uniforme. Posteriormente, se incorporó la harina de chocho, harina de trigo y bicarbonato de sodio, se volvió a mezclar y amasar por un periodo de 3 minutos. La masa se dejó reposar por un periodo de 10 minutos. Luego se tomaron porciones de 50 gramos de masa y para laminarlas se usó un rodillo de madera sobre una superficie lisa. Con un molde de 5 mm de espesor y 3,5 cm de diámetro, se cortaron círculos de masa que se colocaron en una bandeja para hornear. Las galletas se hornearon a una temperatura de 140 °C por 25 min. Después de horneadas, se enfriaron a temperatura ambiente (28 °C). Cabe mencionar que los ingredientes se adicionaron en función a los tratamientos descritos en la **Tabla 1**.

Características texturales

Las propiedades texturales de dureza y fracturabilidad se evaluaron utilizando un texturómetro marca Shimadzu Ez-LX. Se empleó una sonda de cuchilla sin filo, a una velocidad de descenso de 2 mm/s y una distancia

de penetración de 6 mm con una fuerza de contacto de 0,5 Newton.

Características bromatológicas

Para determinar el contenido de humedad, se empleó una estufa “MEMMERT” según el método de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN – ISO 712:2011 (INEN, 2011) donde se utilizó 80 g de muestra previamente triturada. El contenido de proteína se obtuvo de acuerdo con lo establecido en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 519:2012 (INEN, 2012a). La variable ceniza se evaluó mediante mufla según lo establecido en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 520:2012 (INEN, 2012b). El contenido de fibra cruda se valoró de acuerdo con lo estipulado en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 522:2012 (INEN, 2012c). El porcentaje de grasa se determinó mediante el procedimiento de extracción Soxhlet de acuerdo con Norma Técnica Ecuatoriana INEN 523:2012 (INEN, 2012d). Finalmente, la energía total se calculó siguiendo la metodología de Sanz-López (2017).

Características sensoriales

Para determinar las características sensoriales, se organizó un panel de 40 jueces no entrenados, utilizando el test de preferencia para determinar la aceptación y seleccionar el tratamiento con mejores características según las categorías evaluadas (olor, color, sabor, crujencia, dureza y aceptabilidad). Al panel se le solicitó, posterior a la catación, respondieran cuanto le gusto o disgustó cada uno de los tratamientos. Empleando una escala hedónica de 9 puntos, siendo 1 = me disgusta muchísimo y 9 = me gusta muchísimo.

Resultados y Discusión

Características texturales

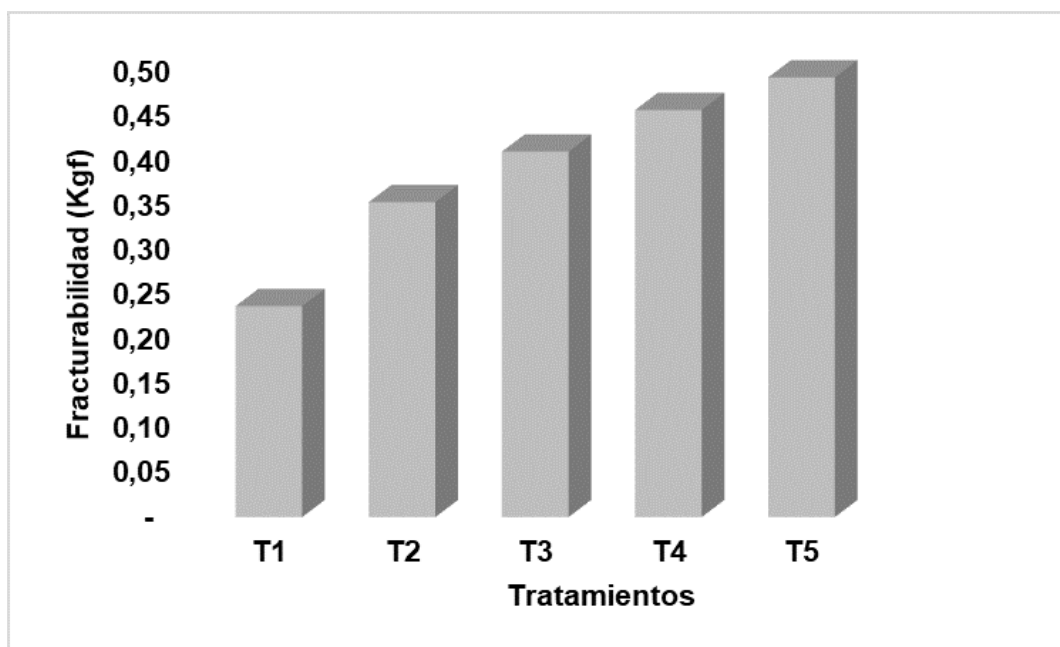
Los resultados de las pruebas texturales de fracturabilidad y dureza (**Figura 1 y 2**), indicaron que los distintos porcentajes de harina de chocho y trigo presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$). Para lo cual, se observó que al disminuir el contenido de harina de chocho en la obtención de las galletas aumentaba la dureza y fracturabilidad.

La mayor dureza se presentó en el tratamiento T5 con ($29,89 \pm 0,2$ N) siendo estadísticamente diferente de tratamiento T1, el cual situó una notable disminución en la

fuerza máxima requerida para la deformación necesitando ($19,04 \pm 0,88$ N). En este punto, cabe mencionar que las galletas son productos higroscópicos, siendo la dureza y la fracturabilidad las características de mayor importancia en la evaluación de la textura (Apaza-Ahumada, 2019). En este sentido Ponce *et al.* (2018), recomiendan incluir el 30 % de harinas de leguminosas en la producción de pasta larga, obteniendo buenos resultados al adicionar principalmente harina de frijol, presentando una dureza de $16,38 \pm 1,91$. Por su parte, Torres-González *et al.* (2015) determinaron valores de dureza entre $6,97 \pm 1,38$ a $16,83 \pm 1,12$ evaluando diferentes espesores en la producción de galletas de limón.

Figura 1

Resultados de la prueba de fracturabilidad de los diferentes tratamientos



En la prueba de fracturabilidad, el tratamiento T5 demostró ser menos quebradizo necesitando $0,49 \pm 0,02$ kgf para lograr que se deformaron las galletas, en comparación del T1 que presentó mayor grado de fracturabilidad requiriendo una fuerza menor de $0,24 \pm 0,02$. No obstante, el T4 presentó una fracturabilidad

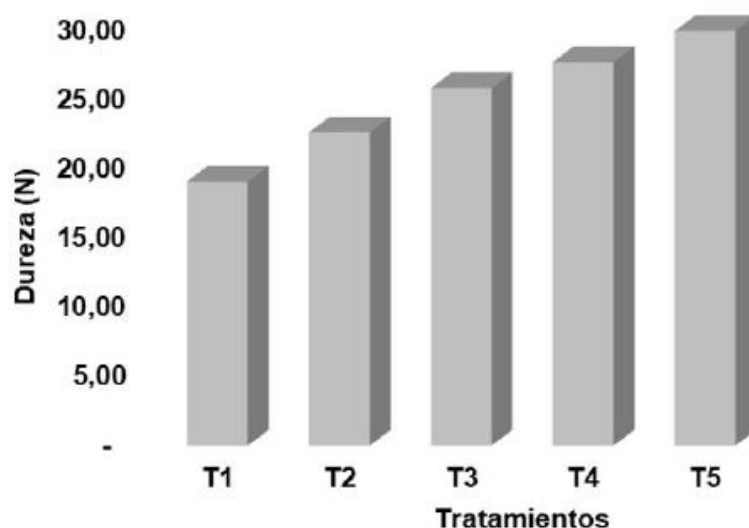
de $0,46 \pm 0,01$ kgf, con esto se demostró que, las galletas 100 % harina de trigo presentan mayor resistencia en el proceso de fracturabilidad. Este resultado, guarda relación con Soler-Martínez *et al.* (2017) quienes reportaron un promedio de $0,488 \pm 0,13$ kgf, además, Malleret *et al.* (2018) al incluir 10 % de harina de sorgo y 90 % harina

de trigo, obtuvieron una fracturabilidad de $0,312 \pm 0,054$ kgf. Por su parte, Sibian & Riar (2020), determinaron $7,134 \pm 0,03$ kgf a $5,785 \pm 0,03$

kgf en galletas de trigo sin germinar y galletas de harinas compuestas de frijol germinado, garbanzo y trigo.

Figura 2

Resultados de la prueba de dureza de los diferentes tratamientos



Características bromatológicas

Se estableció diferencia significativa ($p < 0,05$) entre la media de los tratamientos, al evaluar la caracterización bromatológica

(humedad, proteína, cenizas, fibra cruda, grasa, carbohidratos, energía) de las galletas, las cuales se describen en la **Tabla 2**.

Tabla 2

Resultados de la caracterización bromatológica en 100 g de galleta de cada tratamiento

Parámetro	Tratamientos				
	T1	T2	T3	T4	T5
Humedad (%)	$4,08 \pm 0,09C$	$3,35 \pm 0,01B$	$4,83 \pm 0,27E$	$2,93 \pm 0,08A$	$3,82 \pm 0,02D$
Proteína (%)	$21,65 \pm 0,28E$	$17,23 \pm 0,16D$	$14,24 \pm 0,16C$	$11,63 \pm 0,59B$	$8,16 \pm 0,28A$
Cenizas (%)	$1,57 \pm 0,02A$	$1,85 \pm 0,02B$	$1,86 \pm 0,09B$	$2,00 \pm 0,02C$	$2,28 \pm 0,05D$
Fibra cruda (%)	$9,38 \pm 0,35E$	$7,53 \pm 0,32D$	$6,86 \pm 0,11C$	$5,85 \pm 0,14B$	$4,39 \pm 0,08A$
Grasa (%)	$37,12 \pm 0,41E$	$33,74 \pm 0,28D$	$31,77 \pm 0,48C$	$28,54 \pm 0,33B$	$26,25 \pm 0,20A$
Carbohidratos (%)	$35,57 \pm 0,69A$	$43,83 \pm 0,16B$	$47,29 \pm 0,36C$	$54,90 \pm 0,99D$	$59,49 \pm 0,32E$
Energía (Kcal)	$563,00 \pm 1,77E$	$548,33 \pm 1,52D$	$532,00 \pm 3,73C$	$523,33 \pm 1,23B$	$506,67 \pm 1,27A$

Nota. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) Tukey Nivel de confianza 95%.

En relación con la humedad, al mezclar 50 % de harina de chocho y trigo, se obtuvo una humedad superior con $4,83 \pm 0,27$, mientras que al mezclar 25 % de harina de chocho + 75 % harina de trigo

presentó una humedad inferior con $2,93 \pm 0,08$. Estos valores son inferiores a lo determinado por Ndife *et al.* (2014), quienes al utilizar harina de *Glycine max* situaron valores de 7,24 % a 9,85

%). Mientras, en la investigación realizada por Okpala *et al.* (2013) presentaron entre 6,60 % a 8,00 % en galletas de guisantes, sorgo y ocumo blanco. Al respecto, es necesario mencionar que los altos contenidos de humedad se relacionan con una vida útil corta en productos horneados, al favorecer la proliferación bacteriana que conduce a su deterioro (Puma-Isuiza *et al.*, 2018).

Respecto al contenido proteico, la harina de chocho presentó mayor incidencia, evidenciado por el tratamiento T1 que presentó $21,65 \pm 0,28$, sucediendo lo contrario con la harina de trigo, donde al utilizarla al 100 % (Tratamiento T5) se obtuvo menor porcentaje de proteína con un valor promedio de $8,16 \pm 0,28$. En la investigación de Patil *et al.* (2016), al combinar la harina de sorgo y trigo aumentó significativamente el contenido de proteína. Por otro lado, Chiriguya- Salavarría (2020), obtuvo un contenido de proteína de 16,23 % al incorporar harinas de chocho y quinoa en la formulación de galletas. De acuerdo con Llerena-Carrera (2022) al estudiar los diferentes granos, determinó que, el chocho desamargado (54 %) posee mayor cantidad de proteína, superando a la soya (36 %), frijol (22 %) y maní (27 %).

En cuanto al análisis de cenizas al existir diferencias significativas, se determinó que las distintas concentraciones de los tipos de harinas inciden en los resultados obtenidos, alcanzando valores entre $1,57 \pm 0,02$ a $2,28 \pm 0,05$ correspondientes al (T1 y T5) respectivamente. Estos valores son superiores en comparación con lo reportado por Soler-Martínez *et al.* (2017) quienes determinaron un contenido de $1,02 \pm 0,03$ en galletas 100 % harina de sorgo. En cambio, Machuca-Flores *et al.* (2017) presentaron un valor igual a $2,41 \pm 0,06$ al utilizar 100 % harina de frijol pinto nacional. Además, Okpala *et al.* (2013), observó una tendencia similar (2,35 % a 2,65 %) en las galletas de harinas de gandul germinado, sorgo fermentado y cocoyam blanqueado.

El contenido de fibra cruda de los distintos tratamientos fue de $4,39 \pm 0,08$ a $9,38 \pm 0,35$; siendo el valor más alto el tratamiento que empleó (100 % harina de chocho) y más bajo en el tratamiento con (harina de trigo al 100 %). Los resultados obtenidos son superiores a lo reportado por De Camargo *et al.* (2014), que obtuvieron 1,78 - 2,89 en galletas de trigo fortificadas con 1,5 % de piel de maní. Por consiguiente, en el estudio de Ndife *et al.* (2014), encontraron un alto contenido de fibra, al combinar harinas trigo y soja ($4,67$ % a $6,74$ %, respectivamente). Sin, embargo, guardan relación con lo reportado por Rajiv *et al.* (2012), que al utilizar harina de frijoles mungo (*Phaseolus aureus*) obtuvieron 4,10 % de fibra.

En cuanto, al contenido de grasa se obtuvo valores entre $26,25 \pm 0,20$ a $37,12 \pm 0,41$; demostrando que la materia prima influye en el porcentaje de grasa de la galleta, siendo la harina de chocho quien proporciona mayor contenido en comparación con la harina de trigo que reportó el valor más bajo para este parámetro. El chocho tiene un alto contenido de proteína y aceite, por esta razón, al utilizar mayor cantidad de harina de chocho confiere al producto final un mayor contenido de grasa. Soler-Martínez *et al.* (2017) mencionaron que las galletas a base de harinas compuestas tienen mayor contenido de grasa en relación con las galletas de trigo. Sin embargo, los valores de esta investigación son superiores a lo establecido por Hoyos-Vásquez *et al.* (2021), quienes obtuvieron porcentajes entre 12 % a 25 % en galletas elaboradas con grasas de origen vegetal. Así mismo, Akhtar *et al.* (2008), enfatizaron que el porcentaje de grasa está influenciado por el tipo de harina e ingredientes añadidos como (la leche y el huevo) que aportan nutrientes a la mezcla.

El contenido de carbohidratos de las galletas obtenidas a partir de harina de chocho y trigo, se situó entre $35,57 \pm 0,69$ a $59,49 \pm 0,32$; observando que la harina de trigo proporciona mayor cantidad de hidratos de carbono a los

alimentos, este valor fue similar al determinado por Gangola *et al.* (2022), quienes establecieron un contenido de azúcares entre 66 % a 45 % para las galletas de trigo y frijol respectivamente. También, Olagunju *et al.* (2018), al utilizar harina de acha (*Digitaria exilis*) y guandú blanqueado (*Cajanus cajan*) determinaron un contenido promedio de carbohidratos correspondiente al 65,42 %. Otros investigadores tales como Ortega *et al.* (2016) reportaron un contenido de azúcares que osciló entre 53,79 % al 60,08 % al remplazar la harina de trigo por harina del pseudofruto del caujil.

En cuanto al análisis del aporte energético, el tratamiento T1 reportó el menor valor con un valor promedio de $563,00 \pm 1,77$ kcal, posiblemente esto esté relacionado con el alto porcentaje de grasa presente en la harina de chocho, diferente fue el resultado del tratamiento T5, en el cual se encontró un alto valor energético

con $506,67 \pm 1,27$ kcal. En este estudio, el mayor aporte energético se obtuvo al emplear mayor cantidad de harina de chocho, mientras que el trigo aportó en menor proporción a esta variable, estos valores guardan relación a lo estipulado por Ndife *et al.* (2014), quienes determinaron un aporte de calorías dado entre $602,47 \pm 0,10$ a $510,22 \pm 0,14$ en galletas enriquecidas (proteína y judías). De igual manera Gajanayaka *et al.* (2021) demostraron un aporte de $(411 \pm 4,10$ a $578 \pm 4,84)$ con la incorporación de frijol alado en la formulación, también hacen referencia que el valor energético de la muestra podría atribuirse con un mayor contenido en lípidos de la materia prima.

Características sensoriales

Las categorías sensoriales olor, color, sabor, dureza, crujencia y aceptabilidad), se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3

Caracterización de los parámetros sensoriales evaluados

Categorías	Tratamientos					Prueba de Kruskal Wallis
	T1	T2	T3	T4	T5	P-value
Olor	$4,90 \pm 1,03A$	$5,33 \pm 1,06B$	$5,63 \pm 1,10BC$	$6,88 \pm 0,95D$	$7,97 \pm 0,72E$	0,0024
Color	$4,83 \pm 0,85A$	$4,97 \pm 0,85AB$	$6,37 \pm 1,25D$	$5,53 \pm 1,48C$	$7,00 \pm 1,23E$	0,0078
Sabor	$5,07 \pm 0,91AB$	$4,87 \pm 0,86A$	$5,63 \pm 1,63BC$	$6,23 \pm 1,41C$	$7,47 \pm 1,25D$	0,0033
Crujencia	$5,50 \pm 0,67A$	$5,63 \pm 1,63B$	$6,23 \pm 1,41C$	$6,73 \pm 1,04E$	$6,33 \pm 1,33D$	0,0054
Aceptabilidad	$5,07 \pm 0,91A$	$5,73 \pm 1,06B$	$6,34 \pm 0,82C$	$7,47 \pm 1,25D$	$7,53 \pm 1,17D$	0,0041

Nota. Letras distintas indican diferencias significativas entre la media de los tratamientos ($p < 0,05$). Tukey Nivel de confianza 95%. Valores promedio de 3 repeticiones $\pm$ DS.

En la categoría olor, se determinó diferencias significativas (p -value 0,0024), atribuidas al tratamiento T5, el cual presentó una valoración de $7,97 \pm 0,72$, mientras que el tratamiento T1 situó una calificación de $4,90 \pm 1,03$. Cabe mencionar que al incluir de harina de chocho al 25 % no disminuye el olor característico de las galletas. En la investigación de Soler *et al.* (2017), determinaron que la sustitución del 10 % al 30 % de harina de cereales o leguminosas, no indican negativamente en el nivel de aceptación de los catadores. Además, Machado *et al.* (2022) mencionan que al suplementar las galletas

de trigo con un 10 % de aislado de proteína proveniente de Bambara se obtienen resultados como una mejor apariencia y aroma.

En lo que respecta al color, existió diferencias significativas al evaluar esta variable dado por un (p -value 0,0078), obteniendo calificaciones que oscilaron entre $7,00 \pm 1,25$ a $4,83 \pm 0,85$ correspondiendo a los tratamientos (T5 y T1, respectivamente). La tonalidad marrón intenso de las galletas compuestas se debe a la presencia de una gran cantidad de carbohidratos en las mezclas de harinas, lo

que se obtiene como resultado un producto caramelizado (Ani & Okoye, 2021). De acuerdo con Chiriguya-Salavarría (2020), la coloración del producto terminado se debe a la interacción de los nutrientes durante el procesamiento e interacción de temperatura y tiempo de horneado.

El parámetro sabor, mostró diferencias significativas entre los tratamientos con un (p -value 0,0033), determinando que el T5 ($7,47 \pm 1,25$) presentó mayor puntaje, seguido del T4 ($6,23 \pm 1,41$), diferente sucedió con el tratamiento T1 ($5,07 \pm 0,91$) que obtuvo una calificación inferior, se hace mención que la harina de trigo potencia el sabor de la galleta. Por otro lado, los tratamientos con mayor porcentaje de harina de chocho presentaron valoraciones inferiores, esto se atribuye a la presencia de sustancias amargas, debido al alto contenido de compuestos fenólicos, lo que promueve el sabor amargo residual característico en galletas con esta materia prima (Ikuomola *et al.*, 2017).

En relación con la categoría crujencia, el tratamiento T4 ($6,73 \pm 1,04$) fue significativamente superior al tratamiento T1 ($5,50 \pm 0,67$), con un p -value de 0,0054. De acuerdo con Mofuluwaso *et al.* (2017) la crujencia esta influenciada por el nivel de fibra y bajo contenido de gluten de las harinas. Norhidayah *et al.* (2021) indican que las galletas con 25 % de nuez (*Myristica fragrans*) y 25 % de harina de verde (*Musa paradisiaca* L), presentan una textura quebradiza debido a una mayor sustitución de harinas compuestas, además, enfatizaron que una textura suave, se debe al tipo de harina, azúcar y aceite agregados en la formulación.

En la aceptabilidad de los tratamientos, se observó que los tratamientos T4 y T5 obtuvieron el mejor nivel de aceptación con valoraciones de $7,47 \pm 1,25$ y $7,53 \pm 1,17$ respectivamente, mientras que, los tratamientos que se utilizaron concentraciones de 100 %, 75 % y 50 % de harina

de chocho fueron menos aceptables. Esto se debe a que el chocho confiere un sabor residual (semiamargo) en las galletas, sin embargo, al incluir el menor porcentaje 25 % de harina de chocho en la formulación de galletas, se logró obtener un producto de mayor aceptación por los catadores. En este sentido, Sanaguano-salguero *et al.* (2017) resaltan que, al sustituir la harina tradicional por otras harinas de especies como: zanahoria, altramuza y cebada, suele disminuir la aceptabilidad de los consumidores, por productos elaborados con estas alternativas de materia prima.

Conclusiones

La harina de chocho es una alternativa viable como ingrediente en la formulación de galletas, es por ello, que se concluye la incorporación hasta en un 25 % de harina de chocho en su elaboración permite obtener un producto con buenas características texturales. Además, es una buena fuente de proteína, grasa y fibra cruda; posee un bajo contenido de carbohidratos y buen aporte energético, lo que hace a la harina de chocho una excelente materia prima a nivel industrial, por su alto valor nutricional.

En relación con la evaluación sensorial, se atribuyen resultados positivos al tratamiento (T4), el cual presentó la mejor respuesta a las variables: olor, sabor, crujencia y aceptabilidad. De esta forma, se concluye que, en la formulación de galletas, se puede sustituir parcialmente la harina de trigo hasta un 25 % con harina de chocho. Además, es importante mencionar que, los tratamientos con mayores concentraciones de harina de chocho fueron menos aceptados que los elaborados convencionalmente con harina de trigo. Por lo cual, se hace necesario continuar desarrollando fórmulas de mezcla que logren mejorar el gusto por el producto.

Referencias

Akhtar, S., Anjum, F. M.U., Sheikh, M. A., & Farzana, K. (2008). Effect of fortification on physico-chemical and microbiological stability of whole wheat flour. *Food Chem*, 110(1), 113-9. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.01.065>

- Ani, E., & Okoye, J. (2021). Nutrient composition, physical and sensory properties of cookies produced from millet, african walnut and unripe plantain composite flours. *Journal of Food Science & Nutrition*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.24966/FSN-1076/100108>
- Apaza-Ahumada, M. (Jul de 2019). Efecto del consumo de cultivos andinos quinua, cañihua y tarwi sobre el incremento de peso y nitrógeno retenido en ratas Wistar. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 21(3), 194 - 204. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18271/ria.2019.477>
- Chiriguya-Salavarría, A. M. (2020). *Producción de una galleta incorporando en su formulación harinas obtenidas de chocho (Lupinus mutabilis) y cañihua (Chenopodium pallidicaule)*. Guayaquil: [Tesis de pregrado]. Universidad Agraria del Ecuador.
- Chirinos - Leal, W. d., & Vargas - Rincón, R. (2017). Analisis proximal de galletas de harina de trigo (*Triticum vulgare*): tapirama (*Phaseolus lunatus*) de pueblo nuevo de Paraguaná. *Revista Centro Azúcar*, 44, 1-9.
- De Camargo, A., Vidal, C., Canniatti-Brazaca, S., & Shahidi, F. (2014). Fortification of cookies with peanut skins: effects on the composition, polyphenols, antioxidant properties, and sensory quality. *J Agric Food Chem*, 19;62(46), 11228-35. <https://doi.org/10.1021/jf503625p>
- Food and Agriculture Organisation [FAO]. (2010). *Cultivos andinos subexplotados y su aporte a la alimentación*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. https://issuu.com/b.mendozaelizabeth/docs/cultivos_andinos_subexplotados_y_s1/4
- Gajanayaka, P., Jemziya, M., & Rifath, M. (2021). Production and nutritional evaluation of protein enriched cookies incorporated with Winged Beans (*Psophocarpus tetragonolobus*). *Journal of Bangladesh Agricultural University*, 19(4), 542-547. <https://doi.org/10.5455/JBAU.119656>
- Gangola, M. P., Ramadoss, B. R., Jaiswal, S., Fabek, H., Tulbek, M., Anderson, G. H., & Chibbar, R. N. (2022). Nutritional Composition and *in vitro* Starch Digestibility of Crackers Supplemented with Faba Bean Whole Flour, Starch Concentrate, Protein Concentrate and Protein Isolate. *Food*. <https://doi.org/10.3390/foods11050645>
- Hoyos-Vázquez, S., García-Castillo, S., Rodríguez-Delgado, J., & Praena-Crespo, M. (2021). Características nutricionales y composición de las galletas disponibles en el mercado español y de las galletas dirigidas a la población infantil. *Rev Pediatr Aten Primaria*, 22(86), 141- 50.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2011). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN - ISO 712:2010. Cereales y productos de cereales. Determinación del contenido de humedad. Método de referencia (IDT)*. Servicio Ecuatoriano de Normalización, Quito, Ecuador. <https://docplayer.es/51227176-Quito-ecuador-norma-tecnica-ecuatoriana-nte-inen-iso-712-2013-extracto.html>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2012a). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 519:2012. Harinas de origen vegetal. Determinación de proteína*. Servicio Ecuatoriano de Normalización, Quito, Ecuador. <https://ia802906.us.archive.org/28/items/ec.nte.0519.1981/ec.nte.0519.1981.pdf>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2012b). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 520:2012. Harinas de origen vegetal. Determinación de ceniza*. Servicio Ecuatoriano de Normalización, Quito, Ecuador. <https://es.scribd.com/doc/187738698/NTE-INEN-520-2012-Harina-Cenizas#>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2012c). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 522:2012. Harinas de origen vegetal. Determinación de fibra cruda*. Servicio Ecuatoriano de Normalización, Quito, Ecuador. <https://ia801902.us.archive.org/6/items/ec.nte.0522.1981/ec.nte.0522.1981.pdf>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2012d). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 523:2012. Harinas de origen vegetal. Determinación de grasa*. Servicio Ecuatoriano de Normalización, Quito, Ecuador. <https://ia802909.us.archive.org/25/items/ec.nte.0523.1981/ec.nte.0523.1981.pdf>
- Ikuomola, D. S., Otutu, O. L., Oluniran, D. D., & Yildiz, F. (2017). Quality assessment of cookies produced from wheat flour and malted barley (*Hordeum vulgare*) bran blends. *Cogent Food & Agriculture*, 3, Food & Agriculture. <https://doi.org/10.1080/23311932.2017.1293471>
- Kwaku, V., Sedem, C., Asante, D., & Adzinyo, O. (2016). Effects of Creaming Method and Flour Formulation on Acceptability and Proximate Characteristics of Cake from Corn, Wheat and Soya Bean Composite Flour. *Food Science and Quality Management*, 53, 1-6. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/234684271.pdf>
- Llerena-Carrera, L. A. (2022). Beneficios del chocho para mejorar la nutrición. *Qualitas*, 24(24), 066-075. <http://www.doi.org/10.55867/qual24.05>
- Machado - Soares, J., Teixeira, F., Lopes de Oliveira, M., Aparecida do Amaral, L., Fleming - de Almeida, T. D., Maluf - Hokama, L., Novello, D. (2022). Eggplant Flour Addition in Cookie: Nutritional Enrichment Alternative for Children. *Food*, 11(12), Foods. <https://doi.org/10.3390/foods11121667>
- Machuca Flores, M. L., & Meyhuay Soto, F. J. (2017). *Evaluación nutricional de galletas dulces con sustitución parcial por harina de arroz (Oryza sativa) y harina de lenteja (Lens culinaris)*. Tarma: [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional del Centro del Perú. Repositorio UNCP <http://hdl.handle.net/20.500.12894/4775>
- Malleret, A., Velazquez, M., Giudici, V., & Martinez, H. (2018). Análisis de parámetros texturales en galletas dulces libres de gluten elaboradas con diferentes aceites vegetales y enriquecidas con pasas de arándanos. *Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas*, (1-6). San Rafael - Argentina.
- Mofuluwaso, B., Adekunbi, K., & Joseph, D. (2017). Evaluación nutricional y aceptabilidad por parte de los consumidores de aperitivos chichin y galletas enriquecidos con hortalizas autoctonos infrautilizados. *Internacional Journal of Food and Nutritional Science*, 6(3). <http://www.ijfans.com/currentissue.php>

- Ndife, J., Kida, F., & Fagbemi, S. (2014). Production and quality assessment of enriched cookies from whole wheat and full fat soya. *European Journal of Food Science and Technology*, 2(2), 19-29. <http://www.eajournals.org/wp-content/uploads/Production-and-Quality-Assessment-of-Enriched-Cookies-from-Whole-Wheat-and-Full-Fat-Soya.pdf>
- Norhidayah, M., Noorlaila, A. & Nur Fatin Izzati, A. (2021). Textural and sensorial properties of cookies prepared by partial substitution of wheat flour with unripe banana (*Musa x paradisiaca* var. Tanduk and *Musa acuminata* var. Emas) flour. *International Food Research Journal*, 21(6), 2133-2139. [http://www.ifrj.upm.edu.my/21%20\(06\)%202014/11%20IFRJ%2021%20\(06\)%202014%20Noshidayah%20203%20\(1\).pdf](http://www.ifrj.upm.edu.my/21%20(06)%202014/11%20IFRJ%2021%20(06)%202014%20Noshidayah%20203%20(1).pdf)
- Okpala, L., Okoli, E., & Udensi, E. (2013). Physico-chemical and sensory properties of cookies made from blends of germinated pigeon pea, fermented sorghum, and cocoyam flours. *Food Sci Nutr.*, 1(1), 8-14. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2>
- Olagunju, A. I., Omoba, O. S., Enujiugha, V. N., & Aluko, R. E. (2018). Development of value-added nutritious crackers with high antidiabetic properties from blends of Acha (*Digitaria exilis*) and blanched Pigeon pea (*Cajanus cajan*). *Food Sci Nutr*, 6(7), 1791-1802. <https://doi.org/10.1002/fsn3.748>
- Ortega, M., Barboza, Y., Piñero, M. P., & Parra, K. (2016). Formulación y evaluación de una galleta elaborada con avena, linaza y pseudofruto del cauill como alternativa de un alimento funcional. *Mulciencias*, 16(1), 76-86. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90450808010>
- Patil, S., Brennan, M., Mason, S., & Brennan, C. (2016). The Effects of fortification of legumes and extrusion on the protein digestibility of wheat based snack. *Foods*, 5(2). <https://doi.org/10.3390%2Ffoods5020026>
- Ponce, M., Navarrete, D., & Vernaza, M. (2018). Sustitución Parcial de Harina de Trigo por Harina de Lupino (*Lupinus mutabilis* Sweet) en la Producción de Pasta Larga. *Información tecnológica*, 29(2), 1-10. <http://dx.doi.org/10.4067/So718-07642018000200195>
- Ponce-Rosa, F. (2018). Efecto de la sustitución parcial de la harina de trigo por harina de pulpa de café (*coffea arabica*) en el color, textura y contenido de minerales en galletas dulces. Pasco - Perú: [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Repositorio Nacional Daniel Alcides Carrión <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/1407>
- Puma-Isuiza, G. G., Liñan-Perez, J. F., Sánchez, I. C., Coronado-Olano, J., Salas-Valerio, W. F., & Vargas-Delgado, L. F. (2018). Vida en anaquel de galletas saladas utilizando pruebas aceleradas. *Anales científicos*, 7(1). <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v79i1.1166>
- Rajiv, J., Lobo, S., Lakshmi, J., & Rao, V. (2012). Influence of green gram flour (*Phaseolus aureus*) on the rheology, microstructure and quality of cookies. *Journal of Texture Studies*. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2012.00346.x>
- Sanaguano-Salguero, H., Tigre-León, A., Bayas-Morejón, F., & Ruilova-Cueva, B. (2017). Valor nutricional y propiedades sensoriales de galletas preparadas con mezclas de harina de zanahoria (*Daucus carota*), altramuz (*Lupinus perennis*) y cebada (*Hordeum vulgare*). *European Scientific Journal*, 13(9). <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n9p378>
- Sanz-López, C. (2017). Guía sobre el etiquetado de alimentos. Consejería de Sanidad de la Comunidad de Madrid. <https://www.madrid.org/bvirtual/BVCM020008.pdf>
- Sibian, M., & Riar, C. (2020). Formulation and characterization of cookies prepared from the composite flour of germinated kidney bean, chickpea, and wheat. *Legume Science*, 2(42), 1-12. <https://doi.org/10.1002/leg3.42>
- Soler-Martínez, N., Castillo-Ruiz, O., Rodríguez-Castillejos, G., Perales-Torres, A., & González Pérez, A. L. (2017). Análisis proximal, de textura y aceptación de las galletas de trigo, sorgo y frijol. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 67(3), 227 - 234. <https://www.alanrevista.org/ediciones/2017/3/art-8/>
- Soto-Rueda, A. M., Melgarejo-Figueroa, M. D., Maque-Ponce, M. L., Quispe-Sulca, V., Bocangel - Weyder, G., Huamán-De la Cruz, G. H., . . . Ballarte - Baylón, A. A. (2010). El chocho, complemento nutricional en gestantes adolescentes, Amarilis - Huánuco. *Investigaciones Valdizana*, 4(1), 37-40. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586061881008>
- Torres-González, J. D., Torres-Gallo, R., Acevedo-Correa, D., & Gallo-García, L. A. (2015). Evaluación instrumental de los parámetros de textura de galletas de limón. *Vector*, 10, 14 - 25. http://vector.ucaldas.edu.co/downloads/Vectorio_3.pdf

Caracterización fisicoquímica de los cereales y funcionalidad de las harinas de amaranto (*Amaranthus caudatus*) y quinoa (*Chenopodium quinoa*)

Physicochemical characterization of cereals grains and functionality of amaranth (*Amaranthus caudatus*) and quinoa (*Chenopodium quinoa*) flours

Karen Solange Urbina-Dícao^a  karen.urbina@pg.uleam.edu.ec; Stalin Gustavo Santacruz-Terán^a  stalin.santacruz@pg.uleam.edu.ec; Gina Mariuxi Guapi-Álava^b  ggguapi@uteq.edu.ec; Karol Yannela Revilla-Escobar^a  karol.revilla@pg.uleam.edu.ec; Jhonnatan Placido Aldas-Morejon^a  jhonnatan.aldas@pg.uleam.edu.ec

^aUniversidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador. Facultad Ciencias de la Vida y Tecnológicas.

^bUniversidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador. Facultad de Ciencias de la Industria y Producción – Agroindustria.

Recibido: 01/06/2023 Aceptado: 19/09/2023

Citar, APA: Urbina-Dícao, K. S., Santacruz-Terán, S. G., Guapi-Álava, G. M., Revilla-Escobar, K. Y. y Aldas-Morejon, J. P. (2023). Caracterización fisicoquímica de los cereales y funcionalidad de las harinas de amaranto (*Amaranthus caudatus*) y quinoa (*Chenopodium quinoa*). *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 10 (2), 33–41. <https://doi.org/10.23850/24220582.5708>

Resumen El amaranto y la quinoa, al igual que otros cereales, pueden emplearse para la obtención de productos con gran valor nutricional. Actualmente, son considerados alimentos básicos en la canasta familiar de los habitantes de las zonas andinas, esto ha conllevado a la necesidad de promover el desarrollo sostenible de sus cultivos. Por ello, el objetivo principal de este estudio se basó en evaluar las características fisicoquímicas de los cereales y las características funcionales de las harinas de amaranto y quinoa. Para el cual, se aplicó un modelo estadístico unifactorial completamente aleatorizado que constó de tres repeticiones. Donde se determinó que el amaranto presentó mayor contenido de proteína (12,41 %), grasa (6,74 %), carbohidratos totales (67,09 %) e índice de semilla (5,37 mg), en comparación a la quinoa que situó una mayor capacidad de hidratación (0,55 g/semillas) e hinchamiento (0,56 ml/semilla) de las semillas. En lo que comprende a las propiedades funcionales, el tipo de cereal no influye en las características de las harinas, debido a que no existió diferencia significativa ($p < 0,05$), sin embargo, se demostró que la harina de amaranto, tuvo una mejor capacidad de absorción (137,60 ml/100 g) y retención (83,60 ml/100 g) en agua, mientras que la harina de quinoa mayor capacidad de absorción (96,03 ml/100 g) y retención (90,50 ml/100 g) en aceite, por otro lado, harina de amaranto obtuvo una mayor actividad (3,00 %) y estabilidad (5,67 %) emulsionante, capacidad (2,52 %) y estabilidad (2,62 %) espumante. Por lo cual, se concluye que, los cereales estudiados, pueden ser utilizados para la obtención de harina y productos derivados de ellos.

Palabras clave: semillas, capacidad, hidratación, hinchamiento, funcionalidad.

Abstract Amaranth and quinoa, like other cereals, can be used to obtain products with high nutritional value. Currently, they are considered basic foods in the family basket of the inhabitants of the Andean zones, which has led to the need to promote the sustainable development of their crops. Therefore, the main objective of this study was to evaluate the physicochemical characteristics of cereals and the functionality of amaranth and quinoa flours. For this purpose, a completely randomized, one-factor statistical model was applied, consisting of three replicates. It was determined that amaranth had a higher content of protein (12,41 %), fat (6,74 %), total carbohydrates (67,09 %) and seed index (5,37 mg), compared to quinoa, which had a higher capacity for hydration (0,55 g/seed) and swelling (0,56 ml/seed) of the seeds. Regarding the functional properties, the type of cereal did not influence the characteristics of the flours, because there was no significant difference ($p < 0,05$), however, it was demonstrated that amaranth flour had a better absorption capacity (137,60 ml/100 g) and retention (83,60 ml/100 g) in water, while quinoa flour had a higher absorption capacity (96,03 ml/100g) and retention (90,50 ml/100 g) in oil, 60 ml/100 g) in water, while quinoa flour had a higher absorption capacity (96,03 ml/100 g) and retention (90,50 ml/100 g) in oil, on the other hand, amaranth flour obtained a higher emulsifying activity (3,00 %) and stability (5,67 %), foaming capacity (2,52 %) and stability (2,62 %). Therefore, it is concluded that the cereals studied can be used to obtain flour and products derived from them.

Keywords: seeds, capacity, hydration, swelling, functionality.

Introducción

El amaranto (*Amaranthus caudatus*) y la quinua (*Chenopodium quinoa*) además de su potencial agronómico y capacidad de crecer en condiciones ambientales adversas, son considerados los más prometedores para coadyuvar en la seguridad alimentaria y combatir la malnutrición (Andrade-Cadena y Simbaña-Villarreal, 2013). También, son reconocidos como cultivos importantes en la soberanía alimentaria para la humanidad por sus propiedades nutricionales (FAO, 2011).

El amaranto posee entre un 12 a 19 % de proteína, reportándose la presencia de algunos aminoácidos como la lisina, valina, metionina, fenilalanina y treonina (Espitia-Rangel *et al.*, 2022). Además, contiene vitamina C, vitaminas del complejo B y vitamina A; es abundante en ácido fólico, calcio, fósforo y hierro, presenta un alto valor calórico, hidratos de carbono y fibra (Caisaguano-Salao, 2019).

Por su parte, la quinua también posee un alto contenido de proteína, entre 10 y 16 %, es rica en aminoácidos azufrados y fuente importante de lisina. A la quinua se le considera como el único alimento del reino vegetal que provee todos los aminoácidos esenciales, siendo superior al trigo, cebada y soya, comparándose favorablemente con la proteína de la leche (García *et al.*, 2019).

El amaranto al igual que la quinua carecen de gluten (su contenido de prolamina es menor a 0,01 %), por lo cual, son una alternativa alimenticia ideal en personas intolerantes al gluten o que presentan enfermedad celiaca. Además, contribuyen a reducir colesterol total, triglicéridos y presentan actividad antioxidante y antiinflamatoria (Caisaguano-Salao, 2019).

En Ecuador el 20,1 % de niños menores de 2 años padecen desnutrición crónica infantil (Instituto Nacional de Estadística y Censos

[INEC], 2023). Para enfrentar esta problemática, es necesario utilizar nuevas fuentes de proteínas e hidratos de carbono para desarrollar productos con un alto valor nutricional agregado, en este sentido las harinas obtenidas de tubérculos, legumbres, cereales y frutas que se sabe que al mezclarse mejoran su valor nutricional y capacidad funcional propio y de otros alimentos (Villarreal *et al.*, 2018).

Por lo antes expuesto, el objetivo del presente estudio se basó en la caracterización de los cereales y harinas de amaranto (*A. caudatus*) y quinua (*C. quinoa*), mediante los análisis fisicoquímicos de los cereales y evaluando las características funcionales en las harinas tales como: índice de absorción y solubilidad en agua, capacidad de retención de aceite, actividad emulsificante y capacidad de formar espuma.

Materiales y métodos

Las semillas de quinua y amaranto se obtuvieron del mercado municipal del cantón Guaranda, provincia de Bolívar, Ecuador. La molienda de los cereales se realizó empleando un molino artesanal (MAGISTER, Colombia), y seguidamente se efectuaron dos tamizados con dimensiones de 80 micras y posteriormente de 100 micras. Por último, la fracción retenida en el tamiz de mayor dimensión (100), se almacenó para su respectivo análisis.

Parámetros fisicoquímicos de los cereales: quinua y amaranto

Determinación de humedad, ceniza, proteína, grasa y carbohidratos

El análisis de humedad se determinó según el método de la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN ISO 712 - 2013 (INEN 2013a), para el cual colocó 5 g en una estufa, por un periodo de 2 h a 130 °C. En relación con el contenido de ceniza, se realizó por 3 h a una temperatura de 600 °C en una mufla, según lo estipulado en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2171 - 2013

(INEN, 2013b). La determinación del contenido de proteína y grasa se realizó de acuerdo al método de referencia SEF-PDU AOAC990.03 y SEF-G AOAC 920.39 en el laboratorio "Seidla". Mientras que los carbohidratos totales se obtuvieron siguiendo la metodología establecida por Sánchez-Aguilera *et al.*, (2023).

Capacidad de hidratación (CH), Capacidad de hinchamiento (CH*) e índice de semilla

Para evaluar la capacidad de hidratación e hinchamiento se empleó la metodología propuesta por Jitngarmkusol *et al.* (2008), donde se tomaron 50 g de cada cereal y se adicionaron a 100 ml de agua destilada por 24 horas a temperatura ambiente (22 °C), luego se escurrieron y se eliminó el exceso de agua. La Capacidad de hidratación (CH), se calculó como el aumento de masa después del remojo dividido por gramos de semilla, mientras que el hinchamiento (CH*) se calculó como el aumento de volumen al finalizar el remojo dividido por 50 semillas (ml/semilla). El índice de semilla entendiéndose como el peso obtenido en 100 semillas de cada cereal.

Propiedades funcionales de la harina de amaranto y quinoa

Índice de absorción (IA) y retención en agua (RA)

El índice de absorción y retención de agua en la harina obtenida a partir de amaranto y quinoa se evaluó de acuerdo a la metodología establecida por Chau y Huang (2003) y Jitngarmkusol *et al.* (2008), disolviéndose 1 g de cada muestra en 30 ml de agua destilada. Para determinar el índice de absorción (IA), cada muestra de harina se agitó por 1 h y posteriormente se centrifugó a 3900 rpm por un lapso de 40 min, mientras que las suspensiones de las muestras empleadas en la retención en agua (RA) la suspensión se agitó durante 24 h previo al proceso de centrifugado. Luego se eliminó el exceso de agua y se pesó nuevamente la muestra, para lo cual, se empleó la siguiente Ecuación 1:

$$\text{Ecuación 1 } X = PF - PI * 100$$

Siendo:

PF = Peso final

PI= Peso Inicial

IA y RA, se expresan como la cantidad de agua ligada por 100 gramos de muestra seca.

Capacidad de absorción (CA) y retención en aceite (RA*)

En la evaluación de la capacidad de absorción y retención en aceite de igual manera se emplearon los métodos propuestos por Chau y Huang (2003) y Jitngarmkusol *et al.* (2008), con la diferencia de que se reemplaza el agua por aceite de soja, CA y RA* se expresan como la cantidad de aceite ligado en 100 gramos de la muestra seca.

Actividad emulsionante (AE) y estabilidad emulsionante (EE).

Para determinar la actividad y estabilidad de la emulsión de la harina de amaranto y quinoa, se disolvió un 1 g de harina en 25 ml de agua destilada, y se dejó reposar por un periodo de 30 min a 20 °C, luego, se añadió 25 ml de aceite para emulsificar la mezcla con un agitador a 600 rpm durante 3 minutos, finalmente, la emulsión se centrifugó a 3900 rpm durante 5 minutos, se midió el volumen de la emulsión y AE se expresó como porcentaje de la capa emulsionada.

La estabilidad emulsionante (EE) se obtuvo siguiendo la metodología descrita por Jitngarmkusol *et al.* (2008), adicionalmente las muestras emulsionadas se calentaron a Baño María (85 °C por 15 min), luego se dejaron enfriar a temperatura ambiente para posteriormente centrifugarlas a 3900 rpm por 5 min. Esta se representa como la cantidad de harina emulsionada de la capa en el tubo de ensayo después de calentar.

Capacidad espumante (CE) y estabilidad espumante (EE*)

La capacidad espumante se estimó siguiendo la metodología de Jitngarmkusol *et al.* (2008), por lo cual se agregó 1 g de harina en 50 ml de agua destilada a 2900 rpm durante 5 min. El volumen de la muestra se midió en un cilindro graduado (50 ml) antes y después de agitar. Para medir la estabilidad de espuma, las muestras agitadas se almacenaron a temperatura ambiente (20 °C) por 4 h, tiempo durante el cual se midieron los volúmenes iniciales y finales.

Análisis estadístico

La valoración estadística consistió en un diseño unifactorial completamente aleatorizado, analizando las muestras por triplicado. Para determinar diferencia significativa entre las

medias de los tratamientos, se utilizó la prueba estadística de Tukey con un nivel de confianza del 95 %, empleando el software estadístico InfoStat

Resultados y discusión

En la **Tabla 1** se detallan los resultados fisicoquímicos de los cereales amaranto y quinoa. Donde se observó diferencia significativa ($p < 0,05$) en cuanto al contenido de humedad, demostrando que el amaranto presentó el mayor 14,19 %; mientras que, en la quinoa se determinó una humedad de 11,31 %. Estos valores son superiores por Mamani-Mayta *et al.* (2017), obtuvieron un contenido de 6,03 % para quinoa y 5,76 % en amaranto, por otro lado, Huamán *et al.* (2016), determinaron 9,30 % de humedad en quinoa.

Tabla 1

Parámetros fisicoquímicos de las semillas de quinoa y amaranto

Parámetro	Amaranto	Quinoa
Humedad (%)	14,19±0,21b	11,31±0,12a
Ceniza (%)	2,73±0,13b	2,38±0,29b
Proteína (%)	14,41±0,28b	12,49±0,59a
Grasa (%)	6,74±0,48b	5,72±0,23a
Carbohidratos totales (%)	67,09±1,02b	62,95±0,29a
Capacidad de hidratación (g/ semillas)	0,48±0,10a	0,55±0,02a
Capacidad de hinchamiento (ml/ semillas)	0,54±0,06a	0,56±0,05a
Índice de semilla (mg)	5,37 ±0,34a	4,29 ±0,38a

Nota. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) con la prueba Tukey, nivel de confianza 95%

El contenido de ceniza no presentó diferencia significativa entre el amaranto y la quinoa, sin embargo, se pudo observar que el amaranto obtuvo un porcentaje del 2,73 %, cuyo valor fue similar a lo reportado por Reynaga & Castelú (2017), quienes en su estudio obtuvieron un reporte de cenizas del 2,56 % a 2,70 % en amaranto, mientras que la quinoa presentó 2,38 %, valores que guardan relación a la investigación realizada por Sánchez *et al.* (2016) quienes estudiaron la semilla vainillo (*Inga paterno*) y obtuvieron un valor para cenizas de 2,41 %.

En cuanto a la variable proteína existió diferencia significativa ($p < 0,05$), donde se demostró que el amaranto situó un valor promedio de 14,41 %, varios investigadores han reportado contenidos de proteína que van desde 15 a 17,9 % en amaranto (Matías *et al.*, 2018).

Por otro lado, la quinoa presentó un contenido de proteína igual al 12,49 %, valor que se sitúa dentro del rango establecido por Rojas *et al.* (2016), los cuales determinaron resultados que oscilaron entre 10, 21 % a 18,39 %, además,

Arzapalo *et al.* (2015), obtuvieron valores promedio entre 11,19 % a 12,68 % en variedades de quinoa: Collana y Pasancalla negra.

En relación al análisis de grasa se determinó diferencia significativa ($p < 0,05$) entre los cereales estudiados, cuyo contenido más alto se posicionó en amaranto (6,74 %), valor que se situó por debajo de lo reportado por Bedón (2020), quien obtuvo 7,31 %. Así mismo, en relación al contenido graso de la quinoa (5,72 %), este resultado que fue similar a lo obtenido por Campos *et al.* (2022), quienes determinaron valores entre 5,37 % - 6,79 % en diferentes variedades de quinoa.

En relación a los carbohidratos totales presentes en los cereales estudiados, se determinó diferencias significativas ($p < 0,05$). Obteniéndose el mayor porcentaje en amaranto (67,09 %) mientras que la menor concentración se dio en la quinoa (62,95 %). En este sentido, el almidón es considerado el componente principal de los carbohidratos y se sitúa en alrededor del 60 % del peso seco en los cereales (Pathan & Siddiqui, 2022). De igual manera, se ha reportado que la cantidad de almidón en las semillas de amaranto es de aproximadamente 45 a 65 % (Baraniak & Kania, 2022). Adicionalmente, Repo-Carrasco *et al.* (2023) mencionaron en su estudio que el almidón de quinoa oscila entre 58,10 % a un 64,20 % del peso seco de la semilla con un índice glucémico bajo.

La capacidad de hidratación y capacidad de hinchamiento no presentaron diferencia significativa ($p > 0,05$) en los cereales al cabo de las 24 h. Sin embargo, se observó que la mayor capacidad de hidratación se obtuvo en los granos de quinoa con 0,55 g/50 semillas en comparación al amaranto que fue mínimamente diferente con 0,48 g/50 semillas. En relación con la capacidad de hinchamiento, presentaron valores entre 0,54 a 0,56 para los dos cereales estudiados. Los resultados obtenidos en amaranto fueron superiores a los reportados por Puente-Cuyago

(2016), quien obtuvo una capacidad promedio de hidratación de 0,80 g y una capacidad de hinchamiento de 0,55 ml. Mientras que la quinoa presentó valores similares a lo reportado por Angeli *et al.* (2020) quienes determinaron 0,50 g (CH) y 0,55 ml (CH*). Además, comparándose con el trigo y la cebada, la quinua presenta una mayor viscosidad, capacidad de absorción en agua y mayor capacidad de hinchamiento (Abd – El Samad *et al.*, 2018).

Al evaluar el índice de semillas se determinó que no existió diferencia significativa ($p > 0,05$) entre el amaranto y la quinoa, obteniéndose valores que oscilaron entre 5,37 mg a 4,29 mg respectivamente. En la investigación realizada por Rangel-Espitia *et al.* (2022) situaron valores entre 6,10 mg a 7,40 mg en las variedades de amaranto criolla y nutrisol, evaluando esta variable. En cambio, Mestanza-Uquillas *et al.* (2019) determinaron en la variedad de quinoa (Real Blanca) pesos promedios de 2,53 a 4,49 mg y enfatizaron que, el peso de las semillas está relacionado con el ciclo productivo y periodo de desarrollo de la especie.

En la **Tabla 2** se describen los datos obtenidos de la capacidad de absorción en agua (CAA) y retención en agua (CRA) de las harinas producidas a partir de amaranto y quinoa, los cuales, se determinó, para estas variables que no existió diferencias significativas ($p > 0,05$). Sin embargo, se observó que, el amaranto obtuvo el mayor contenido de CAA con 137,60 ml/100 g, valor que resultó inferior a lo señalado por Gonzalez *et al.* (2018) quienes obtuvieron 220 ml/100g en la variedad de *Amaranthus hypochondriacus* L. De igual manera, la capacidad de absorción en agua de la quinoa (127,97 ml/100 g), es inferior a lo reportado por Dussán – Sarria *et al.* (2019), quienes establecieron un valor de 93 ml/100 g. La absorción de humedad en la harina es un factor significativo en panificación debido a que se relaciona a la calidad y vida de anaquel del producto y rendimiento del proceso (Cerdeña-Mejía *et al.*, 2017).

Tabla 2

Capacidad de absorción y retención en agua y aceite de harinas de amaranto y quinua

Parámetro (ml/100g)	Amaranto	Quinoa
Capacidad de absorción en agua (CAA)	137,60±17,02a	127,97±11,34a
Capacidad de retención en agua (CRA)	83,60±12,80a	41,20±1,60a
Capacidad de absorción en aceite (CAA*)	94,13 ±9,07a	96,03 ±1,45a
Capacidad de retención en aceite (CRA)	87,60 ±10,31a	90,50±6,10 a

Nota. Letras iguales indican que no existió diferencias significativas ($p < 0,05$) con la prueba Tukey, nivel de confianza 95%

En relación con los análisis de capacidad de absorción en aceite (CAA*) y capacidad retención en aceite (CRA) no presentaron diferencia significativa ($p > 0,05$) en los dos cereales estudiados, aun así, la harina de quinua situó el mayor contenido en CAA* y CRA con 96,03 ml/100 g y 90,50 ml/100 g respectivamente. Autores como Rodríguez-Sandoval *et al.* (2012)

determinaron una capacidad de absorción en aceite de 68,7 ml/100 g en harina de papa y una capacidad de retención en aceite en harina de quinua de 90,50 ml/100 g. La capacidad de retención de aceite permite obtener los valores de retención de los componentes lipídicos (Ruiz-Garza *et al.*, 2017).

Tabla 3

Características funcionales de las harinas de los cereales (quinua y amaranto)

Harina	Actividad emulsionante (AE) (%)	Estabilidad emulsionante (EE) (%)	Capacidad espumante (CE) (%)	Estabilidad espumante (EE*) (%)
Amaranto	3,00 ± 0,50a	5,67 ± 1,04b	2,52 ± 0,78a	2,62 ± 0,10a
Quinoa	2,67 ± 0,24a	4,17 ± 0,70a	2,47 ± 0,95a	2,54 ± 0,20a

Nota. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) con la prueba Tukey, nivel de confianza 95%

En la **Tabla 3** se muestran los valores relacionados con la actividad emulsionante, estabilidad emulsionante, capacidad y estabilidad espumosa, donde no se observaron diferencia significativa ($p < 0,05$) entre los dos cereales analizados.

El amaranto presentó mayores resultados en las características funcionales, situando: AE (3,00 %), EE (5,6 %), CE (2,52 %) y EE* (2,62 %); mientras que, la quinua obtuvo menores valores con una AE (2,67 %), EE (4,17 %), CE (2,47 %) y EE* (2,54 %). Investigaciones similares también determinaron una actividad

emulsionante de 12,50 % en harina de cereal tef negro; estabilidad emulsionante de 8,3 % en harina de papa; capacidad espumante entre 44,67 % - 47,00 % en harina de trigo y una estabilidad espumante 88,5 % en harina de garbanzo (Fernández-Salvador, 2017; Tao *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2013).

Las características funcionales de las harinas son fundamentales para la calidad de los alimentos, además, son importantes para conocer el uso que se les puede dar ya sea para la elaboración de pan, pastas, galletas, entre otros. Es necesario, mencionar que, las propiedades

físicoquímicas intrínsecas reflejan la interacción compleja entre la composición, estructura y otros componentes de los alimentos, así como también, la naturaleza del ambiente en el que se asocian o miden (Chandra *et al.*, 2015).

Por su parte, Awuchi & Echeta (2019) hacen énfasis que, las características funcionales están influenciadas por los componentes del alimento, especialmente los carbohidratos, proteínas, grasas y aceites, humedad, fibra, cenizas y otros ingredientes o aditivos alimentarios agregados al alimento (harina), como alcoholes de azúcar.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en los análisis fisicoquímicos demostraron que las semillas de amaranto son una excelente fuente de proteína (12,41 %), con un contenido lipídico (6,74 %), carbohidratos totales (67,09 %) e índice de semilla (5,37 mg), mientras que la semilla de quinoa presentó mejor capacidad de hidratación (0,55 g/semillas) e hinchamiento (0,56 ml/semilla). En relación con las propiedades funcionales de las harinas, el tipo de cereal no influye significativamente en la capacidad de absorción y retención (de agua y aceite), Por otro lado, el tipo de cereal incidió en la estabilidad emulsionante de las harinas, siendo la obtenida del amaranto la de mayor estabilidad (5,67 %). De esta forma, se concluyó que la harina de amaranto y quinoa podrían ser utilizadas para la producción de alimentos con valor agregado aportando a la diversificación el uso de estos cultivos en la cadena de valor.

Referencias

- Abd - El-Samad, E., Hussin, S., El-Naggar, A., El-Bordeny, N., & Eisa, S. (2018). The potential use of quinoa as a new non-traditional leafy vegetable crop. *Bioscience Research*, 15(4), 3387-3403. <https://www.researchgate.net/publication/329758476>
- Andrade-Cadena, V., & Simbaña-Villarreal, A. (2013). Manejo agronómico del amaranto y quinoa con *Metarhizium anisopliae*. *Revista de Investigación, Docencia y Proyección Social*, 2(11), 5-11. <https://axioma.pucesi.edu.ec/index.php/axioma/article/download/381/371/>
- Angeli, V., Silva, P. M., Crispim-Massuela, D., Waleed-Khan, M., Hamar, A., Khajehei, F., . . . Piatti, C. (2020). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): An Overview of the Potentials of the "Golden Grain" and Socio-Economic and Environmental Aspects of Its Cultivation and Marketization. *Foods*, 9(2), 216. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/foods9020216>
- Arzapalo, D., Huamán, K., Quispe, M., & Espinoza, C. (2015). Extracción y caracterización del almidón de tres variedades de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) negra collana, pasankalla roja y blanca junín. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 81(1). http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810634X2015000100006&fbclid=IwAR0-bj2lHhfeDC8hqPBt2LUB8I83XVfoSxb5qYtNrfaY0q8wwqLZ8Ijsp7w
- Awuchi, C. G., & Echeta, K. C. (2019). Current Developments in Sugar Alcohols: Chemistry, Nutrition, and Health Concerns of Sorbitol, Xylitol, Glycerol, Arabitol, Inositol, Maltitol. *International Journal of Advanced Academic Research*, 5(11), 1 - 33. https://www.researchgate.net/publication/336923362_Current_Developments_in_Sugar_Alcohols_Chemistry_Nutrition_and_Health_Concerns_of_Sorbitol_Xylitol_Glycerol_Arabitol_Inositol_Maltitol_and_Lactitol
- Baraniak, J., & Kania-Dobrowolska, M. (2022). The Dual Nature of Amaranth—Functional Food and Potential Medicine. *Foods*, 11(4), 618. <https://doi.org/10.3390/foods11040618>
- Bedón, V. (2020). Efecto del reemplazamiento parcial de harina de trigo por harina de amaranto en las propiedades fisicoquímicas de una torta sin azúcar. [Tesis de pregrado]. Universidad de los Andes. Repositorio UNIANDRES <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/48962>
- Caisaguano-Salao, F. B. (2019). Caracterización de la harina de quinoa (*Chenopodium quinoa*) y amaranto (*Amaranthus*) para la elaboración de pasta. Riobamba: [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Chimborazo. Repositorio UNACH <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/6003>
- Campos, J., Acosta, K., & Paucar, L. (2022). Quinoa (*Chenopodium quinoa*): Composición nutricional y Componentes bioactivos del grano y la hoja, e impacto del tratamiento térmico y de la germinación. *Scientia Agropecuaria*, 3(13). <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.019>
- Cerda-Mejía, L., Cerda-Mejía, V. R., Plamala-Rosales, A., Morneo-Miranda, C., & Pérez-Martínez, A. (2017). Proteína de harinas de maíz, cebada, quinoa, trigo nacional y papa: características

- y funcionalidad como sustitutos de la proteína de harina de trigo. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 6(3), 201-216. <https://revistas.uea.edu.ec/index.php/racyt/article/view/82/86>
- Chandra, S., Singh, S., & Kumari, D. (2015). Evaluation of functional properties of composite flours and sensorial attributes of composite flour biscuits. *J Food Sci Technol*, 52(6). <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1427-2>
- Chau, C., & Huang, Y. (2003). Comparison of the chemical composition and physicochemical properties of different fibers prepared from the peel of citrus sinensis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 9. <https://doi.org/10.1021/jf025919>
- Dussán-Sarria, S., De la Cruz-Noguera, R. E., & Godoy, S. P. (2019). Estudio del perfil de aminoácidos y análisis proximal de pastas secas extruidas a base de harina de quinua y harina de chontaduro. *Información tecnológica*, 30(6), 93-100. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000600093>
- Espitia-Rangel, E., Martínez-Cruz, E., Lozano-Grande, A., Hortelano - Santa Rosa, R., Valverde-Ramos, M., & Sesma-Hernández, F. (2022). Calidad panadera y galletera de mezclas de harina integral de amaranto y refinada de trigo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(8), 1-11. <https://doi.org/https://doi.org/10.29312/remexca.v13i8.3162>
- Fernández Salvador, N. (2017). *Propiedades funcionales y químicas de harinas de distintas variedades de trigo sarraceno y tef*. Valladolid: [Tesis de posgrado]. Universidad de Valladolid. Repositorio UVA <https://doi.org/https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/29440/TFM-L355.pdf?sequence=1>
- Food and Agriculture Organisation [FAO]. (2011). Quinoa y amaranto - cereales sagrados. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://idepsalud.org/quinua-y-amaranto-cereales-sagrados/>
- García, A., Báez, J., Gallardo, C., García, N., Walle, A., Martínez, M., & Hernández, N. (2019). Caracterización Físicoquímica y efecto de la cocción en propiedades nutricionales del frijol *Vigna umbellata* Thumb. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 4, 1-6. <http://eprints.uanl.mx/23597/1/36.pdf?fbclid=IwAR2vbFv-quasMHQR5ccylgYT5ObqrOeRIVMaiwGbQovjIDZnW3yIjVrQ14A>
- Gonzalez, R., Bautista, M., Amaya, C., Báez, J., & Moreno, S. (2018). Evaluación tecno-funcional de la harina, aislado e hidrolizado proteico obtenidos de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.), quínoa (*Chenopodium quinoa* Willd) y chíá (*Salvia hispanica* L.). *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 3, 579-587. <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume3/4/9/96.pdf>
- Huamán, N., Yupanqui, G., Allcca, E., & Allca, G. (2016). Efecto del contenido de humedad y temperatura sobre la difusividad térmica en granos andino. *Rev. Soc. Quím. Perú*, 82(3), 1-13. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2016000300002
- Instituto Nacional de Estadística y Censo [INEC]. (2023). *Primera encuesta especializada revela que el 20.1% de los niños en Ecuador padecen de desnutrición crónica infantil*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/primera-encuesta-especializada-revela-que-el-20-1-de-los-ninos-en-ecuador-padecen-de-desnutricion-cronica-infantil/#::~:~:text=Los%20principales%20resultados%20son%3A,que%20sufren%20de%20desnutrici%C3%B3n%20cr%C3%B3nica>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2013a). Norma Ecuatoriana NTE INEN ISO 712- 2013. Cereales y productos de cereales. *Determinación del contenido de humedad. Método de referencia (IDT)*. Servicio Ecuatoriano de Normalización, Quito, <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte-inen-iso-712.pdf>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2013b). Norma Ecuatoriana NTE INEN 2171- 2013 Cereales, leguminosas y subproductos. *Determinación del rendimiento de cenizas por incineración (IDT)*. Servicio Ecuatoriano de Normalización, Quito, https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_iso_2171_extracto.pdf
- Jitngarmkusol, S., Hongsuwankul, J., & Tananuwong, K. (2008). Chemical compositions, functional properties, and microstructure of defatted macadamia flours. *Food Chemistry*, 23-30. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.01.050>
- Mamani-Mayta, D. D., Gutierrez-Durán, M. D., Serrudo-Juarez, J. A., & Gonzalez-Dávaloz, E. (2017). Parámetros de calidad de harinas de *Amaranthus caudatus* Linnaeus (amaranto), *Chenopodium quinoa* Willd (quinua), *Chenopodium pallidicaule* Aellen (kañahua), *Lupinus mutabilis* Sweet (tarwi). *Revista Con-Ciencia*, 5(1), 27-38. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2310-02652017000100003
- Matía-Luis, G., Hernández-Hernández, B. R., Peña-Caballero, V., Torres-López, N. G., Espinoza-Martínez, V. A., & Ramírez-Pacheco, L. (2018). Usos actuales y potenciales del Amaranto (*Amaranthus spp*). *Journal of negative & of positive results*, 3(8), 375-464. <https://doi.org/10.19230/jonnpr.2410>
- Mestanza-Uquillas, C., Zambrano-Calderón, K., Pinargote-Alava, J., Veliz-Zamora, D., Váscquez-Montufar, G., Fernández-García, N., & Olmos, E. (2019). Evaluación agronomica de genotipos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en condiciones agroclimáticas en la zona de Mocache. *Ciencia y Tecnología UTEQ*, 19-30. <https://doi.org/10.18779/cyt.v12i1.316>

- Pathan, S., & Siddiqui, R. A. (2022). Nutritional Composition and Bioactive Components in Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Greens: A Review. *Nutrients*, 13(8), 558. <https://doi.org/10.3390/nu14030558>
- Puente-Cuyago, A. (2016). Pregelatinización hidrotérmica del grano de Amaranto (*Amaranthus caudatus* L.): [Tesis de pregrado] Ambato: Universidad Técnica del Norte. Repositorio UTN <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/5692/2/03%20EIA%20395%20ARTICULO%20PERIODISTICO.pdf>
- Rangel-Espitia, E., Sesma-Hernández, L. F., Valverde-Ramos, M., González-Molina, L., Escobedo-López, D., & Aguilar-Delgado, M. (2022). Tiene el amaranto el potencial agronómico para ser un fenómeno mundial como la quinua. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(8). <https://doi.org/https://doi.org/10.29312/remexca.v12i8.2897>
- Repo-Carrasco, R., Espinoza, C., & Jacobsen, S. (2023). Valor nutricional y aprovechamiento de los cultivos andinos quinua (*Chenopodium quinoa*) y kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*). *Food Rev Int*, 19(179). <https://doi.org/10.1081/VIE-120018884>
- Reynaga, A., & Castelú, P. (2017). Diseño y construcción de un prototipo expansor continuo fluidizado para granos de amaranto (*Amaranthus caudatus*). *Revista Tecnológica*, 13(19). http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/scielo.php?pid=S1729-75322017000100003&script=sci_arttext&tlng=es&fbclid=IwAR3SSMSyCSO_rnRcUD3Vw3uxdbkptVaZ3KuqRojDUkhXPY7xr_Cs
- Rodríguez-Sandoval, E., Lascano, A., & Sandoval, G. (2012). Influencia de la sustitución parcial de la harina de trigo por harina de quinua y papa en las propiedades termomecánicas y de panificación de masas. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 15(1), 199-207. https://doi.org/http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-42262012000100021&script=sci_arttext
- Rojas, W., Vargas, A., & Pinto, M. (2016). La diversidad genética de la quinua: potenciales usos en el mejoramiento y agroindustria. *Rev. IAREN*, 3(2). http://www.scielo.org.bo/pdf/riarn/v3n2/v3n2_a01.pdf
- Ruiz-Garza, E., Nuñez-González, C., Amaya-Guerra, J., Baez-González, C., & Montemayor-Leal, A.-G. (2017). Caracterización funcional de fibras comerciales modificadas por medios físicos. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 2, 422-427. <http://eprints.uanl.mx/23740/1/75.pdf>
- Sánchez, N., Jiménez, C., Cardador, A., Del Campo, S., & Dávila, G. (2016). Caracterización física, nutricional y no nutricional de las semillas de Inga paterno. *Revista chilena de nutrición*, 43(4). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182016000400010>
- Sánchez-Aguilera, D. D., Santacruz-Terán, S. G., Aguayo-Pino, D. R., Revilla-Escobar, K. Y., Carrillo-Pisco, M. L., & Aldas-Morejón, J. P. (2023). Caracterización fisicoquímica de fréjol canario (*Vigna unguiculata*) y chocho guaranguito (*Lupinus mutabilis*) y su incidencia en la funcionalidad de harinas. *Revista Bases de la Ciencia*, 8(1), 38-50. <https://doi.org/https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v8i1.5452>
- Tao, C., Wang, K., Liu, X., Shi, W., Liu, Y., & Gou, E. (2020). Effects of Potato Powder and Starch on the Pasting, Rheological, and Thermal Properties of Dough. *Food Science and Technology Research*, 26(5), 579-587. <https://doi.org/https://doi.org/10.3136/fstr.26.579>
- Villarroel, P., Gómez, C., Vera, C., & Torres, J. (2018). Almidón resistente: Características tecnológicas e intereses fisiológicos. *Revista Chilena de Nutrición*, 45(3). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/s0717-75182018000400271>
- Xu, Y., Brardwaj, H. L., & Thomas, M. (2013). Composición química, propiedades funcionales y características microestructurales de tres garbanzos kabuli (*Cicer arietinum* L.) afectados por diferentes métodos de cocción. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos*. <https://doi.org/doi:https://doi.org/10.1111/ijfs.12419>

Physicochemical evaluation of acid whey obtained from doble crema cheese produced in Belén, Boyacá, Colombia

Evaluación fisicoquímica del lactosuero ácido obtenido del queso doble crema producido en Belén, Boyacá, Colombia

Erika Marcela Pineda^a  kaery88@hotmail.com; Golda Meyer Torres-Vargas^a  golda.torres@unad.edu.co; Heley Estefany Cepeda-Fonseca^a  heley.cepeda@hotmail.com;

^aUniversidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Grupo de Investigación GIAUNAD.
Programa de Ingeniería de Alimentos.

Received: 16/08/2023 Accepted: 02/10/2023

Citing, APA: Pineda, M. E., Torres-Vargas, G. M. y Cepeda-Fonseca, H. E. (2023). Physicochemical evaluation of acid whey obtained from doble crema cheese produced in Belén, Boyacá, Colombia. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 10 (2), 42–54. <https://doi.org/10.23850/24220582.5819>

Abstract The composition of acid whey makes it less usable, and it is an environmental and technical problem. This research aims to estimate the physicochemical characteristics of the doble crema cheese acid whey, from nine factories in the municipality of Belén in Boyacá. Laboratory methods were validated using the Lactoscan analyzer determinations and comparing them with reference methods. Accuracy was expressed in terms of relative error ($\% E_{det}$) and f- and p-values; then, correlation curves were elaborated. To perform the physicochemical characterization of whey, fat, Solids-Not-Fat (SNF), protein, lactose, pH, total ash, calcium, density, and acidity were determined. The statistic of the comparison between analysis methods showed low percentages of relative error, there were no significant differences, and they had correlation coefficients greater than 0,8. The results of the physicochemical characterization showed differences in the content of protein, SNF, lactose, fat, ash, calcium, acidity, and pH. Each manufacturer has a manufacturing process for cheese and whey. There were no statistical differences for SNF, density, lactose, fat, ash, and pH within each company. However, there were differences between protein and acidity, even though companies work with the same quality of raw material and processing, there are deficiencies in the coagulation, drainage, and conservation of the whey. The analyzed acid whey is a good source of protein, calcium, lactose and has low fat content, which is attractive for manufacturing food products.

Keywords: cheesemaking; cheese; whey; comprehensive food utilization.

Resumen La composición del lactosuero ácido hace que sea menos aprovechable y lo convierte en un problema ambiental y técnico. El objetivo de esta investigación consistió en estimar las características fisicoquímicas del lactosuero ácido producto del proceso de elaboración del queso doble crema de nueve empresas del municipio de Belén en Boyacá. Se llevó a cabo una validación de métodos de laboratorio entre las determinaciones obtenidas del equipo analizador Lactoscan y los métodos de referencia. La exactitud se expresó en términos de error relativo ($\% E_{det}$), la precisión mediante valor f y p, y se elaboraron curvas de correlación. Para la caracterización fisicoquímica de los lactosueros se determinó el contenido de grasa, SNG, proteína, lactosa, pH, cenizas totales, calcio, densidad y acidez. El análisis estadístico de la comparación entre métodos de análisis arrojó bajos porcentajes en el error relativo, no hubo diferencias significativas y se encontraron coeficientes de correlación mayores a 0,8. Los resultados de la caracterización fisicoquímica arrojaron diferencias para el contenido de proteína, SNG, lactosa, grasa, cenizas, calcio, acidez y pH. Cada empresa elabora el queso y el suero de manera diferente, en ellas no se registraron diferencias estadísticas para SNG, densidad, lactosa, grasa, cenizas y pH, pero sí para proteína y acidez. Esto se debe a que trabajan con la misma calidad y procesamiento de la materia prima, pero hay falencias en la coagulación, desuere y conservación del suero. Los lactosueros ácidos analizados son buena fuente de proteína, calcio, lactosa y tienen bajos contenidos de grasa, lo que los hace atractivos para la elaboración de productos alimenticios.

Palabras clave: fabricación de queso; queso; suero de leche; lactosuero; aprovechamiento integral de los alimentos.

Introduction

Whey is defined as a by-product of cheesemaking (Simonis *et al.*, 2019) and represents 80 – 90% of the volume of milk (Skryplonek *et al.*, 2019). It contains about 0,6 – 0,8 % of protein, 0,4 – 0,5 % of fat, 4,5 – 5,0 % of lactose, and 8,0 – 10 % of mineral salts. Depending on the coagulation method, it is possible to obtain acid whey (pH < 5,0) or sweet whey (pH between 6,0 and 7,0) (Kravtsov *et al.*, 2020). Globally, 50 % of the whey is processed using expensive technology, this exposes the current situation due to not having economic and environmentally friendly methodologies that favor its total and global use. The high production of whey (190 billion Kg/year) and the quality of its nutrients make it a promising source for food and bioengineering processes (Skryplonek *et al.*, 2019; Merkel, Fárová *et al.*, 2021; Rocha-Mendoza *et al.*, 2021; Fischer & Kleinschmidt, 2021; Shelke *et al.*, 2022). Technological advances have transformed it into other products such as proteins, bio-proteins, biopolymers, bioethanol, hydrogen, methane, and energy (Karim & Aider, 2022). European countries have the technology to take advantage of over 95 % of the whey they produce. It is used to prepare high-value products with functional properties of technological and commercial interest (Costa *et al.*, 2018; Buhler., 2019; Conde-Báez, 2019; Choi *et al.*, 2019; Da Silva Duarte *et al.*, 2020).

In Colombia, the cheese consumption has increased, so did whey production, thus generating around 1100 million Kg/year (Federación Colombiana de Ganaderos [FEDEGAN], 2021). In the Department of Boyacá, the Chiquinquirá Valley and the Industrial Corridor are the largest producers of cheese and generate high volumes of whey. The cheese companies from the municipality of Belén produce on average 2375,128 kg/day of doble crema cheese whey (Torres, 2021); 60 % of the companies transform it into ricotta cheese, and the rest is used as animal feed or is dumped at

effluents. Moreover, foreign trade policies in Colombia have given free access to powdered whey; by 2021, it was the third most imported dairy product 8811 t (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2021). This scenario should change, so actions from the government, industry, and academia must be favored so that the country processes its own whey.

Consumerism currently seek products that provide health benefits, and food designers focus on raw materials with functional components; whey fits in that line (Simonis *et al.*, 2019; Skryplonek *et al.*, 2019). There are many studies published that enable a better knowledge of its composition and behavior in the face of industrial processes (Karim & Aider, 2022), and providing and designing cost-effective forms of use, sustainability and management (Zandona *et al.*, 2021).

The composition of whey changes according to the type and way of cheesemaking, but also to the origin of the raw material, the heat treatment, the coagulation and conservation methods (Rocha-Mendoza *et al.*, 2021). Protein content is the most valuable constituent of whey due to its biological value, wide variety, and application of functional properties, as well as a plethora of health benefits associated with bioactive peptides derived from proteolytic processes (Skryplonek *et al.*, 2019; Simonis *et al.*, 2019; Lajnaf *et al.*, 2020; Rocha-Mendoza *et al.*, 2021; Zandona *et al.*, 2021; Da Silva Duarte *et al.*, 2020; Bustamante *et al.*, 2021; Karim & Aider, 2022). Lactose is considered one of the basic and most abundant components of whey (Menchik *et al.*, 2019), it is an ideal substrate for fermentation processes and to obtain valuable products (Ramírez-Navas, 2012). It offers health benefits such as favoring the absorption of several minerals, registering low glycemic index, and generating prebiotic effects by the production of galactooligosaccharides (Fischer & Kleinschmidt, 2021). In the industrial sector,

it can be used in confectionery, bakery (Posada *et al.*, 2011; Zandona *et al.*, 2021), and to obtain lactic acid, polylactic acid (PLA), pyruvic acid, acrylic acid, lactitol, mannitol, lactosyl urea, lactosaccharose, sorbitol, among others (Asunis *et al.*, 2020; Zandona *et al.*, 2021; Karim & Aider, 2022). Whey is low-fat, but it could confer turbidity and oxidation compounds due to deficiencies in preservation methods (Smith *et al.*, 2016; Skryplonek *et al.*, 2019). It contains a substantial number of phospholipids, which is attractive for populations who suffer cardiovascular events (Simonis *et al.*, 2019; Rocha-Mendoza *et al.*, 2021). The color of the whey is greenish yellow, and the solids content is around 6,7 % (Skryplonek *et al.*, 2019), but they may increase due to a fine content of casein and fat, which gives a white color to some of them (Ramírez-Navas & Rodríguez De Stouvenel, 2012). Whey acidity is caused by the high content of lactic acid (Merkel, Fárová, *et al.*, 2021), acid whey contains a greater amount than sweet whey, thus generating industrial disadvantages due to the instability of the lactate ions in drying processes (Rocha-Mendoza *et al.*, 2021).

Whey with high lactic acid content, low pH, and a high concentration of minerals cannot be used in the industry and becomes an environmental and technical problem, especially in small and medium-sized companies (Skryplonek *et al.*, 2019; Merkel, Fárová, *et al.*, 2021). It is an obstacle in the industry because the behavior of lactose in its amorphous state after drying and spraying processes generate crystalline forms and very hygroscopic powders, leading to products with a high degree of clumping and lower shelf life (Nielsen *et al.*, 2021; Bustamante *et al.*, 2021; Merkel, Fárová *et al.*, 2021; Rocha-Mendoza *et al.*, 2021). Therefore, other techniques should be used for the fractionation and concentration of proteins (Ramírez-Navas *et al.*, 2018), lactose, and minerals or use acid whey directly in food processing. This research aims to contribute to the study of the chemical and physical characteristics of doble crema cheese acid

whey in dairy companies from Belén, Boyacá, Colombia, and then have a basic knowledge to propose potential uses, value generation, and business models that lead to a real application.

Materials and Methods

The study was carried out in nine doble crema cheesemakers located in the municipality of Belén, Boyacá, Colombia. It was carried out in two phases, as described in Pineda (2023): Phase I. Comparison of methods; and Phase II. Physicochemical characterization of the acid whey produced by these companies,

Phase I. Comparison of methods

The objective was to validate the accuracy, precision, and correlation of the physicochemical characterization made using the Lactoscan DP Milkotronic ultrasonic milk analyzer against the results of Association of Official Agricultural Chemists (AOAC) reference methods employed by an external certified laboratory (Table 1). The fat percentage was determined using AOAC 2000.18 (AOAC, 2019), SNF was determined by gravimetry, protein content was determined using AOAC 991.20I (AOAC, 2019), lactose was determined using AOAC 930.28 (AOAC, 2019) and pH was determined using AOAC 981.12 (AOAC, 2010). A dairy company participating in the research was selected and 18 acid whey samples of 500 mL were taken randomly at the draining stage prior to curd salting at days 1, 15, and 30. Samples were stored and transported to the laboratories in an expanded polystyrene refrigerator at a temperature of $4 \pm 0,1$ °C. All samples were analyzed on the same day of sampling.

Accuracy was expressed in terms of determined error (Edet) and relative determined error (% Edet), preciseness through the F-value, and probability of significance (P - value) through a Latin Square Design. The analysis of variance (ANOVA) was performed to determine

the dispersion and verify the reliability of the data given by the Lactoscan. Significant differences between group means were estimated at a 95 % significance level. The characterizations were made in triplicate. The data were tabulated and processed through the R statistical software version 4.0.2. To compare the methods, the following hypotheses were proposed: $H_{Research}$: "there are no significant differences between the results of the physicochemical analyses carried

out in the Lactoscan and those of the laboratory for the acid whey samples". H_{null} : "There are significant differences between the results or at least in one of the physicochemical analyses carried out in the Lactoscan and those of the reference laboratory for the acid whey samples." Correlation curves were made, obtaining linearity parameters such as slope of the line, intercept, and the correlation coefficient.

Table 1

Physicochemical characterization and reference methods employed by the external laboratory

Physicochemical Analysis	Method employed in the external laboratory	Principle
Fat (% m/m)	AOAC 2000.18 (AOAC, 2019)	Gerber's fat method by weight
SNF (%)	Ultrasound	Ultrasound
Protein (% m/m)	AOAC 991.201: (AOAC, 2019)	Kjeldahl
Lactose (% m/m)	AOAC 930.28: (AOAC, 2019)	Gravimetric method
pH	AOAC 981.12: (AOAC, 2010)	Potentiometer

Note. This table presents the physicochemical analyses and AOAC methods employed for each determination.

Phase II. Physicochemical characterization of acid whey

After verifying the accuracy, precision, and correlation of the test results, the physicochemical characterization of the doble crema cheese acid whey produced by nine dairy companies in the municipality of Belén, Boyacá, was carried out using the ultrasonic milk analyzer. For this, 27 samples of 1000 mL each were taken over three process dates (1, 15, and 30 days) immediately after the draining stage prior to curd salting. Samples were stored and transported to the UNAD Duitama chemistry laboratory in an expanded polystyrene refrigerator at a temperature of $4 \pm 0,1$ °C. All samples were analyzed on the same day of sampling. The fat (% m/m) was determined using the Lactoscan following the Gerber method, SNF (%) by gravimetry, protein (% m/m) by the Kjeldahl method, lactose (% m/m) and applying the Official Methods of Analysis of AOAC it was determined pH by AOAC 981.12 (AOAC, 2010), total ash percentage by

AOAC 945.46 (AOAC, 2019), calcium in mg/100 g by AOAC 985.35 (AOAC, 2019), density by AOAC 962.37 (AOAC, 2000), acidity as lactic acid (% m/m) by AOAC 947.05 (AOAC, 2000) and titration with 0.1 N NaOH; all previous analyses were conducted through analytical tests in the CEAD Duitama Chemistry laboratory, except for the calcium content which is calculated in a certified external laboratory.

All analyses were performed in the CEAD Duitama Chemistry laboratory, except for the calcium content that was determined in a certified external laboratory. The results obtained were compared with the values allowed in the resolution 02310:1986, "Dairy By-products" (Ministerio de Salud, 1986). A completely randomized block design was formulated, the analysis of variance (ANOVA) was conducted, and significant differences between the means were estimated at a 95 % significance level. The characterizations were made in triplicate. Quality control graphs were

made (graphs X) to determine whether the physicochemical parameters of acid whey meet the regulatory standards, and to analyze the variability of the process and its impact on the quality of whey and doble crema cheese. The data were tabulated and processed through R statistical software version 4.0.2.

RESULTS AND DISCUSSION

Phase I. Comparison of methods and analysis

Table 2, shows results obtained for each physicochemical parameter determined by the Lactoscan SP Milkotronic ultrasonic milk analyzer and by the conventional reference methods.

The means obtained by the comparison method for protein (%), fat (%), and density

(Kg/m³) were consistent since they recorded a low dispersion between data. For the parameters SNF (%), lactose (%), and pH, the value of the standard deviation is higher, thus they generate a higher degree of dispersion. However, it is inferred that the obtained values give reliable information of the average of each determination when using the Lactoscan.

The mean value of the protein content (%) obtained by the Lactoscan has an accuracy of 0,03 % with respect to the value accepted as a reference, the difference between means had an *f*-value of (0,02) and a *p*-value > 0,05, indicating homogeneity in the measurements by both methods. The correlation coefficient was 0,81, which indicates a linear association between methods. Since the automated method uses the Kjeldahl method as a principle, the same one that was employed to determine the AOAC 991.20I (AOAC, 2019) reference value, it leads to these results.

Table 2

Statistics to verify the precision, accuracy, and correlation between the results obtained by the Lactoscan and the reference methods.

Statistical determination	Protein (%)	Fat (%)	SNF (%)	Lactose (%)	Density (Kg/m ³)	pH
Mean (EL)*	2,75	2,38	7,99	6,35	1,027	4,53
Mean (MR)	2,75	2,02	7,98	6,25	1,027	4,60
Dev. Standard (EL)*	0,08	1,36	0,56	0,40	0,0014	0,16
E _{det}	0,0007	0,36	0,009	0,10	0,0007	-0,07
% E _{det}	0,03	18,06	0,11	1,60	0,07	-1,43
Accuracy: F-value (F _t 1,12: 4,747	0,02	3,87	0,01	3,09	0,04	3,72
Accuracy: P-value (α=0,05)	0,89	0,052	0,92	0,056	0,84	0,053
Slope Intercept	1,73	1,08	0,9838	0,4613	0,0552	0,0552
Slope of the line	0,35	1,447	1,0016	1,0899	0,9469	0,9469
Correlation Coefficient	0,81	0,96	0,90	0,97	0,96	0,82

Note. * EL: Lactoscan SP Milkotronic ultrasonic milk analyzer. **MR: Reference methods employed in the external laboratory.

The fat content (%) shown by the Lactoscan equipment presents a deviation of 18,06 % from the reference value. The *f*-value (3,87) and the *p*-value (0,052) indicate that there

are no statistical differences between the measurements. The correlation coefficient (0,96) shows a strong positive association between the methods, maybe because the

automated method uses the Gerber method as a principle, the same that was used to determine the AOAC 2000.18 (AOAC, 2019) reference value. The Lactoscan SNF (%) determinations present an accuracy of 0,11 %, an f-value of 0,1 with a p -value $> 0,05$, and a positive correlation of 0,90; thus, they show uniformity between the methods. Regarding lactose (%), the comparison of results showed an accuracy of 1,6 %, an f-value of 3,09 with a p -value $> 0,05$, and a positive correlation of 0,97; thus, coherence between the two methods was observed. The density values (Kg/m^3) obtained by the procedures recorded an accuracy of 0,07 %, statistical homogeneity ($f = 0,04$, $p = 0,84$), and a positive linear correlation of 0,96; thus, it indicates equality between results. Regarding pH, the deviation from the mean reference value was lower by 1,43 %, indicating that the ultrasonic automated equipment determinations were lower than those obtained by the reference values, but the comparisons among determinations are consistent according to the test: $f = 3,72$, p -value $> 0,05$, and the determination of a positive linear association of 0,82.

Phase II. Physicochemical characterization of the acid whey

Table 3 presents the results of each physicochemical parameter given by the Lactoscan SP Milkotronic ultrasonic milk analyzer for the acid whey samples from each company. Quality control graphs (*X-graphs*) of each parameter are presented in Figure 1. Each physicochemical determination is discussed below, as presented by Pineda (2023).

The SNF of each acid whey sample showed significant differences among them ($p < 0,05$). Each company tries to manage the same origin of the raw material and processing; the three sampling dates did not register significant differences ($p > 0,05$). The whey samples have an average of $7,05 \% \pm 0,22$ SNF and between 6,67 - 7,43 %, values higher than those shown in other studies. Menchik *et al.* (2019) report 3,3 - 3,7 %; Lievore *et al.* (2015), 6 %; Skryplonek *et al.* (2019), 6,4 %; Rocha-Mendoza *et al.* (2021), 6,5 %; Shelke *et al.* (2022), 6,7 %.

Table 3

Physicochemical characteristics of doble crema cheese acid whey.

Company	SNF (%)	Protein (%)	Lactose (%)	Fat (%)	Total ash (%)	Calcium (mg/100 g)	Acidity (%)	Density	pH
Comp1	7,16 $\pm$ 0,2 ^a	2,54 $\pm$ 0,1 ^a	3,52 $\pm$ 0,1 ^a	0,04 $\pm$ 0,03 ^a	0,59 $\pm$ 0,0 ^a	108 $\pm$ 0,2 ^c	0,40 $\pm$ 0,1 ^a	1,026 $\pm$ 0,0 ^a	5,22 $\pm$ 0,1 ^a
Comp2	7,24 $\pm$ 0,4 ^b	2,57 $\pm$ 0,1 ^b	3,57 $\pm$ 0,1 ^b	0,21 $\pm$ 0,4 ^b	0,56 $\pm$ 0,0 ^c	85 $\pm$ 0,4 ^b	0,84 $\pm$ 0,5 ^b	1,027 $\pm$ 0,0 ^a	4,37 $\pm$ 0,2 ^b
Comp3	7,29 $\pm$ 0,04 ^c	2,64 $\pm$ 0,02 ^c	3,87 $\pm$ 0,1 ^c	0,63 $\pm$ 0,1 ^c	0,63 $\pm$ 0,01 ^e	126 $\pm$ 0,0 ^a	0,58 $\pm$ 0,1 ^c	1,027 $\pm$ 0,0 ^a	4,83 $\pm$ 0,3 ^c
Comp4	6,77 $\pm$ 0,06 ^d	2,42 $\pm$ 0,03 ^d	3,42 $\pm$ 0,1 ^d	0,22 $\pm$ 0,1 ^d	0,57 $\pm$ 0,0 ^c	118 $\pm$ 0,1 ^b	0,44 $\pm$ 0,1 ^d	1,025 $\pm$ 0,0 ^a	5,20 $\pm$ 0,4 ^d
Comp5	7,08 $\pm$ 0,1 ^e	2,54 $\pm$ 0,1 ^e	3,68 $\pm$ 0,2 ^e	0,48 $\pm$ 0,3 ^e	0,47 $\pm$ 0,01 ^g	144 $\pm$ 0,1 ^d	0,52 $\pm$ 0,2 ^e	1,026 $\pm$ 0,0 ^a	4,86 $\pm$ 0,5 ^e
Comp6	6,95 $\pm$ 0,2 ^f	2,48 $\pm$ 0,1 ^f	3,49 $\pm$ 0,2 ^f	0,15 $\pm$ 0,2 ^f	0,59 $\pm$ 0,0a ^b	113 $\pm$ 0,2 ^e	0,41 $\pm$ 0,1 ^f	1,026 $\pm$ 0,0 ^a	4,91 $\pm$ 0,6 ^f
Comp7	6,76 $\pm$ 0,2 ^g	2,39 $\pm$ 0,1 ^g	3,34 $\pm$ 0,02 ^g	0,12 $\pm$ 0,1 ^g	0,59 $\pm$ 0,0 ^b	127 $\pm$ 0,2 ^a	0,38 $\pm$ 0,1 ^g	1,025 $\pm$ 0,0 ^a	5,18 $\pm$ 0,7 ^g
Comp8	7,16 $\pm$ 0,3 ^h	2,52 $\pm$ 0,1 ^h	3,56 $\pm$ 0,1 ^h	0,23 $\pm$ 0,2 ^h	0,53 $\pm$ 0,01 ^h	84,8 $\pm$ 0,3 ^f	0,31 $\pm$ 0,2 ^h	1,026 $\pm$ 0,0 ^a	5,85 $\pm$ 0,8 ^h
Comp9	7,01 $\pm$ 0,6 ⁱ	2,62 $\pm$ 0,2 ⁱ	4,27 $\pm$ 0,5 ⁱ	3,41 $\pm$ 0,1 ⁱ	0,65 $\pm$ 0,0 ⁱ	204 $\pm$ 0,6 ^g	0,52 $\pm$ 0,2 ⁱ	1,027 $\pm$ 0,0 ^a	4,5 $\pm$ 0,9 ⁱ

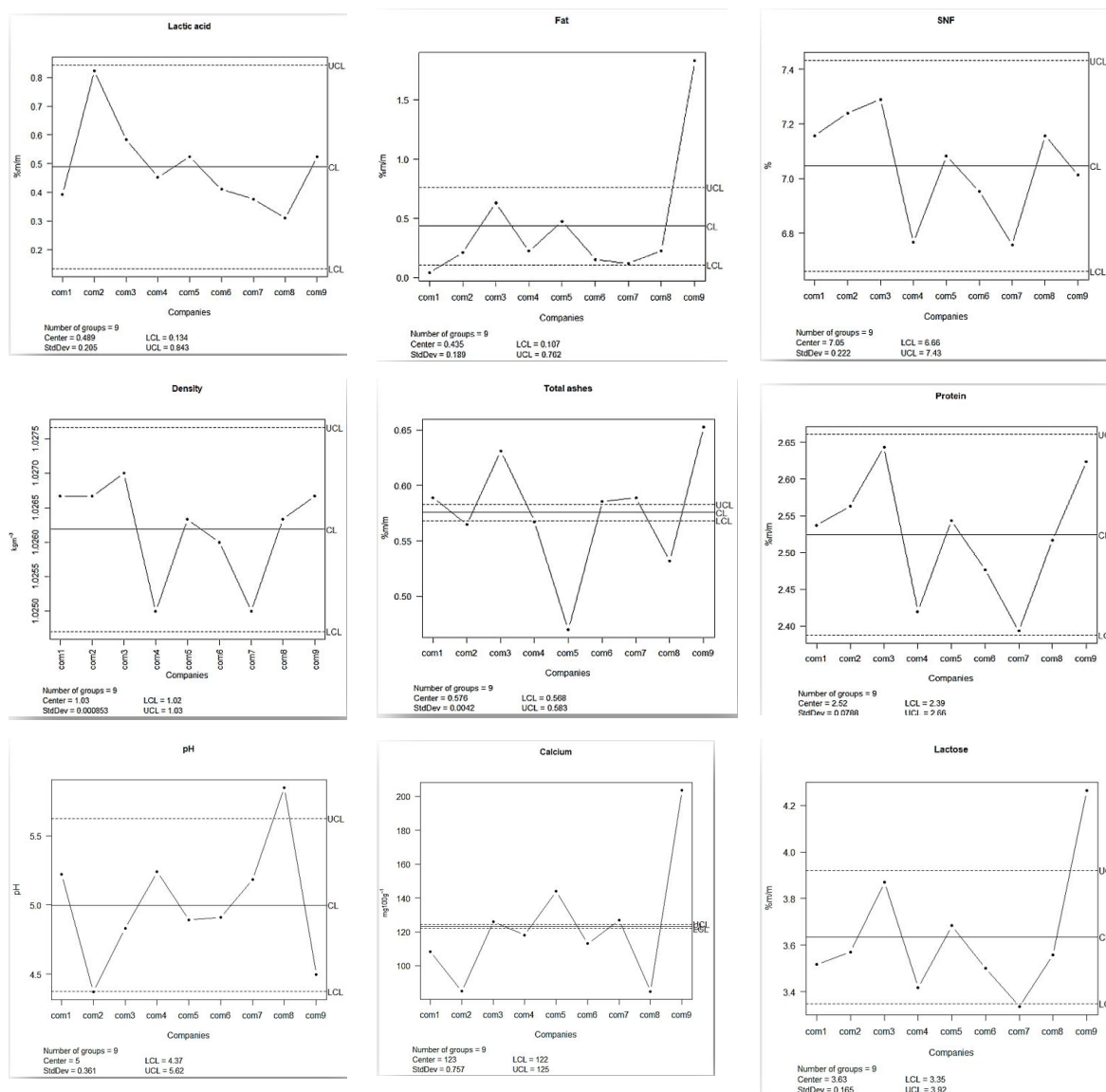
Note. The table presents the statistical means followed by the standard deviations ($\pm$). Different letters in the same column indicate significant differences ($p \leq 0,05$) according to the LSD test.

The quality graphs (Figure 1) present a process with a stability pattern since the SNF contents are within the control limits. However, a high SNF content in whey suggest reviewing

and monitoring the draining stage because of the migration of casein solids, which alters the characteristic color (Figure 2).

Figure 1

Quality control graphs (-X graphs) of each physicochemical characterization of acid whey samples.



Nota. The authors.

Regarding density, the ANOVA did not register significant differences ($p > 0,05$) among companies and sampling dates. Values ranging from 1,024 – 1,027 kg/m³ were obtained and on average $1,026 \pm 0,0$ kg/m³, close to those reported by Skryplonek et al. (2019) of 1,025 g/mL.

The quality graphs (Figure 1) presented a stability pattern since all the points are within the control limits. They indicate that the migration of casein solids to whey is constant in all companies and validated the arguments that the draining stage is done differently in each

company in terms of the intensity of the cutting, agitation, and temperature management. There is no standard process for making cheese of a

specific type; therefore, the cheese yield in these companies must be evaluated.

Figure 2

Acid whey samples obtained after the coagulation process of doble crema cheese.



The statistical analysis indicates that the protein content of the doble crema cheese acid whey recorded significant differences among companies ($p = 0,0071$) and process dates ($p = 0,0476$). The whey recorded a protein content of 2,39 – 2,67 % and on average $2,52 \% \pm 0,08$, a content greater than that set in Resolution 2310 (1986) (0,7 %) but close to that reported by Simonis *et al.* (2019) of 2,26 %.

The analysis of protein values from similar studies are variable and depend on several factors ranging from the origin of the raw material to the type of cheese to be made (Smith *et al.*, 2016), but the most influencing factor are milk clotting and obtaining the whey. In enzymatic denaturation processes, the protein content is higher and can range from 0,97 – 1,22 % (Lievore *et al.*, 2015) or 3,2 to 4,35 mg/g (Menchik *et al.*, 2019), while the acid pathway generates values lower than 0,48 % (Smith *et al.*, 2016), 0,55 % (Rocha-Mendoza *et al.*, 2021), and 0,94 % (Shelke *et al.*, 2022). When fractionation and purification processes were applied to acid whey, obtaining values of 10,3 – 10,5 % by nanofiltration, and 17, 65 % by ultrafiltration (Wronkowska *et al.*, 2018; Merkel, Voropaeva *et al.*, 2021). The obtained data (Table 3) are superior to those recorded in

the literature. Two key factors are considered to report high protein content: deficiencies in the coagulation process and the non-application of heat treatments to post-draining whey. The quality control graphs (*X-graphs*) of protein (Figure 1) present a process under the control limits, but the behavior of the data indicates a variability with respect to the mean. Therefore, it is possible to infer a migration of casein solids to whey in different proportions. Companies do not apply thermal methods to preserve whey, this can also explain the high protein content because high temperatures cause protein denaturation that can generate a detriment in its content (Smith *et al.*, 2016). The results show acid whey with a good protein content and can be considered a high nutritional source in food products.

Lactose is the major component of acid whey in each company (Table 3). The statistical analysis determined differences between the data ($p = 0,001$), each company handles milk with different percentages of lactose; the origin of the milk is not the same for all. They have different suppliers but try to maintain the same origin of the raw material because there were no differences between sampling dates within each

company ($p > 0,05$). The average lactose content was $3,63 \% \pm 0,17$ and can range from 3,35 to 3,92 %, these values are below the standard (4,5 %) and those reported in Rocha-Mendoza *et al.* (2021) of 4,90 %, Shelke *et al.* (2022) of 4,37 %, Merkel, Fárová, *et al.* (2021) of 12,4 %. Nano and ultrafiltration techniques yield among 70 %, 63,51 % and 67 % lactose (Smith *et al.*, 2016; Merkel, Voropaeva *et al.*, 2021). The quality control graph (*X-graphs*) shown in **Figure 1** shows a high variability in lactose content despite 78 % of companies obtain acid whey with contents within the control limits.

The lack of homogeneity and dispersion with respect to the mean of the data is attributed to the lack of management and control to preserve whey, which favors the development of lactic acid. Menchik *et al.* (2019) reported values of 1,9 to 2,1 % of lactose and indicated that whey with these contents can be used in value-added products such as fermented and sports drinks, snacks and infant formulas, and other processes such as obtaining biogas, biodegradable packaging, and metabolites of industrial and pharmaceutical interest.

Regarding the fat content, statistical differences were evidenced between the samples ($p < 0,05$). This may be due to the actions of total or partial skimming of milk and the draining method. Within each company, the same conditions are maintained at least in the skimming stage. There were no differences between sampling dates ($p = 0,778$). The whey recorded a content of 0,11 – 0,76 % and on average $0,43 \% \pm 0,19$, values much higher than those reported by Smith *et al.* (2016) of 0,012 %, Simonis *et al.* (2019) of 0,026 %, Rocha-Mendoza *et al.* (2021) is 0,04 %, contents of 0,51 % have also been reported (Shelke *et al.*, 2022). The quality control graphs (*X-graphs*) of fat content exhibit variable and scattered behavior versus the average of the data, indicating that the skimming and draining operations are

not handled in the same way in all companies and can increase the fat content in whey. According to the literature, acid whey presents a characteristic of interest given that, when used as food ingredient, it would provide a low content of triglycerides, but a significant source of functional phospholipids (Rocha-Mendoza *et al.*, 2021).

Each company produces whey with different ash contents ($p < 0,05$), but it is the same ($p = 0,533$) between dates for the same company. Whey can record a mineral content between 0,57 and 0,58 % and on average $0,56 \% \pm 0,004$. These values are higher than those presented by Shelke *et al.* (2022) of 0,43 %, and lower than those set by the standard (0,8 %) and those found in Lievore *et al.* (2015) of 0,83 %; Menchik *et al.* (2019), 0,75 %; Rocha-Mendoza *et al.* (2021), 0,8 %; and Merkel, Voropaeva, *et al.* (2021), 0,67 %. Higher values of 5,89 % and 5,96 % have been reported when treating acid whey by nano and ultrafiltration (Wronkowska *et al.*, 2018).

The quality control graph (*X-graphs*) of the ash content (**Figure 1**) shows an out-of-control process, deducing that the mineral content is very variable, and a range cannot be determined. This may be due to multiple factors from genetics to feeding of cattle, as well as to the doble crema cheese making process. Along with proteins, the mineral content is one of the most important characteristics of whey for industrial use since it can contain up to 80 % of milk minerals. The results obtained (**Table 3**) indicate that acid whey can contribute a good mineral content to the products.

Regarding the calcium content, ANOVA showed differences among companies ($p < 0,05$) but not among sampling dates within each company ($p = 0,252$). This whey can record a calcium content of 122 – 125 mg/100 g and

on average $123 \pm 0,8$ mg/100 g. Menchik *et al.* (2019) presented similar results of 120 mg/100 g, and Rocha-Mendoza *et al.* (2021) of 120 – 128 mg/100 g. The quality control graphs (*X-graphs*) of calcium content (**Figure 1**) exhibit an out-of-control process by inferring that it is highly variable, and a given range cannot be determined. Like the ash content, there are several situations that can condition the presence of calcium in the acid whey, but the form of coagulation of the milk, obtaining the curd and the control of the pH, are those that most favor the formation of calcium dihydrogen phosphate. The lower the pH, the greater the amount of soluble calcium (Smith *et al.*, 2016; Merkel, Voropaeva, *et al.*, 2021) and the lower separation by clarification generating problems in the equipment, a negative aspect that mitigates exploitation actions (Merkel, Voropaeva, *et al.*, 2021; Rocha-Mendoza *et al.*, 2021). In this context, the direct use of acid whey is recommended, for instance, to manufacture dairy drinks to benefit from the nutritional contribution of the calcium content and other components.

Regarding the acid content expressed as percentage of lactic acid (%), the ANOVA showed statistical differences ($p < 0,05$) between companies and between sampling dates. It indicates that each unit performs the making process of doble crema cheese differently, and the management and conservation of whey do not favor the conversion to lactic acid, which can vary from 0,13 to 0,84 %. On average they can record $0,49 \% \pm 0,2$, the values obtained are between those presented by Smith *et al.* (2016) of 0,72 % and Skryplonek *et al.* (2019) of 0,49 %. The quality control graphs (*X-graphs*) of Figure 1 present a stability pattern given that all the points are within the control limits, but very far from the central axis. They also have a very wide range, generating values outside of those set in Resolution 2310: 1986 (Ministerio de Salud, 1986) and supporting the arguments that the factors may favor the formation of lactic acid after the draining process of cheese in each company. It indicates that the acidity increases

during the storage of the whey and is an indicator of bacterial growth (Smith *et al.*, 2016).

The pH values indicate that this is acid whey (**Table 3**). They recorded significant differences ($p = 0,019$) among companies, but not between sample dates for each company ($p > 0,05$). This whey can record values from 4,3 to 5,6 and on average $5 \pm 0,36$, close and similar to those presented by Smith *et al.* (2016) of 4,58; Skryplonek *et al.* (2019), 4,85; Simonis *et al.* (2019), 4,54; and Merkel, Voropaeva, *et al.* (2021), 4,58. The quality control graphs (*X-graphs*) of pH (**Figure 1**) present points outside the control limits. Additionally, there is a greater dispersion and a very wide range, indicating that the content of organic acids is variable as a result of the non-standardized coagulation of milk, since some companies use lactic or acetic acid and/or acid milk. The pH can decrease by the natural degradation of lactose to lactic acid in the absence of conservation methods.

Conclusion

The statistical analysis of the comparison of methods indicates that the results given by the Lactoscan SP Milkotronic ultrasonic milk analysis is a reliable alternative comparable with the reference methods; therefore, the proposed research hypothesis was accepted.

It is imperative to know the composition of whey to project its use in the industry. Therefore, it should be known as a co-product, instead of a by-product, to be used in different sectors. The significant differences in the studied parameters among acid whey samples is due to the way in each company produces the doble crema cheese. However, there are similarities in the manufacturing process. This is relevant to know the quality of the whey generated by this group of companies and ensure that it remains constant over time, thus allowing the valuation and decision-making on possible applications of acid whey.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the Research Management System–SIGI of Universidad Nacional Abierta y a Distancia for financing this research through internal call 008 of 2019, and FENALCO Capítulo Boyacá, Dairy Derivatives Cluster, for supporting the development of research as a strategically.

REFERENCES

- Asunis, F., De Gioannis, G., Dessì, P., Isipato, M., Lens, P., Muntoni, A., Poletti, A., Pomi, R., Rossi, A., & Spiga, D. (2020). The dairy biorefinery: Integrating treatment processes for cheese whey valorisation. *Journal of Environmental Management*, 276:111240. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.111240>
- Buhler, S., Solari F., Gasparini, A., Montanari, R., Sforza, S., & Tedeschi, T. (2019). UV irradiation as a comparable method to thermal treatment for producing high quality stabilized milk whey. *Food Science and Technology LWT*, 105:127–134. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.01.051>
- Bustamante, S., González, G., Sforza, S., & Tedeschi, T. (2021). Bioactivity and peptide profile of whey protein hydrolysates obtained from Colombian double-cream cheese production and their products after gastrointestinal digestion. *Food Science and Technology LWT*, 145:111334. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.111334>
- Choi, J., Im, J., & Jang, A. (2019). Application of a volume retarded osmosis–low pressure membrane hybrid process for treatment of acid whey. *Chemosphere*, 219:261–267. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.055>
- Conde-Báez, L., López-Molina, A., Gómez-Aldapa, C. A., Pineda-Muñoz, C. F., & Conde-Mejía, C. (2019). Economic projection of 2-phenylethanol production from whey. *Food and Bioprocess Technology*, 115, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.02.004>
- Costa, N. R., Cappato, L. P., Ferreira, M. V. S., Pires, R. P., Moraes, J., Esmerino, E. A., Silva, R., Neto, R. P., Tavares, M. I. B., Freitas, M. Q., Júnior, R. N. S., Rodrigues, F. N., Bisaggio, R. C., Cavalcanti, R. M., Raices, R. S., Silva, M. C., & Cruz, A. G. (2018). Ohmic Heating: A potential technology for sweet whey processing. *Food Research International*, 106, 771–779. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.046>
- Da Silva Duarte, V., Carlot, M., Pakroo, S., Tarrah, A., Lombardi, A., Santiago, H., Corich, V., & Giacomini, A. (2020). Comparative evaluation of cheese whey microbial composition from four Italian cheese factories by viable counts and 16S rRNA gene amplicon sequencing. *International Dairy Journal*, 104:104656. <https://doi.org/10.1016/J.IDAIRYJ.2020.104656>
- Federación Colombiana de Ganaderos [FEDEGAN]. (2021). *Estadísticas*. En: Estadísticas Sector productivo. <https://www.fedegan.org.co/estadisticas/produccion-0> accessed: Jun 2023
- Fischer, C., & Kleinschmidt, T. (2021). Valorisation of sweet whey by fermentation with mixed yoghurt starter cultures with focus on galactooligosaccharide synthesis. *International Dairy Journal*, 119, 105068. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105068>
- Karim, A., & Aider, M. (2022). Production of prebiotic lactulose through isomerisation of lactose as a part of integrated approach through Whey and Whey permeate complete valorisation: a review. *International Dairy Journal*, 126, 105249. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105249>
- Kravtsov, V., Kulikova, I., Mikhaylin, S., & Bazinet, L. (2020). Alkalinization of acid whey by means of electrodialysis with bipolar membranes and analysis of induced membrane fouling. *Journal of Food Engineering*, 277, 109891. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109891>
- Lajnaf, R., Trigui, I., Samet-Bali, O., Attia, H., & Ayadi, M. A. (2020). Comparative study on emulsifying and physico-chemical properties of bovine and camel acid and sweet wheys. *Journal of Food Engineering*, 268, 109741. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109741>
- Lievore, P., Simões, D. R. S., Silva, K. M., Drunkler, N. L., Barana, A. C., Nogueira, A., & Demiate, I. M. (2015). Chemical characterisation and application of acid whey in fermented milk. *Journal of Food Science and Technology*, 52(4), 2083–2092. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1244-z>
- Menchik, P., Zuber, T., Zuber, A., & Moraru, C. I. (2019). Short communication: Composition of coproduct streams from dairy processing: acid whey and milk permeate. *Journal of Dairy Science*, 102(5), 3978–3984. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15951>
- Merkel, A., Fárová, H., Voropaeva, D., Yaroslavl'tsev, A. B., Ahrné, L., & Yazdi, S. R. (2021). The impact of high effective electrodialytic desalination on acid whey stream at high temperature. *International Dairy Journal*, 114, 104921. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104921>
- Merkel, A., Voropaeva, D., & Ondrušek, M. (2021). The impact of integrated nanofiltration and electrodialytic processes on the chemical composition of sweet and acid whey streams.

- Journal of Food Engineering*, 298, 110500. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110500>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). Análisis de Coyuntura Sector Lácteo – 2021/2022 1er Trimestre. Observatorio del Sector Lácteo. Recuperado 8 de julio de 2022, <http://uspleche.minagricultura.gov.co/index.html>
- Ministerios de salud. (1986). Resolución 02310. Procesamiento, composición, requisitos, transporte y comercialización de los Derivados Lácteos. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/OT/Resolucion-2310-de-1986.pdf>
- Nielsen, E. T., Merkel, A., Yazdi, S. R., & Ahrné, L. (2021). The effect of acid whey composition on the removal of calcium and lactate during electrodialysis. *International Dairy Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.104985>
- Official Methods of Analysis of AOAC (AOAC). (2010). AOAC Official Method 981.12, pH of Acidified Foods. <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-nacional-autonoma-de-mexico/legislacion-aduanera/aoac-98112-p-h-of-acidified-foods/40412603>
- Official Methods of Analysis of AOAC (AOAC). (2019). AOAC Official Method AOAC 930.28, lactose in milk. Gravimetric method munson-wal. <https://pdfcoffee.com/aoac-97216pdf-pdf-free.html>
- Official Methods of Analysis of AOAC (AOAC). (2019). AOAC 991.20I, Nitrogen(Total) in Milk - Kjeldahl Methods. <https://griegler-aoac-org.cld.bz/AOAC-Methods-in-Codex-STAN-234-Preliminary-Methods-Review/3/#zoom=z>
- Official Methods of Analysis of AOAC (AOAC). (2019). AOAC 2000.18, fat Content of Raw and Pasteurized Whole Milk. <http://www.smartjd.net/pdf/177/11285179.pdf>
- Official Methods of Analysis of AOAC (AOAC). (2019). AOAC 945.46, ash of milk. Gravimetric method. <https://es.scribd.com/document/468494419/AOAC-945-46-pdf>
- Official Methods of Analysis of AOAC (AOAC). (2019). AOAC 985.35, minerals in infant formula, Enteral products, and Pet foods. Atomic absorption spectrophotometric method. <https://es.scribd.com/document/312790072/C985-35-PDF>
- Official Methods of Analysis of AOAC (AOAC). (2000). AOAC 962.37, determination of the relative density. <https://www.coursehero.com/file/160777348/AOAC-Official-Method-93214-Solids-in-Syruppdf/>
- Official Methods of Analysis of AOAC (AOAC). (2000). AOAC method 947.05, acidity of milk Titrimetric. <https://es.scribd.com/document/468494415/AOAC-947-05-pdf>
- Pineda, E. (2022). *Caracterización química y técnica del lactosuero ácido para el aprovechamiento como materia prima en la industria de alimentos* [Proyecto de grado]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD.
- Posada, K., Terán, D. M., & Ramírez, J. S. (2011). *Empleo de lactosuero y sus componentes en la elaboración de postres y productos de confitería*. (292.a ed.). La Alimentación Latinoamericana.
- Ramírez-Navas, J. (2012). Aprovechamiento Industrial de Lactosuero Mediante Procesos Fermentativos. *Publicaciones E Investigación*, 6, 69. <https://doi.org/10.22490/25394088.1100>
- Ramírez-Navas, J. S., & Rodríguez de Stouvenel, A. (2012). Characterization of colombian quesoillo cheese by spectrophotometry. *Vitae*, 19(2), 178-185. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.7849>
- Ramírez-Navas, J. S., Solís Carvajal, C. A., & Vélez, C. A. (2018). Tecnología de membranas: obtención de proteínas de lactosuero. *Entre ciencia e ingeniería*, 12(24), 52-59. <https://doi.org/10.31908/19098367.3815>
- Resolución 2310 de 1986 [Ministerio de Salud y Protección Social]. Por la cual se reglamenta parcialmente el Título V de la Ley 09 de 1979, en lo referente a procesamiento, composición, requisitos, transporte y comercialización de los derivados lácteos. 14 de febrero de 1986.
- Rocha-Mendoza, D., Kosmerl, E., Krentz, A., Zhang, L., Badiger, S., Miyagusuku-Cruzado, G., Mayta-Apaza, A. C., Giusti, M. M., Jiménez-Flores, R., & García-Cano, I. (2021). Invited review: Acid whey trends and health benefits. *Journal of Dairy Science*, 104(2), 1262-1275. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19038>
- Shelke, P. A., Sabikhi, L., Khetra, Y., Ganguly, S., & Baig, D. (2022). Effect of skim milk addition and heat treatment on characteristics of cow milk ricotta cheese manufactured from cheddar cheese whey. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 162, 113405. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113405>
- Simonis, P., Kersulis, S., Stankevich, V., Sinkevicius, K., Striguniene, K., Ragoza, G., & Stirke, A. (2019). Pulsed electric field effects on inactivation of microorganisms in acid whey. *International Journal of Food Microbiology*, 291, 128-134. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.11.024>
- Skryplonek, K., Dmytrów, I., & Mituniewicz Małek, A. (2019). Probiotic fermented beverages based on acid whey. *Journal of Dairy Science*, 102(9), 7773-7780. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16385>
- Smith, S., Smith, T., & Drake, M. (2016). Short communication: flavor and flavor stability of cheese, rennet, and acid wheys. *Journal of Dairy Science*, 99(5), 3434-3444. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10482>

Torres, G. (2021). Cuerpo de conocimiento de la gerencia de proyectos PMBOK para el estudio de pre-inversión con evaluación de oportunidades de negocio en empresas lácteas del municipio de Belén, Boyacá [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/47848>

Wronkowska, M., Juśkiewicz, J., Zduńczyk, Z., Warechowski, J., Soral-Smietana, M., & Jadacka, M. (2018). Effect of high added-value components of acid whey on the nutritional and physiological indices of rats. *Journal of Functional Foods*, 50, 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.09.019>

Zandona, E., Blažić, M., & Jambrak, A. R. (2021). Whey Utilisation: Sustainable Uses and Environmental approach. *Food Technology and Biotechnology*, 59(2), 147–161. <https://doi.org/10.17113/ftb.59.02.21.6968>

Influencia de aditivos en humectabilidad del bionematicida HeberNem-S obtenido mediante secado por atomización

Influence of additives on the wettability of the HeberNem-S product obtained through spray drying

Yunier Luis Paneque-Díaz^a  yunier.paneque@cigb.edu.cu; Nemecio González-Fernández^a  nemecio.gonzalez@cigb.edu.cu; Lourdes Mariana Crespo-Zafra^b  lourdes.crespo@reduc.edu.cu; Jesús Zamora-Sánchez^a  jesus.zamora@cigb.edu.cu; Rutdali María Segura-Silva^a  ruthdaly.segura@cigb.edu.cu; Amaury Pérez-Sánchez^b  amaury.perez84@gmail.com

^aCentro de Ingeniería Genética y Biotecnología de Camagüey, Cuba. Grupo de Investigación-Desarrollo de Procesos Biotecnológicos. Departamento de Investigación y Desarrollo.

^bUniversidad de Camagüey, Cuba. Facultad de Ciencias Aplicadas. Departamento de Ingeniería Química.

Recibido: 31/03/2023 Aceptado: 03/10/2023

Citar, APA: Paneque-Díaz, Y. L., González-Fernández, N., Crespo-Zafra, L. M., Zamora-Sánchez, J., Segura-Silva, R. M. y Pérez-Sánchez, A. (2023). Influencia de aditivos en humectabilidad del bionematicida HeberNem-S obtenido mediante secado por atomización. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 10 (2), 55–66. <https://doi.org/10.23850/24220582.5587>

Resumen *Brevibacterium celere* C-924 es un microorganismo con una probada actividad nematicida, mediante el cual se han obtenido formulaciones en polvo (HeberNem-S) para su aplicación en casas de cultivo protegidas. El propósito de este trabajo consistió en realizar estudios de tamizado para determinar los factores y aditivos que más influencia tienen en la humectabilidad del producto HeberNem-S durante la operación de secado por atomización. Se realizó un experimento de superficie de respuesta donde se evaluaron los siguientes factores: concentración de sacarosa, sólidos solubles del medio de fermentación agotado, velocidad sincrónica del disco atomizador y la materia seca de la crema formulada sobre la humectabilidad del producto HeberNem-S. Los resultados del experimento demostraron que la variable que más influye en la humectabilidad del polvo es la concentración de sólidos solubles del medio de fermentación agotado que se añade en la formulación. Con base en estos resultados se evaluó la influencia de 16 aditivos, dentro de los cuales se encuentran azúcares, gomas, detergentes y agentes tensoactivos. Se determinó que los aditivos de mayor influencia en la humectabilidad son la lecitina de soja y el Glanapon, logrando una reducción del tiempo de humectabilidad de 19,18 veces y 17,5 veces, respectivamente. El resultado obtenido es de vital importancia para estudios posteriores de optimización frente a la composición del HeberNem-S, con el fin de garantizar las mejoras continuas del proceso de producción y las propiedades físicas del polvo.

Palabras clave: aditivos, glanapon, humectabilidad, lecitina de soja, secado por atomización, *Brevibacterium celere* C-924.

Abstract *Brevibacterium celere* C-924 is a microorganism with proven nematicide activity, through which powder formulations (HeberNem-S) have been obtained for application in protected cultivation houses. The aim of this work was to carry out screening studies to determine the factors and additives that have the most influence on the wettability of the HeberNem-S product during the spray drying operation. A response surface experiment was carried out where the following factors were evaluated: sucrose concentration, soluble solids of the spent fermentation medium, synchronous speed of the atomizing disc and the dry matter of the formulated cream on the wettability of the HeberNem-S product. The results of the experiment demonstrated that the variable that most influences the wettability of the powder is the concentration of soluble solids of the spent fermentation medium that is added to the formulation. Based on these results, the influence of 16 additives was evaluated, among which are sugars, gums, detergents and surfactants. It was determined that the additives with the greatest influence on wettability are soy lecithin and Glanapon, achieving a reduction in wettability time of 19.18 times and 17.5 times, respectively. The result obtained is of vital importance for subsequent optimization studies regarding the composition of HeberNem-S, in order to assure continuous improvements in the production process and the physical properties of the powder.

Keywords: additives, glanapon, wettability, soy lecithin, spray drying, *Brevibacterium celere* C-924.

Introducción

En la industria alimenticia, la técnica de secado por aspersión es comúnmente usada para producir diversidad de alimentos e ingredientes tales como la leche en polvo, polvo de suero/caseína, queso en polvo, huevo en polvo, cereal en polvo, alimentos secos para infantes, café/té instantáneo en polvo, jugo en polvo, sopa instantánea en polvo, pescado en polvo, así como también ingredientes saborizantes y colorantes (Selvamuthukumaran *et al.*, 2019).

También se ha reportado su aplicación para producir yogur endulzado en polvo (Seth *et al.*, 2016); polvo de guayaba (Patil *et al.*, 2014); aceite de girasol en polvo (Roccia *et al.*, 2014); jugo de caña de azúcar en polvo (Guzmán & Castaño, 2002); jugo de cebada verde en polvo (García *et al.*, 2004) y mango en polvo (Caparino *et al.*, 2012).

Por otra parte, en el área biotecnológica, el secado por aspersión ha sido estudiado para procesar microorganismos tales como; *Acidithiobacillus thiooxidans* (Núñez *et al.*, 2021); *Lactobacillus rhamnosus* GG (Kiekens *et al.*, 2019) y *Lactobacillus acidophilus* FTDC 3081 (Tang *et al.*, 2020) entre otros microorganismos.

Las plagas se encuentran entre los principales factores que conducen a pérdidas en las cosechas, y por consiguiente a una disminución en sus rendimientos. En la actualidad se observa una tendencia creciente a reducir el uso de plaguicidas químicos en la agricultura, debido principalmente al impacto negativo que los mismos han generado durante décadas en los ecosistemas, además de los riesgos que, desde el punto de vista toxicológico, implican el consumir alimentos relacionados, tanto directa como indirectamente, con la aplicación de tales productos (Fravel, 2005). Una

alternativa muy eficaz al uso de químicos ha sido la utilización de productos biológicos, también denominados bioproductos.

Los bioproductos tienen como ingrediente activo la presencia de un microorganismo, el cual actúa como biocontrolador de la plaga en cuestión, así como también mediante algún metabolito o molécula proveniente de este agente biocontrol (Fravel, 2005). Esta perspectiva de naturaleza biológica incrementa la naturalidad de las producciones agrícolas, con una mínima o nula influencia en la toxicidad medioambiental, obteniendo por tanto producciones más ecoamigables con el ambiente.

Los nemátodos hacen parte de las principales plagas causantes de pérdidas a nivel de cosechas. En este sentido, la bacteria Gram positiva *Tsukamurella paurometabola*, cepa C-924, ha demostrado controlar eficazmente este tipo de plagas (Mena *et al.*, 2003), actuando también como controladores biológicos de hongos fitopatógenos (Marín *et al.*, 2013) y se les consideran microorganismo promotor del crecimiento vegetal (Marín *et al.*, 2013) (Marín *et al.*, 2014), cuyo mecanismo de acción está sustentado en el efecto combinado de las actividades desulfurasa y quitinasa (Mena *et al.*, 2003). Considerando su actividad nematocida, especialistas del Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología [CIGB] han obtenido un bioproducto para uso agrícola denominado HeberNem, el cual puede ser una formulación líquida (HeberNem-L) o sólida (HeberNem-S) conteniendo la biomasa bacteriana de *T. paurometabola* C-924.

Desde el año 2019 el nombre del microorganismo *Tsukamurella paurometabola* fue modificado por *Brevibacterium celere* en virtud de la nueva reclasificación de la cepa C-924, de acuerdo con un análisis exhaustivo de datos

experimentales, incluyendo morfología celular, características fisiológicas y bioquímicas y secuenciación de gen 16S rRNA bajo condiciones de laboratorio (Yuguang & Lei, 2017).

El producto HeberNem-S es un bionematicida ecológico destinado a combatir los fitonemátodos *Meloidogyne* spp, *Radopholus similis* y *Pratylenchus* spp, el cual es producido mediante un proceso de fermentación sumergida de tipo diáuxico, empleando un medio abundante en sustratos tales como extracto de levadura y sacarosa (González *et al.*, 2013). Una vez terminada la fase de crecimiento, el caldo de fermentación es centrifugado, formulado y posteriormente secado por aspersión. La calidad del HeberNem-S está definida por el pH, humedad del polvo, cantidad de células viables, contaminantes microbianos, patógenos, características organolépticas, y uno de gran valor que es la re-suspendibilidad (CIGB, 2013).

Autores como Paneque, 2010; Ramos, 2011; Fillor, 2013 y Segura, 2013 han evaluado la operación de secado por atomización para la producción de HeberNem-S, empleando un atomizador de disco rotatorio. Además, Hernández *et al.* (2007) estudiaron la encapsulación de *T. paurometabola* (hoy *Brevibacterium celere*) C-924 en almidón mediante la tecnología de secado por atomización, así como también se realizó un estudio de estabilidad del polvo final obtenido mediante el método de estabilidad acelerada.

La humectabilidad de un polvo expresa su potencial de absorber agua a una determinada temperatura y la facilidad que va a tener el polvo a la hora de rehidratarse. Este método de análisis se usa solamente para polvo instantáneo. En este caso, la humectabilidad depende de la superficie de los aglomerados o del material particulado.

La humectación es un proceso en el cual la fase gaseosa existente en la superficie de la fase sólida es reemplazada por una fase líquida durante la disolución de este sólido en un líquido o solvente, en donde las tres fases coexisten durante un tiempo determinado, siendo posible obtener cierta cantidad de entremezclado y soluciones, fundamentalmente entre las fases sólida y líquida.

La literatura actual relacionada con estudios de humectación de materiales biológicos y alimenticios es realmente escasa, encontrándose solo un estudio de este tipo (Hammes *et al.*, 2015) donde se evaluó las particularidades de humectación de la leche de búfala en polvo, obtenida utilizando diferentes niveles de lecitina de soya como aditivo, el cual se añadió a la leche concentrada antes de efectuar el secado por atomización.

El HeberNem-S se puede considerar como una superficie compuesta por una mezcla de *Brevibacterium celere* y sacarosa, en donde las superficies individuales son conectadas mediante “puentes” estables estableciendo así una compleja red capilar. Una vez humectadas, las partículas comienzan a descender hacia el fondo del recipiente que las contiene, donde la densidad de estas partículas tiende a ser mayor que la del agua. La densidad de una partícula sólida dependerá entonces de su composición y del contenido de aire ocluido.

Para el caso específico del secado por aspersión, el contenido de aire ocluido se puede ajustar mediante la variación de los parámetros de trabajo del secador. En la etapa de formulación, al definir las sustancias a utilizar en la formulación y el contenido de materia seca, se hace énfasis generalmente en los parámetros reológicos de la crema a secar. Una elevada viscosidad dificulta que el aire que se pueda

encontrar en la crema pueda salir libremente. Una elevada agitación del tanque que contiene el concentrado posibilita la formación de partículas de aire en el interior del formulado. La temperatura de la crema también favorece la coexistencia de una mayor cantidad de aire en el concentrado antes de proceder a su secado. La combinación de una elevada viscosidad, fuerte agitación y bajas temperaturas constituye una fórmula ideal para obtener una crema con cantidades significativas de aire incorporado.

En el proceso de producción del HeberNem-S en ocasiones se presentan bajos rendimientos, coincidiendo con el deterioro de las características organolépticas del producto, mientras que en algunos lotes se ha comprobado que el producto presenta dificultades con la rehidratación o resuspendibilidad, quedando grumos insolubles sedimentados del producto al ser diluido en agua.

Dentro de los parámetros que influyen en la resuspendibilidad están la humectabilidad, el tamizado húmedo y la suspendibilidad. Por experimentos anteriores realizados en el CIGB se puede afirmar que se cumplen los parámetros del tamizado húmedo y la suspendibilidad de los polvos con el proceso tecnológico establecido, mientras que la humectabilidad es el parámetro que está fuera de la norma en muchas ocasiones. De esta manera, en la actualidad se desconoce que influencia presenta un determinado tipo de aditivo sobre la humectabilidad del HeberNem-S, con vistas a mejorar su resuspendibilidad y eficiencia de aplicación.

Tomando en cuenta lo anterior, nuestro objetivo consistió en estudiar los diversos factores y aditivos que mayor influencia presentan en la mejora de la humectabilidad del producto HeberNem-S, mediante experimentación.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en la Planta de Desarrollo ubicada en el Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología de Camagüey-Cuba.

Muestra biológica

Se emplearon cultivos de *Brevibacterium celere*, cepa C-924. La escala de lote de fermentación sumergida utilizada fue de 180 L. La biomasa obtenida en la fermentación fue lavada en una centrífuga refrigerada (HITACHI). A la biomasa se le realizaron cuatro lavados. En cada lavado la biomasa fue resuspendida con agua de proceso a razón de 200 g/L. El lavado se realizó con el fin de eliminar la mayor cantidad posible de sobrenadante existente en la biomasa proveniente de la fermentación.

La biomasa se dividió en dos partes para la realización de experimentos complementarios. Las concentraciones de biomasa y de cada reactivo empleado en los experimentos se muestra en la **Tabla 1** (primer experimento) y **Tabla 2** (segundo experimento). A las formulaciones del primer experimento se le ajustó la materia seca para que coincidieran con el diseño. Con el fin de comprobar la materia seca se empleó una balanza de peso seco (Sartorius MA 35). El volumen a secar de las formulaciones de los experimentos correspondió a 500 mL.

Diseño experimental

Se realizó un experimento de tipo de superficie de respuesta, misceláneo, con una resolución III, que no permitió observar las interacciones débiles que existen entre los diferentes factores. Se definieron como factores que influyen sobre la variable respuesta (humectabilidad) los siguientes: concentración de sacarosa (Conc. Sacarosa) expresada en porcentaje;

concentración de sólidos solubles proveniente del medio de fermentación agotado (SSMA); velocidad sincrónica del disco atomizador (N); y materia seca de la crema formulada (MSC). El posterior análisis de varianza de los resultados obtenidos en el diseño experimental inicial permitió obtener, mediante el software Design Expert, una correlación matemática que estableció la influencia de las variables SSMA y MSC sobre la humectabilidad del polvo final (Ecuación 1).

Ecuación 1.

$$\text{Humectabilidad} = a - b * \text{SSMA} - c * \text{MSC}$$

Dónde: a, b y c constituyen coeficientes matemáticos asignados por el software Design Expert según los resultados del análisis de varianza realizado.

Condiciones operacionales aplicadas durante el secado por aspersión

El secado de las formulaciones se realizó en un secador por aspersión con atomizador rotatorio a escala piloto (Niro) a una temperatura de alimentación y salida del aire de 130 °C y 60

°C, respectivamente, las cuales se ajustaron de forma manual. La temperatura de alimentación de la crema antes de proceder al secado por atomización se mantuvo constante en 25 °C en todas las variantes. La velocidad sincrónica del disco atomizador y la materia seca de la crema fue fijada de acuerdo con el diseño del experimento.

Diseño metodológico

Se estructuró un primer diseño de experimento con 4 factores y 16 corridas (Tabla 1), para ello se empleó el software Design Expert.

Considerando los resultados alcanzados durante el experimento del secado por atomización efectuado, se realizó un segundo diseño de experimentos del tipo estudio de tamizado con 16 factores, los cuales correspondían a la implementación de diversos aditivos. Para cada variante se utilizó el equivalente a 200 g de biomasa seca formulada. Los aditivos se añadieron de forma tal que, en el producto final, la composición de los aditivos son las presentadas en el diseño de experimentos.

Tabla 1

Primer diseño experimental realizado con cuatro factores.

Corridas	Sacarosa (%)	SSMA (%)	N (rpm)	MSC (%)
1	20	20	15 000	31,29
2	10	10	27 588,5	22,19
3	25,177	10	20 000	19,16
4	20	0	15 000	15,22
5	0	0	25 000	15,92
6	10	10	20 000	28,03
7	10	25,177	20 000	24,39
8	20	0	25 000	29,66
9	0	20	25 000	25,13
10	10	0	20 000	35,5
11	0	20	15 000	200,3
12	10	10	12 411,5	27,02
13	0	10	20 000	25,88
14	0	0	15 000	16,61
15	10	10	20 000	17,07
16	20	20	25 000	30,36

El experimento 2 fue realizado con un total de 16 aditivos a dos niveles, más una variable control (ver **Tabla 2**) esto es, un nivel al 1 % y otro nivel al 5 %. Para la goma xantan no se aplicó el diseño de estos dos niveles por ser

una sustancia que causa una viscosidad elevada en las formulaciones. Por tanto, los niveles utilizados para este aditivo fueron de 0,1 y 0,5 %. La variable respuesta en el caso de este experimento fue la humectabilidad.

Tabla 2

Segundo diseño experimental, realizado a dos niveles.

Aditivos	No. de corrida	Nivel bajo	No. de corrida	Nivel alto
Goma acacia	1	1	17	5
Goma xantan	2	0,1	18	0,5
Goma tragacanto	3	1	19	5
Dodecilsulfato de sodio (SDS)	4	1	20	5
Tween 80	5	1	21	5
Tween 200	6	1	22	5
Gelatina	7	1	23	5
Alginato	8	1	24	5
Sacarosa	9	1	25	5
Sobrenadante de cultivo	10	1	26	5
Sulfato de amonio	11	1	27	5
Glanapón DG 158	12	1	28	5
Lecitina de soya	13	1	29	5
Carboxi metil celulosa	14	1	30	5
PEG 600	15	1	31	5
PEG 8000	16	1	32	5
Control	Sin aditivos (No. de corrida 33)			

El secado de las formulaciones se realizó a una temperatura de entrada del aire fijada en 130 °C, mientras que la temperatura de salida del aire fue controlada de forma manual a 60 °C. La temperatura de la crema antes de secar se mantuvo constante en todas las variantes en un valor de 25 °C. Los valores aplicados de la velocidad sincrónica del disco atomizador y la materia seca de la crema fueron los mismos en todas las variantes a secar del experimento, es decir, en 20,000 rpm y 20 %, respectivamente.

A cada muestra de polvo se le realizaron 5 réplicas de humectabilidad y se promediaron los resultados obtenidos. Esta prueba consistió en medir el tiempo requerido para humectar (mojar) 5 g de polvo espolvoreados en la superficie de 100 mL de agua proceso, a una temperatura de 25 °C en condiciones de dureza mínima, colocada en un recipiente de vidrio de 250 mL.

Para determinar el tiempo que demoraba cada polvo en humectarse y resuspenderse, se utilizó la norma MT 53.3 establecida por Collaborative International Pesticides Analytical Council [CIPAC], (2022). Para regar el polvo en el recipiente de cristal y garantizar una capa lo más homogénea posible se utilizó un embudo y un mortero, en donde se procedió a subir y bajar el mortero dentro del embudo para verter el polvo en la superficie del agua de forma controlada. Los resultados de la humectabilidad fueron procesados en el Paquete Microsoft Excel.

Resultados y discusión

En el experimento realizado se analizaron los factores de mayor influencia en la humectabilidad del polvo resultante del secado por aspersión. Según literatura consultada se plantea que el factor que más influye en este tipo de experimento es la velocidad de atomización,

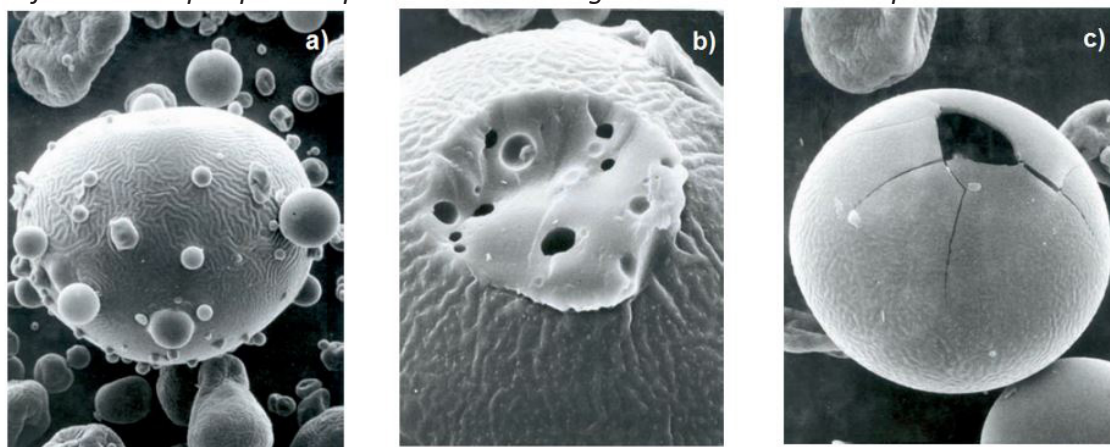
porque incide directamente en la densidad del polvo, ocasionando que se obtenga un polvo más pesado con características físicas que favorecen la humectabilidad (Westergaard, 2004).

Una crema con mucho aire incorporado ayuda a la formación de partículas huecas. Un parámetro de operación de los secadores por aspersión que definen las formas de las partículas es la temperatura de entrada del aire, ya que influye en el endurecimiento de las partículas. El autor (Westergaard, 2004) propone el siguiente mecanismo al que será sometida la partícula a la entrada del secador: Durante el secado, el contenido de sólidos aumenta evidentemente debido a la eliminación de agua, ocurriendo lo mismo con la viscosidad y la tensión superficial. Esto conlleva a que el coeficiente de difusión, esto es, la relación de difusión de agua-vapor/tiempo

y superficie, disminuya, teniendo lugar un sobrecalentamiento debido a la menor velocidad de evaporación. En casos extremos puede ocurrir el llamado “*case hardening*” (endurecimiento), lo cual no es más que la formación de una cáscara sólida sobre la superficie de la partícula, a través de la cual el vapor/agua restante, así como también el aire adjunto, se difunden, provocando entonces que dicha difusión se realice muy lentamente. Este endurecimiento ocurre normalmente con un contenido residual de humedad de 10 – 30 %. Al existir más vapor de agua y burbujas de aire en la partícula, ésta se sobrecalentará si la temperatura del aire circundante es lo suficientemente elevada, provocando una expansión del vapor y el aire. La presión aumentará y la partícula se convertirá en una esfera completamente redonda con una superficie lisa (Figura 1).

Figura 1

Diferentes etapas por las que transcorre una gota durante el secado por atomización.



Nota. a) Partícula típica del secado de una etapa; b) Partícula atomizada. Secado de una etapa; c) Partícula sobrecalentada. Secado de una etapa. Adaptado de “Tecnología de la Leche en Polvo Evaporación y Secado por Atomización” (p.128) por V. Westergaard, 2004, NIRO A/S Copenhagen, D

Si la temperatura del aire circundante es lo suficientemente elevada, la partícula puede llegar a explotar, y tendrá igualmente una cáscara muy pequeña de aproximadamente 1 μm . De esta manera, no sobrevivirá al tratamiento mecánico en el sistema de transporte y en los ciclones

instalados en el secador por atomización, abandonando de esta manera el secador transportada por el aire de salida. En la Figura 2 se exponen los resultados del experimento, los cuales se observan detalladamente en el gráfico de superficie de respuesta 3D (Figura 3).

En estas figuras se muestra que el factor más influyente es la concentración de sólido soluble procedente del medio de fermentación agotado. Los sólidos solubles ayudan a obtener un polvo más pesado con una mayor densidad, logrando el mismo efecto que el deseado por el atomizador (Masters, 1985). Los resultados obtenidos en este experimento permiten

deducir que los sólidos solubles del medio agotado son los compuestos que más influyen en la humectabilidad del HeberNem-S. Esto puede deberse a la presencia de antiespumante y sacarosa en el medio de cultivo agotado antes de proceder al secado, lo cual influye positivamente en las propiedades físicas del polvo, en específico en su humectabilidad (Silva & Bernal, 2020).

Figura 2

Valores de la humectabilidad de las 16 variantes del experimento.

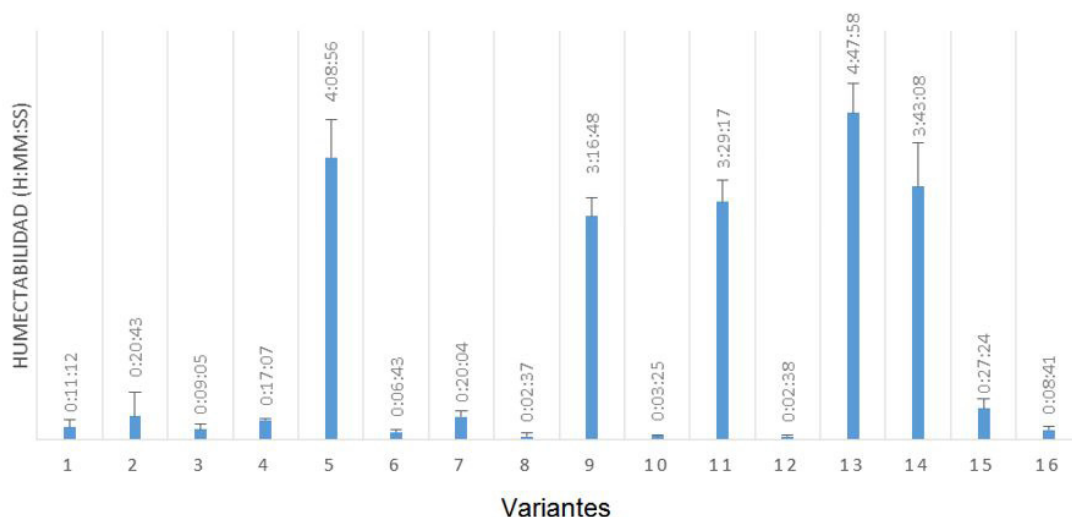
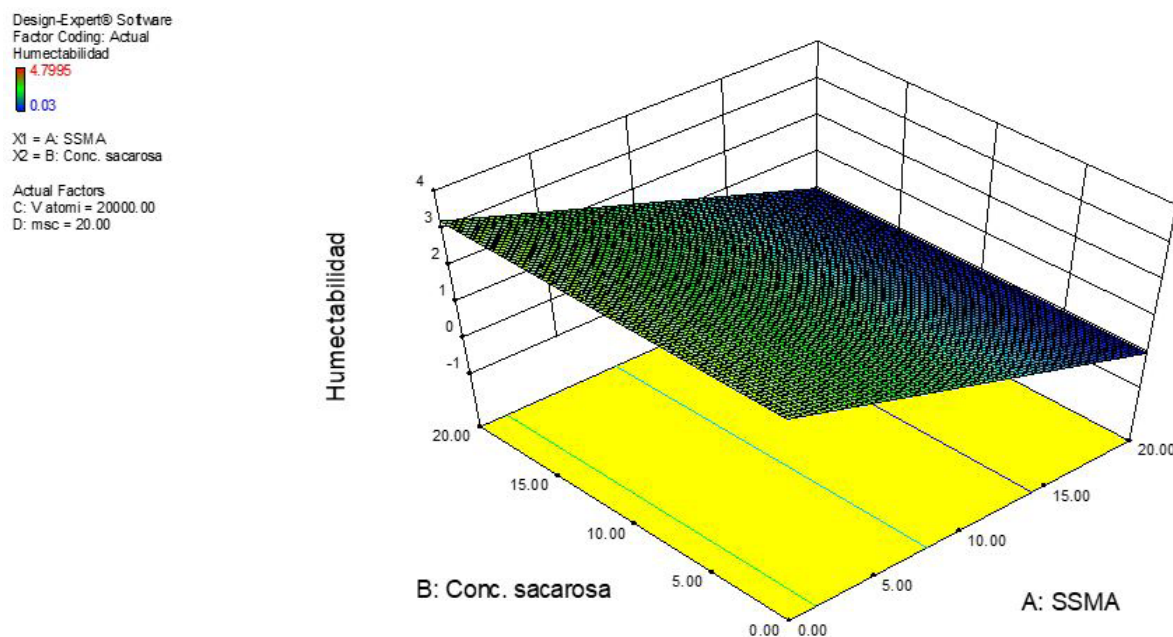


Figura 3

Superficie de respuesta 3D de la humectabilidad generada por el programa Design Expert.



Mediante el análisis de varianza realizado en el software Design Expert, se obtuvo la siguiente correlación matemática la cual describe la influencia de las variables concentración de sólidos solubles proveniente del medio de fermentación agotado (SSMA) y materia seca de la crema formulada (MSC) sobre la humectabilidad del polvo final.

Ecuación 2.

$$\text{Humectabilidad} = 4,38455 - 0,16078 * \text{SSMA} - 0,057365 * \text{MSC}$$

En la **Ecuación 2.** se puede observar que, desde el punto de vista matemático, el parámetro que mayor influencia presenta en la humectabilidad es el SSMA, debido a que el valor del coeficiente asignado a este parámetro por el software Design Expert (0,16078) es superior al coeficiente fijado para el parámetro MSC (0,057365). También puede observarse en esta ecuación que el valor máximo o límite superior que puede alcanzar la humectabilidad es de 4,38455 h, de acuerdo a los resultados de este estudio.

Adicionalmente, los autores se permiten indicar que esta ecuación también puede ser considerada novedosa e innovadora, debido a que son prácticamente nulos los antecedentes bibliográficos disponibles donde se aplica una ecuación de este tipo, es decir, que correlacionan matemáticamente la influencia de las variables SSMA y MSC sobre la humectabilidad de un polvo obtenido mediante secado por atomización.

En el experimento se realizaron dos corridas controles, una con (biomasa lavada o C1) y otra con (biomasa lavada más extracto de levadura o C2). Los aditivos más el extracto de levadura fueron añadidos para obtener una biomasa lavada en una dilución 1/10 con la finalidad de mantener la viabilidad del polvo similar a la del producto HeberNem-S.

En la **Figura 4** se observa la humectabilidad de las diferentes formulaciones para los dos niveles

evaluados. En el caso de la goma tragacanto, alginato y la carboximetilcelulosa no se pudo realizar el secado en el nivel de 5 % porque la crema a secar tenía una viscosidad elevada que no permitió ser bombeada.

La goma tragacanto es un exudado producido por algunas especies arbustivas del género *Astragalus*, una leguminosa perenne oriunda del Asia menor y de las regiones montañosas y semidesérticas del Irán, Siria y Turquía. Está formada de una mezcla de polisacáridos: el ácido tragacántico, insoluble en agua y responsable por la propiedad absorbente de agua de la goma, y la arabinogalactana que es un polímero soluble en agua y responde por la solubilidad de la goma. La goma tragacanto produce la más alta viscosidad de todos los hidrocoloides extraídos de planta, forma soluciones muy viscosas así como también geles, y se recomienda usar en concentraciones que fluctúen entre 0,25 y 0,50 % (Pasquel, 2001).

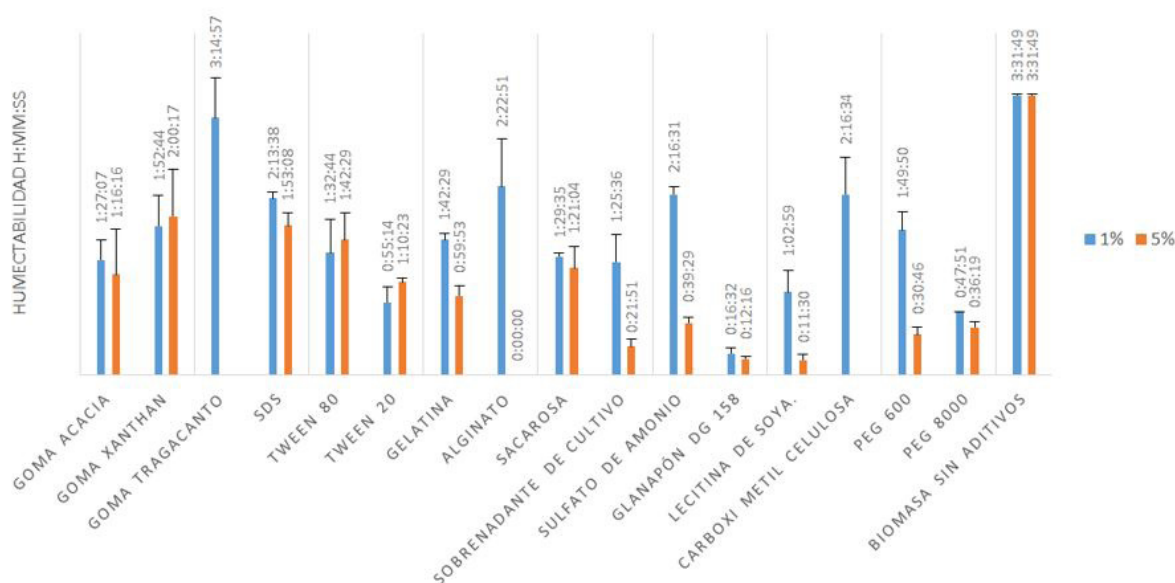
Los alginatos son heteropolisacáridos hidrofílicos aniónicos abundantes en la naturaleza existiendo tanto en componentes de alga marina marrón (Phaeophyceae) y como polisacáridos capsulares de algunas bacterias del suelo. Se han observado comportamientos contrastantes (Newtoniano o no Newtoniano) para las mismas concentraciones de alginato en agua. En este sentido, mientras que el comportamiento de las soluciones de alginato (con concentraciones entre 1,0 – 5,0 % m/v) se reportó como Newtoniano, se observó un comportamiento pseudo plástico por encima de la tasa crítica de esfuerzo cortante en soluciones de alginato comerciales (entre 1,0 y 3,0 % m/v). La viscosidad de las soluciones de alginato depende principalmente de la temperatura, conformación molecular del polímero, fuerza iónica del solvente y la cantidad de cloruro de sodio (NaCl) en la solución, mostrando mayores viscosidades a bajas temperaturas, baja fuerza iónica y elevada concentración de NaCl (Abkajouei *et al.*, 2022).

Respecto a la carboximetilcelulosa, es posible indicar que es un derivado aniónico, soluble en agua de la celulosa. Su viscoelasticidad depende de la concentración que presente en solución. A baja concentración (por debajo de 2,5 – 3,0 %) se comporta como un flujo viscoso, mientras que por encima de 3 % actúa

como un sólido elástico (Rahman *et al.*, 2021). Basado en su comportamiento viscoelástico, la carboximetilcelulosa ha sido ampliamente usada en forma de hidrogel en los campos de la biomédica, farmacéutica, cosmética y agricultura como estabilizador, o como espesador en la industria alimenticia.

Figura 4

Resultado de la humectabilidad de los 16 aditivos para los dos niveles evaluados.



De los 16 aditivos utilizados en el experimento el Glanapón, la lecitina de soya y el sobrenadante de cultivo mostraron tener una mayor capacidad para mejorar la humectabilidad de los polvos obtenidos. El Glanapón demostró tener una mayor influencia en la humectabilidad para los dos niveles usados en el experimento. El Glanapón es un antiespumante comercial con una composición patentada por el fabricante. Los antiespumantes tienen en su composición copolímeros de polietilenglicol y polipropilenglicol y siliconas. La combinación de estos componentes se pueden obtener copolímeros con excelente solubilidad, humectabilidad, propiedades térmicas (Stopek, 2012).

El PEG-8000 favoreció la humectabilidad para las dos concentraciones utilizadas (1 y 5 %), y es un aditivo que encapsula las células, mejorando así la estabilidad del microorganismo (Promega, 2023). En este sentido, Hammes *et al.* 2015 también corroboran que la adición de la lecitina de soya a la leche concentrada de búfala, antes de efectuar el proceso de secado por atomización, mejora significativamente la humectabilidad del producto con relación a la humectabilidad obtenida para el polvo de leche de búfala producido sin adicionar la lecitina. En este estudio, se obtuvo como resultado que la adición de lecitina tuvo un fuerte efecto en el tiempo de humectabilidad, el cual fue reducido

desde aproximadamente 5 min (sin lecitina) hasta 63,9 s (con 1% de lecitina añadida).

Conclusiones

En este estudio se puede concluir que el factor de mayor influencia en la humectabilidad del producto HeberNem-S® es la concentración de sólidos solubles del medio agotado. Se recomienda emplear tanto la lecitina de soya como el Glanapón para mejorar la humectabilidad del producto HeberNem-S en polvo, debido a que son los aditivos que mayor contribución presentan en la reducción del tiempo de humectabilidad, con 19,18 veces y 17,5 veces, respectivamente.

Referencias

- Abka-khajouei, R., Tounsi, L., Shahabi, N., Patel, A. K., Abdelkafi, S., & Michaud, P. (2022). Structures, Properties and Applications of Alginates. *Marine Drugs*, 20, 364. <https://doi.org/10.3390/md20060364>
- Caparino, O. A., Tang, J., Nindo, C. I., Sablani, S. S., Powers, J. R., & Fellman, J. K. (2012). Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder. *Journal of Food Engineering*, 111, 135-148. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.01.010>
- Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología CIGB. (2013). Especificación de producto terminado. HeberNem-S. (NP 5080-04, pp. 9). Camagüey, Cuba: Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología.
- Collaborative International Pesticides Analytical Council [CIPAC]. (2022). Evaluation of wettability, wetting of dispersible powders. (MT 53.3): Collaborative International Pesticides Analytical Council. http://www.aenda.org.br/wp-content/uploads/2020/04/ciro278-anexo-abnt-biologicos_cipac_mto53.pdf
- Fillor, L. (2013). *Propuesta de escalado para el secado por aspersión del bionematicida HeberNem-S (Tsukamurella paurometabola, C-924)*. (Tesis de grado), Facultad de Química, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba.
- Fravel, D. R. (2005). Commercialization and implementation of biocontrol. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 43(1), 337-359. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.43.032904.092924>
- García, C., González, M. B., Ochoa, L. A., & Medrano, H. (2004). Microencapsulación de jugo de cebada verde mediante secado por aspersión. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 4(4), 262-266. <https://doi.org/10.1080/11358120409487769>
- González, N., Ramos, L., Narciandi, E., Mayo, O., & Zamora, J. (2013). Tecnología de fermentación del agente biológico activo del bionematicida HeberNem®. *Revista Cubana de Química*, XXV(1), 55-65. <https://www.redalyc.org/pdf/4435/443543730008.pdf>
- Guzmán, S. P., & Castaño, J. J. (2002). Secado por atomización del jugo de caña de azúcar. *Cenicafé*, 53(4), 327-333. [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc053\(04\)327-333.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc053(04)327-333.pdf)
- Hammes, M. V., Englert, A. H., Zapata, C. P., & Medeiros, N. S. (2015). Study of the influence of soy lecithin addition on the wettability of buffalo milk powder obtained by spray-drying. *Powder Technology*, 277, 327-343. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.02.047>
- Hernández, A., Zamora, J., González, N., Risco, D. G. d., Ríos, R., Sánchez, M. d. C., & Salazar, E. (2007). Encapsulación del agente nematocida *Tsukamurella paurometabola* C-924, mediante secado por atomización. *Biotecnología Aplicada*, 24, 224-229. <https://elfoscientiaecigb.edu.cu/PDFs/Biotecnol%20Apl/2007/24/3y4/BA00240304OL224-229.pdf>
- Kieken, S., Vandenheuvel, D., Broeckx, G., Claes, I., Allonsius, C., Boeck, I. D., Thys, S., & Timmermans, J. (2019). Impact of spray-drying on the pili of *Lactobacillus rhamnosus* GG. *Microbial Biotechnology*, 12, 849-855. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13426>
- Marín, M., Mena, J., Wong, I., Morán, R., Franco, R., Rojas, M., Chavelis, P., García, G., Basulto, R., Hernández, A., Pimentel, E., Moreira, A., & González, S. (2014). Characterization of the vegetal growth promoting capacity of *Tsukamurella paurometabola* C-924 and the main mechanisms involved. *Biotechnología Aplicada*, 31(2), 168-171. <https://www.medigraphic.com/pdfs/biotecapl/ba-2014/ba142h.pdf>
- Marín, M., Wong, I., García, G., Morán, R., Basulto, R., Pimentel, E., & Mena, J. (2013). Actividad antagónica in vitro de *Tsukamurella paurometabola* C-924 frente a fitopatógenos. *Revista de Protección Vegetal*, 28(2), 132-137. <http://scielo.sld.cu/pdf/rpv/v28n2/rpv06213.pdf>
- Marín, M., Wong, I., Mena, J., Morán, R., Pimentel, E., Sánchez, I., Basulto, R., & Moreira, A. (2013). *Zea mays* L. plant growth promotion by *Tsukamurella paurometabola* strain C-924. *Biotechnología Aplicada*, 30(2), 105-110. <https://elfoscientiaecigb.edu.cu/PDFs/Biotecnol%20Apl/2013/30/2/BA003002OL105-110.pdf>

- Masters, K. (1985). *Spray Drying Handbook* (4th ed.). New York, USA: Halstead Press. <https://doi.org/10.1002/aic.690330131>
- Mena, J., Pimentel, E., González, L. V., Hernández, A. T., León, L., Ramírez, Y., Sánchez, I., Mencho, J., López, A., Pujol, M., Borroto, B., Ramos, E., Álvarez, J., Marín, M., Jiménez, G., García, G., Pico, V., Expósito, M., Coca, Y., Gómez, M., Olazabal, A., Hernández, A., Falcón, V., de la Rosa, M., Menéndez, I., & Raíces, M. (2003). Aislamiento y determinación de cepas bacterianas con actividad nematocida. Mecanismo de acción de *C. paurometabolum* C-924 sobre nemátodos. *Bioteología Aplicada*, 20(4), 248–252. <https://elfoscientia.cigb.edu.cu/PDFs/Biotecnol%20Apl/2003/20/4/BA002004248-252RP.pdf>
- Núñez, D. M., López, A., Medina, L., Calderas, F., Martínez, M. A., Lara, R. H., Herrera, E., Anguiano, G., & Manero, O. (2021). Microencapsulation of *Acidithiobacillus thiooxidans* by spray drying using biopolymers as wall materials: A potential alternative for its application in the mining industry. *Minerals Engineering*, 166, 106882. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106882>
- Paneque, Y. (2010). Caracterización fenomenológica del proceso de secado por atomización del HeberNem-S en el Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología. (Tesis de grado), Facultad de Química, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba.
- Pasquel, A. (2001). Gomas: Una aproximación a la industria de alimentos. *Revista Amazónica de Investigación Alimentaria*, 1(1), 1–8.
- Patil, V., Chauhan, A. K., & Singh, S. P. (2014). Influence of Spray Drying Technology on the Physical and Nutritional Properties of Guava Powder. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3(9), 1224–1237. <https://www.ijcmas.com/vol-3-9/Vaibhav%20Patil,%20et%20al.pdf>
- Promega. (2023). PEG 8000, Molecular Biology Grade (Polyethylene Glycol 8000). https://worldwide.promega.com/es-es/products/biochemicals-and-labware/biochemical-buffers-and-reagents/peg-8000-molecular-biology-grade-polyethylene-glycol-8000_/?catNum=V3011
- Rahman, M. S., Hasan, M. S., Nitai, A. S., Nam, S., Karmakar, A. K., Ahsan, M. S., Shiddiky, M. J. A., & Ahmed, M. B. (2021). Recent Developments of Carboxymethyl Cellulose. *Polymers*, 13, 1345. <https://doi.org/10.3390/polym13081345>
- Ramos, L. (2011). Influencia del proceso de secado por atomización en la viabilidad celular de la *Tsukamurella Paurometabola* C-924 del bionemático HeberNem-S. [Tesis de grado], Facultad de Química, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba.
- Roccia, P., Martínez, M. L., Llabot, J. M., & Ribotta, P. D. (2014). Influence of spray-drying operating conditions on sunflower oil powder qualities. *Powder Technology*, 254, 307–313. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2014.01.044>
- Segura, R. M. (2013). Propuesta de escalado para el secado por aspersión del bionemático HeberNem-S (*Tsukamurella paurometabola*, C-924). (Tesis de Maestría), Facultad de Química, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba.
- Selvamuthukumar, M., Tranchant, C., & Shi, J. (2019). Spraying Drying Concept, Application and Its Recent Advances in Food Processing. In M. Selvamuthukumar (Ed.), *Handbook on Spray Drying Applications for Food Industries*. Boca Raton, USA: CRC Press.
- Seth, D., Mishra, H. N., & Deka, S. C. (2016). Effect of spray drying process conditions on bacteria survival and acetaldehyde retention in sweetened yoghurt powder: an optimization study. *Journal of Food Process Engineering*, 40(3), e12487. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12487>
- Silva, S. C. d., & Bernal, M. E. D. D. (2020). Powder Technology. In R. A. Marc, A. Valero, & G. D. Posada (Eds.), *Food Processing*. London, UK: IntechOpen Limited. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.90715>
- Stopek, J. (2012). Spain Patent No. ES2378719T3: Tyco Healthcare Group LP. <https://patents.google.com/patent/ES2378719T3/es>
- Tang, H. W., Abbasiliasi, S., Murugan, P., Tam, Y. J., Ng, H. S., & Tan, J. S. (2020). Influence of freeze-drying and spray-drying preservation methods on survivability rate of different types of protectants encapsulated *Lactobacillus acidophilus* FTDC 3081. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 84(9), 1913–1920. <https://doi.org/10.1080/09168451.2020.1770572>
- Westergaard, V. (2004). Tecnología de la Leche en Polvo Evaporación y Secado por Atomización. Copenhagen, Dinamarca: Niro A/S. <https://pdfcoffee.com/es-tecnologia-de-la-leche-en-polvo-todo-pdf-free.html>
- Yuguang, Z., & Lei, S. (2017). *Test and Identification Report*. Beijing, China: Institute of Microbiology, Chinese Academy of Sciences.

Efecto de la deshidratación de desechos de tomate en el contenido de compuestos fenólicos, carotenoides y capacidad antioxidante

Effect of dehydration of tomato waste on the content of phenolic compounds, carotenoids and antioxidant capacity

Julio Cesar Armenta-Gorosave^a  armenta.julio@uabc.edu.mx; Vianey Méndez-Trujillo^{a*}  vianey.mendez.trujillo@uabc.edu.mx;
Daniel González-Mendoza^b  danielg@uabc.edu.mx; Daniela Guadalupe González-Valencia^a  dgonzalez18@uabc.edu.mx;
Carlos Olvera-Sandoval^a  olvera.carlos@uabc.edu.mx;

^aUniversidad Autónoma de Baja California, Mexicali-México. Facultad de Medicina e Instituto de Ciencias Agrícolas.

*Autor de correspondencia: vianey.mendez.trujillo@uabc.edu.mx

Recibido: 23/07/2023 Aceptado: 05/10/2023

Citar, APA: Armenta-Gorosave, J. C., Méndez-Trujillo, V., González-Mendoza, D., González-Valencia, D. G. y Olvera-Sandoval, C. (2023). Efecto de la deshidratación de desechos de tomate en el contenido de compuestos fenólicos, carotenoides y capacidad antioxidante. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 10 (2), 67–75. <https://doi.org/10.23850/24220582.5780>

Resumen En México, el desperdicio de tomates puede relacionarse con la deficiencia en la cadena de transporte y almacenaje, bajos estándares de calidad del producto, deficiencias en la exhibición del producto y fallas en la coordinación con proveedores. Estos factores contribuyen al desperdicio de tomate para su consumo por no cumplir con los estándares impuestos por los mercados de alimentos y el consumidor final. No obstante, los desperdicios de tomate pueden ser revalorizados y ser una fuente de fitoquímicos con relevancia nutricional. El objetivo del presente estudio fue identificar el efecto de la temperatura de secado de frutos de tomate considerados de desperdicio evaluando su capacidad antioxidante, compuestos fenólicos, carotenoides, azúcares reductores, proteínas, humedad y cenizas. Se realizaron tres tratamientos para medir el efecto del secado a 24, 48 y 72 horas a tres temperaturas diferentes 50, 60 y 70 °C en las muestras de frutos de tomate colectadas. Los resultados mostraron que el tratamiento de secado a 50 °C por 72 horas arrojó los mayores valores de proteínas (45,3 g/kg) y azúcares reductores (196 mg/g). Por su parte el tratamiento de 70 °C mostró incrementos en compuestos fenólicos (48,12 mg/g), licopeno (2503 µg/g) y β-caroteno (31,84 µg/g) a las 24 horas de secado. Estos resultados indicaron que al exponer la biomasa de tomate a una temperatura de 70 °C por 24 horas correspondiente al Tratamiento (T4 - 1), se produjo una mayor biosíntesis de compuestos bioactivos que podrían ser empleados en la formulación de nuevos productos alimenticios, por ejemplo, en la elaboración de tortillas.

Palabras clave: tomate, deshidratación, carotenos, capacidad antioxidante.

Abstract In Mexico, tomato waste can be due to factors such as deficiencies in transportation and storage, product quality standards, deficiencies in product display, and failures in coordination with suppliers. These factors contribute to the waste of tomatoes for consumption due to not meeting the standards imposed by food markets and the final consumer. However, tomato waste can be revalued and encourage its use due to the presence of phytochemicals of nutritional relevance. The aim of this experiment was to identify the antioxidant capacity, phenolic compounds, carotenoids, reducing sugars, proteins, moisture and ashes in tomato fruits considered waste by food markets. Three treatments were carried out that consisted of evaluating the drying effect at 24, 48 and 72 hours at three different temperatures 50, 60 and 70 °C in the collected tomato fruit samples. The results showed that the drying treatment at 50 °C for 72 hours showed higher values of proteins (45,3 g/kg) and reducing sugars (196 mg/g). For its part, the 70 °C treatment showed the highest levels of polyphenolic compounds (48,12 mg/g), lycopene (2503 µg/g) and β-carotene (31,84 µg/g) after 24 hours of drying. These results indicate that the treatment of tomato biomass at 70 °C for 24 hours corresponding to Treatment (T4 - 1), promotes a greater biosynthesis of bioactive compounds that could be used in the formulation of new food products, for example in the elaboration of tortillas.

Keywords: tomato, dehydration, carotenoids, antioxidant activity.

Introducción

El tomate (*Lycopersicon esculentum* L.) es un fruto que se destaca por su contenido nutricional ya que contiene compuestos fenólicos, carotenoides, potasio, vitaminas A, E y C, fibra. Además, representa una fuente valiosa de compuestos bioactivos, destacando los compuestos fenólicos, carotenoides como el licopeno, B-caroteno (provitamina A), vitaminas y glicoalcaloides que muestran actividades antioxidantes, antiinflamatorias, antitumorales y anti carcinogénicas (Chaudhary *et al.*, 2018). Lo cual lo convierte en uno de los frutos más consumidos en la dieta humana (Sengkhamparn y Phonkerd, 2019). La producción agropecuaria en México representa el 3,4 % del PIB (Producto Interno Bruto) nacional (INEGI, 2007), donde México aporta el 1,7 % de la producción mundial de tomate, y contribuye con el 19 % de volumen de las exportaciones a nivel mundial, ubicándolo por encima de España y Países Bajos (Montaño-Mendez *et al.*, 2021). México se destaca por ser pionero en la domesticación del tomate y gracias a la colonización, las semillas fueron introducidas en diferentes partes del mundo donde fue adoptado como uno de los mayores cultivos de importancia agrícola (Peralta y Spooner, 2007).

A nivel mundial, la producción de tomate ha tenido un impulso resultado de la demanda por la industria alimentaria de países principalmente europeos. Esto ha generado que se tenga un incremento de 3,1 %, pasando de 184 millones de toneladas en el 2018 a 221 millones de toneladas entre 2019 y 2024 (Coelho *et al.*, 2023). No obstante, alrededor del 10 % de la producción total de tomate no cumple con los requisitos de los clientes, lo que genera pérdidas esenciales durante la cosecha y su procesamiento (Coelho *et al.*, 2019). Las principales causas de estas pérdidas pos-cosecha se asocian con daños externos durante su colecta y manejo; condiciones de almacenamiento que afectan sus características fisicoquímicas y calidad, tiempo

de almacenamiento, y el cultivar o variedad de tomate cosechado (Abera *et al.*, 2020).

A nivel internacional, se desperdicia aproximadamente una tercera parte del total de los alimentos producidos, a pesar de que estas pérdidas ocurren a lo largo de toda la cadena de suministro de alimentos (eg., tomate), los supermercados tienen una contribución importante a la generación de residuos en las ciudades (Schanes *et al.*, 2018). El consumo de tomate fresco involucra la generación de residuos, ya sea por la presencia de daños biológicos o mecánicos durante su transporte o almacenamiento. Cuando los tomates no cumplen con valores de calidad del mercado son desechados representando un problema ambiental. No obstante, estos residuos también pueden ser ricos en compuestos bioactivos, los cuales podrían ser incluidos en la formulación alimentos como pastas, productos cárnicos, mermeladas o de panificación (Szabo *et al.*, 2018).

Por lo que, la revalorización de los tomates que no cumplen con las condiciones de calidad del mercado para su venta representa una alternativa para obtener fitoquímicos, que pueden ser empleados en la elaboración de productos alimenticios. Que podrían contribuir a la salud del consumidor y a la disminución de residuos alimenticios en el ambiente. De tal forma que el objetivo de esta investigación consistió en evaluar la variación en composición de compuestos fenólicos, carotenoides, capacidad antioxidante y proteínas en tomates deshidratados a 50, 60 y 70 °C por 24, 48 y 72 horas.

Material y Métodos

Obtención de las muestras

Se colectaron frutos de tomate considerados de desecho, los cuales presentaban daño mecánico y alto grado de madurez (haciéndolos inviables

para el consumidor). Los desechos de tomates fueron obtenidos a partir de 5 mercados ubicados en la ciudad de Mexicali Baja California, durante los meses de agosto a diciembre del 2022.

Proceso de deshidratación

Los desechos de tomate de la variedad saladette procedentes de cada mercado fueron mezclados y cortados en rodajas homogéneas con un grosor de 0.5 cm, sin semillas. Posteriormente, se pesaron 500 gramos de biomasa en charolas de aluminio para su secado. Finalmente, las muestras por triplicado fueron deshidratadas a peso constante empleando nueve tratamientos con variaciones de temperatura y tiempo: 50°C-24 (T1-1), 50°C-48 h (T1-2) y 50°C-72 h (T1-3); 60°C-24 h (T2-1), 60°C-48 h (T2-2) y 60°C-72 h (T2-3); 70°C-24 h (T3-1), 70°C-48 h (T3-2) y 70°C-72h (T3-3), respectivamente. Finalizado cada tratamiento se colectaron 5 gramos y se almacenaron a -70 °C para análisis posteriores.

Cuantificación de compuestos fenólicos

La cuantificación del contenido de compuestos fenólicos de cada tratamiento fue realizada por triplicado, empleando la técnica de Folin-Ciocalteu (1927) con las modificaciones propuestas por Gonzalez-Mendoza *et al.* (2015). La concentración de compuestos fenólicos se expresó en equivalentes de ácido gálico (mg EAG/g de base seca), usando una curva de calibración con ácido gálico.

Determinación de licopeno y β-caroteno

Los carotenoides rojos y amarillos fueron cuantificados de acuerdo con Rodriguez-Maturino *et al.* (2015). Para tal fin se mezclaron 250 mg de cada tratamiento con 50 mL de acetona e incubadas por 60 min en ausencia de luz. Finalizado el tiempo de incubación se procedió al registro de la absorbancia de licopeno a una longitud de onda de 508 nm y 450 nm para la determinación de β-carotenos. Empleando la fórmula propuesta por Maqsood *et al.* (2015)

para licopeno y la fórmula propuesta por Aremu y Nweze (2017), para β-caroteno.

Determinación de capacidad antioxidante

La actividad antioxidante de cada tratamiento se determinó siguiendo la metodología propuesta por Méndez-Trujillo y González-Mendoza (2021). Previamente se realizó una mezcla de 0,025 mg de DPPH (1,1 difenil-2 picrilhidracilo) en 100 mL de metanol. Posteriormente se mezclaron 500 mg de cada tratamiento de tomate con 1 mL de la solución metanólica de DPPH. Las muestras fueron incubadas por 30 min a temperatura ambiente (25 °C) en completa oscuridad. Al finalizar el periodo de incubación se registraron las lecturas de cada tratamiento en un espectrofotómetro a 517 nm. La actividad antioxidante se realizó por triplicado y se analizó usando la **Ecuación 1**:

Ecuación 1.

Inhibición de DPPH (%) = [(AControl - Amuestra/AControl) × 100].

Donde: A control es la absorbancia de la reacción del DPPH en agua y Amuestra es la absorbancia de la reacción del DPPH en presencia de las muestras de tomate.

Cuantificación de azúcares reductores

La determinación de azúcares reductores de cada tratamiento se realizó siguiendo la metodología propuesta por González-Mendoza *et al.* (2022). Para tal fin 1000 mg de cada tratamiento se mezcló con 10 mL de H₂SO₄ a 1,25 % y se sometió a 120 °C a 15 libras de presión por 30 min. Finalizado, el periodo de incubación, se determinó el contenido de azúcares reductores, mediante la lectura al espectrofotómetro a una longitud de onda de 315nm de la mezcla de reacción de 300 µL de sobrenadante de cada tratamiento con 1000 µL H₂SO₄ concentrado. Los análisis se realizaron por triplicado y se reportaron como mg/g de azúcares reductores equivalentes de glucosa de la muestra en base seca.

Cuantificación de proteínas

La cuantificación de proteínas en cada tratamiento se realizó por triplicado empleando la técnica propuesta Rosa *et al.* (2020). Por lo cual, se mezclaron 1000 mg de muestra de tomate con 5 mL de una solución amortiguadora de fosfatos (100 mM a pH 6,5). El sobrenadante de la mezcla anteriormente indicada se obtuvo por centrifugación a 10,000 rpm por 3 min empleando una centrifuga refrigerada a 6 °C. La determinación de la proteína se realizó mezclando 100 µL del extracto proteico de cada tratamiento con 1000 µL de reactivo de Bradford dejando en oscuridad por 30 min a 30 °C. Culminado el periodo de incubación, las muestras fueron analizadas con espectrofotómetro empleando una longitud de onda de 595nm. Los valores obtenidos se expresaron en g/kg.

Análisis estadístico

El diseño experimental utilizado fue completamente al azar con tres repeticiones, considerando como unidad experimental

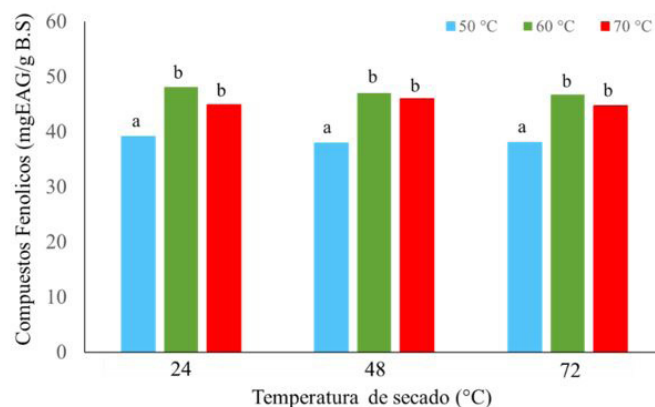
muestras de tomate desechado equivalentes a 500 gr de peso fresco, sin semillas. Nueve tratamientos fueron obtenidos a partir de las combinaciones de temperatura de secado (50, 60 y 70 °C) y tiempo (24, 48 y 72 horas) utilizado durante el secado y 5 gramos de cada tratamiento a peso constante se empleó para los análisis de proteínas, azúcares reductores, porcentaje de humedad y de cenizas, compuestos fenólicos totales, licopeno, β -caroteno y capacidad antioxidante. Cada variable se sometió a una prueba de ANOVA de una sola vía y análisis de Tukey, usando el paquete estadístico “IBM SPSS Statistics 25”.

Resultados y discusión

En la presente investigación, se observó que los tratamientos (T2 al T3) evaluando temperaturas y tiempo de (60 y 70 °C) a (24, 48 y 72 h), mostraron cambios significativos en el contenido de compuestos fenólicos en comparación con la temperatura de 50°C en los tres tiempos de secado (Figura 1).

Figura 1

Efecto de las temperaturas y tiempo de secado del tomate en el contenido de compuestos fenólicos.



Analizando la variable de compuestos fenólicos evidenciamos que el incremento de estos compuestos ocurre a temperaturas mayores de 50 °C y que este incremento no es dependiente de la temperatura de secado. Los tratamientos T2 (48 mg EAG/g B.S.) y T3 de secado (48 mg EAG/g

B.S.) mostraron valores superiores a los obtenidos con los T1 (40 mg EAG/g B.S.). Lo anterior podría estar relacionado con un proceso de ruptura de las estructuras celulares a temperaturas mayores de 50 °C, que permiten a los compuestos fenólicos tener mayor biodisponibilidad

(Gómez-Maqueo *et al.*, 2020). Estos resultados coinciden con lo observado Harini *et al.* (2019) quienes reportan un incremento del contenido de compuestos fenólicos a 60 °C por 4 horas de secado con respecto a temperaturas menores. Por su parte, Kim y Chin (2016), registraron mayores valores en el contenido de compuestos fenólicos a medida que se incrementaba el tiempo de secado en el rango de 60 y 70 °C. Estos resultados nos permiten concluir que el factor temperatura y tiempo son variables que inciden significativamente en la biodisponibilidad de compuestos fenólicos.

Evalutando la presencia de licopeno, el tratamiento (T3 - 1) a 70 °C por 24 h registró los mayores valores (2503 µg/g de base seca) así como para el β-caroteno (31,84 µg/g de base seca), en comparación con los tratamientos restantes analizados (Tabla 1). Por lo que los valores obtenidos en el presente estudio podrían ser resultado del proceso de una mayor biosíntesis de estos compuestos por efecto de las diferentes temperaturas y tiempos de secado empleados (Gómez-Maqueo *et al.*, 2020). Al respecto Palmero *et al.* (2014) indican que temperaturas de 60 y 70 °C pueden estimular el incremento

de licopeno y β-caroteno en el tomate, derivado de un incremento en la biosíntesis que permiten su disponibilidad. En este sentido Jorge *et al.* (2018) mencionan que la temperatura de 70 °C por 24 h, estimula la biosíntesis de licopeno y β-caroteno comparado con temperaturas de 60 °C o menores. Similares resultados fueron reportados por Mendelová *et al.* (2020) quienes observaron una concentración de 1268,5 µg/g de base seca de carotenoides a 70 °C por 17 h. Por su parte, Ibrahim *et al.* (2017) y Moreno y Díaz (2017) reportaron que a una temperatura de 60 °C durante aproximadamente 48 h no se estimula la producción de carotenoides en tomate.

Es importante indicar que los carotenoides, pueden disminuir su capacidad antioxidante por acción del tiempo y temperatura a la que se encuentren expuestos, resultado de una ruptura oxidativa o isomerización en su estructura (Nikita *et al.*, 2021). Lo anterior se observó en las muestras tratadas a 70 °C a 48 y 72 horas, donde posiblemente factores como la isomerización y la oxidación afectaron de forma simultánea la disminución del contenido de licopeno y de β-caroteno (Tabla 1).

Tabla 1

Resultados de composición de compuestos bioactivos de polvo de tomate.

Tratamientos	Temperatura de secado (°C)	Tiempo de secado (horas)	Licopeno (µg/g B.S)	β-caroteno (µg/g B.S)	%inhibición de DPPH
T1 - 1	50	24	1077 ± 23,20 d	19,43 ± 0,10 d	50,00 ± 1,70 a
T1 - 2	50	48	1155 ± 98,87 d	24,18 ± 0,30 c	56,44 ± 2,94 a
T1 - 3	50	72	1475 ± 189,9 c	18 ± 0,76 d	48,60 ± 1,43 a
T2 - 1	60	24	1329 ± 2,88 c	20,41 ± 1,84 d	28,50 ± 2,62 c
T2 - 2	60	48	1865 ± 20,43 b	26,35 ± 0,32 b	26,80 ± 0,28 c
T2 - 3	60	72	1530 ± 29,26 c	23,45 ± 0,45 c	25,16 ± 0,65 c
T3 - 1	70	24	2503 ± 62,83 a	31,84 ± 0,25 a	24,17 ± 1,35 c
T3 - 2	70	48	1861 ± 58,99 b	28,21 ± 1,94 b	ND
T3 - 3	70	72	1927 ± 68,69 b	26,01 ± 1,15 b	ND

Nota. B.S. (base seca), ND (no se detectó). Valores de media ± desviación estándar de 3 réplicas, letras iguales en la misma columna no son estadísticamente diferentes (p < 0,05).

Diversos estudios indican que el tomate se puede considerar como un alimento funcional, debido a la presencia de compuestos fenólicos, vitamina E, licopeno, ácido ascórbico y

carotenoides con actividad antioxidante que tienen un efecto preventivo contra algunas enfermedades degenerativas (Gümüsay *et al.*, 2015).

Respecto al efecto sobre la actividad antioxidante, los resultados mostraron que el incremento de temperaturas redujo la actividad antioxidante de las muestras de tomate descartado (Tabla 1). Siendo las muestras deshidratadas a 50 °C por 24 horas (o tratamiento T1-1) las que presentaron los mayores valores de actividad antioxidante. El menor porcentaje de inhibición se registró con el tratamiento térmico de 70 °C (T3). Generalmente, la deshidratación puede provocar la degradación de compuestos bioactivos afectando la actividad antioxidante y modificando el valor nutricional del tomate (Nikita *et al.*, 2021) en este aspecto nuestros resultados mostraron que la pérdida de humedad en todos los tratamientos fue de 94.74 % de pérdida de humedad. Azeez *et al.* (2019) y Lutz *et al.* (2015) indican que los rangos de secado entre 45 y 55 °C son los más adecuados para conservar la actividad antioxidante en frutos de tomate ya que se mantiene la integridad de los compuestos bioactivos como licopeno, compuestos fenólicos y otros carotenoides.

Nuestros resultados son consistentes con lo reportado por Nour *et al.* (2018), quienes al evaluar la deshidratación de tomates a 60 °C registraron que su piel proporcionaba la mayor concentración de compuestos fenólicos. También, es importante considerar que las técnicas para medir la actividad antioxidante pueden dar resultados diferentes, debido a las reacciones bioquímicas que participan en las metodologías (Vazquez-Ovando *et al.*, 2022), lo cual podría influir en los resultados reportados en el presente estudio comparado con los reportados en literatura. Sin embargo, se debe considerar que la variación en la capacidad antioxidante depende de factores como las técnicas de secado, carotenoides que se producen durante la degradación de los componentes celulares durante el secado y el cultivar de tomate empleado (Barros *et al.*, 2012; Espin *et al.*, 2016; Luna-Guevara *et al.*, 2020; Coelho *et al.*, 2023).

Tabla 2

Resultados de composición proximal de polvo de tomate.

Tratamientos	Temperatura de secado (°C)	Tiempo de secado (horas)	Proteína (g/kg B.S)	Azúcares reductores (mg/100 g B.S)
T1 - 1	50	24	41,9 ± 0,04 b	112,7 ± 7,25 a
T1 - 2	50	48	47,7 ± 0,26 a	158,4 ± 3,02 b
T1 - 3	50	72	45,3 ± 0,27 a	196,4 ± 5,01 c
T2 - 1	60	24	43,6 ± 0,26 a	164,8 ± 16,37 b
T2 - 2	60	48	36,9 ± 0,32 c	159,3 ± 12,21 b
T2 - 3	60	72	31,9 ± 0,19 c	152,2 ± 5,12 b
T3 - 1	70	24	31,1 ± 0,53 c	160,00 ± 8,05 b
T3 - 2	70	48	30,8 ± 0,46 c	158,40 ± 1,58 b
T3 - 3	70	72	30,9 ± 0,38 c	156,00 ± 5,64 b

Nota. B.S. (base seca), ND (no se detectó). Valores de media ± desviación estándar de 3 réplicas, letras iguales en la misma columna no son estadísticamente diferentes ($p < 0,05$).

Por otra parte, el análisis proximal de proteínas y azúcares reductores en las muestras deshidratadas (Tabla 2), mostró que el contenido de proteínas decrece con el incremento de las temperaturas empleadas y los tiempos de exposición. En este estudio, al usar una temperatura de 70 °C (T3) se presentó una disminución significativa de proteínas con respecto a los tratamientos (T1 y T2) o (60 y 50 °C) en diferentes tiempos de secado (Tabla 2).

Nuestros resultados fueron significativamente menores a los reportados por Nour *et al.* (2018) quienes obtuvieron valores de 189,2 g/kg. La variación en los niveles de proteína cruda podría estar asociado con el contenido de semilla (Nour *et al.*, 2018). Futuros estudios deberán ser encaminados a evaluar el aporte de estas semillas en el proceso de obtención de tomate deshidratado.

En contraste, el contenido de azúcares reductores presentó un incremento significativo con el tratamiento de 50 °C durante 72 horas en comparación con las otras temperaturas (Tabla 2). De acuerdo con Leyva *et al.* (2014), los azúcares reductores más abundantes son la glucosa y la fructuosa, incluyendo trazas de sucrosa en algunos frutos inmaduros. Este dato es relevante debido a que los frutos secos pueden contener un mayor nivel de carbohidratos que puede ser un factor de riesgo en el consumidor incrementando así el riesgo de enfermedades cardiometabólicas (Sullivan *et al.*, 2020). En consecuencia, estudios a futuro deberán evaluar el efecto de las temperaturas y tiempo de secado en carbohidratos y proteínas presentes en tomate de desecho deshidratado.

Conclusiones

En el presente estudio la temperatura de 70 °C con un tiempo de secado de 24 horas, mostró que es posible obtener un polvo de tomate deshidratado con valores de compuestos bioactivos significativamente superior que al emplear temperaturas iguales a 50 y 60 °C.

Futuros estudios en frutos de tomate de desecho deberán enfocarse en determinar la influencia de las semillas del fruto en el contenido de proteínas. Así como la relación entre variedad de tomate de desecho en el Noroeste de México y el contenido de compuestos bioactivos.

Finalmente, se demostró que los tomates considerados de desecho pueden ser revalorizados en la industria alimentaria y reducir la generación de residuos orgánicos al ambiente, debido al potencial de compuestos biológicos (antioxidantes, compuestos fenólicos y carotenoides) que exhiben.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Baja California, y Conahcyt, por la financiación de este proyecto.

Referencias

- Abera, G., Ibrahim, A.M., Forsido, S.F., & Kuyu, C.G. (2020). Assessment on post-harvest losses of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in selected districts of east shewa zone of Ethiopia using a commodity system analysis methodology. *Heliyon*, 6(4): e03749. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03749>
- Aremu, S., & Nweze, C. (2017). Determination of vitamin A content from selected Nigerian fruits using spectrophotometric method. *Bangladesh Journal Science and Industrial Research*, 52(2), 153–158. <https://doi.org/10.3329/bjsir.v52i2.32940>
- Azeez, L., Adebisi, S.A., Oyedele, A.O., Adetoro, R.O., & Tijani, K.O. (2019). Bioactive compounds' contents, drying kinetics and mathematical modelling of tomato slices influenced by drying temperatures and time. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(2), 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.03.002>
- Barros, L., Dueñas, M., Pinela, J., Carvalho, A.M., Santos, C.B., & Ferreira, I. (2012). Characterization and quantification of phenolic compounds in four tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) farmers' varieties in northeastern Portugal homegardens. *Plant Foods Human Nutrition*, 67(3), 229–234. <https://doi.org/10.1007/s11130-012-0307-z>
- Chaudhary, P., Sharma, A., Singh, B., & Nagpal, A.K. (2018). Bioactivities of phytochemicals present in tomato. *Journal Food Science Technology*. 55(8), 2833–2849. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3221-z>
- Coelho, M., Pereira, R., Rodrigues, A.S., Teixeira, J.A., & Pintado, M.E. (2019). Extraction of tomato by-products' bioactive compounds using ohmic technology. *Food Bioprocesses*. 117, 329–339. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.08.005>
- Coelho, M.C., Rodrigues, A.S., Teixeira, J.A., & Pintado, M.E. (2023). Integral valorisation of tomato by-products towards bioactive compounds recovery: human health benefits. *Food Chemistry*. 140(1), 135319. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135319>
- Espin, S., Gonzalez-Manzano, S., Taco, V., Poveda, C., Ayuda-Durán, B., Gonzalez-Paramas, A.M., & Santos-Buelga, C. (2016). Phenolic composition and antioxidant capacity of yellow and purple-red Ecuadorian cultivars of tree tomato (*Solanum betaceum* Cav.). *Food Chemistry*, 194(1), 1073–80. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.131>
- Folin O, Ciocalteu V. (1927). Tyrosine and tryptophane in proteins. *Journal of Biological Chemistry*. 73(2), 627–648. https://developmentalbiology.wustl.edu/wp-content/uploads/2018/10/Folin_1927-2553row.pdf
- Gómez-Maqueo, A., Escobedo-Avellaneda, Z., & Welti-Chanes, J. (2020). Phenolic compounds

- in mesoamerican fruits—characterization, health potential and processing with innovative technologies. *International Journal of Molecular Sciences*, 7(21), 8357. <https://doi.org/10.3390/ijms21218357>
- González Mendoza, D., Tzintzun-Camacho, O., & Méndez-Trujillo, V. (2022). Determination of antioxidant activity and phenolic compounds in different Mexican craft beers. *Revista Colombiana De Investigaciones Agroindustriales*, 9(1), 46–54. <https://doi.org/10.23850/24220582.4713>
- González-Mendoza, D., Troncoso-Rojas, R., Ceceña Durán, C., Grimaldo-Juárez, O., Zamora-Bustillo, R., & Ruiz-Sánchez, E. (2015). Compuestos fenólicos y capacidad antioxidante presentes en tres variedades de berenjena cultivadas en el valle de Mexicali, Baja California. *Idesia (Arica)*, 33(3), 17–21. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292015000300003>
- Gümüşay, Ö.A., Borazan, A.A., Ercal, N., & Demirkol, O. (2015). Drying effects on the antioxidant properties of tomatoes and ginger. *Food Chemistry*, 173(15), 156–62. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.162>
- Harini, R., Muthal, T., Chidanand, D.V., & Sunil, C.K. (2019). Study on physiochemical quality characteristics of tomato slices dried using innovative drying system. *International Journal of Conservation Science*, 7(3), 4719–4723. <https://www.chemjournal.com/archives/2019/vol7issue3/PartBZ/7-3-613-865.pdf>
- Ibrahim, A., EL-Iraqi, M., Osman, T., & Hendawey, Y. (2017). Bio-engineering studies for tomato pomace powder production as a nutritional valuable material. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering, Mansoura University*, 8(12), 671–680. <https://doi.org/10.21608/JSSAE.2017.38212>
- INEGI. (2007). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007. <https://www.inegi.org.mx/programas/cagf/2007/>
- Jorge, A., Sauer Leal, E., Sequinel, R., Sequinel, T., Kubaski, E. T., & Tebcherani, S. M. (2018). Changes in the composition of tomato powder (*Lycopersicon esculentum* Mill) resulting from different drying methods. *Journal of food processing and preservation*, 42(5), e13595. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13595>
- Kim, H.S., & Chin, K.B. (2016). Effects of drying temperature on antioxidant activities of tomato powder and storage stability of pork patties. *Korean journal for food science of animal resources*, 36(1), 51–60. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2016.36.1.51>
- Leyva, R., Constán-Aguilar, C., Blasco, B., Sánchez-Rodríguez, E., Romero, L., Soriano, T., & Ruiz, J.M. (2014). Effects of climatic control on tomato yield and nutritional quality in Mediterranean screen house. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(1), 63–70. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6191>
- Luna-Guevara, M.L., González-Sánchez, T., Delgado-Alvarado, A., Ramos-Cassellis, M.E., Pérez-Luna, J.G., & Luna-Guevara, J.J. (2020). Study of the quality and antioxidant properties of tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) under different postharvest and dehydration conditions. *Agro Productividad*, 13(9) <https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1662>
- Lutz, M., Hernández, J., & Henríquez, C. (2015). Phenolic content and antioxidant capacity in fresh and dry fruits and vegetables grown in Chile. *CyTA - Journal of Food*, 13(4), 541–547. <https://doi.org/10.1080/19476337.2015.1012743>
- Maqsood, S., Omer, I., & Eldin, A.K. (2015). Quality attributes, moisture sorption isotherm, phenolic content and antioxidative activities of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) as influenced by method of drying. *Journal of Food Science and Technology*, 52(11), 7059–7069. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1827-y>
- Mendelová, A., Mendel, L., Fikselová, M., & Mareček, J. (2021). Carotenoid and antioxidant retention of the dehydrated tomato products affected by their different technological treatments. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 10(3), 409–412. <https://doi.org/10.15414/jmbfs.2020.10.3.409-412>
- Méndez-Trujillo, V., & González-Mendoza, D. (2021). Preliminary studies of bioactive compounds and color in Mexican red wines from Baja California region. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 8(1), 42–49. <https://doi.org/10.23850/24220582.3758>
- Montaño-Méndez, I.E., Valenzuela Patrón, I.N., & Villavicencio López, K.V. (2021). Competitividad del tomate rojo de México en el mercado internacional: análisis 2003–2017. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(7), 1185–1197. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i7.2531>
- Moreno, G.D.C., & Díaz-Moreno, A.C. (2017). Effect of air drying process on the physicochemical, antioxidant, and microstructural characteristics of tomato cv. Chonto. *Agronomía Colombiana*, 35(1), 100–106. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v35n1.57727>
- Nikita, S.B., Shivanand S. S., Arun S. M., & Bhaskar N. T. (2021). Drying of tomatoes and tomato processing waste: a critical review of the quality aspects. *Drying Technology*, 39 (11), 1720–1744. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1910832>
- Nour, V., Panaite, T.D., Ropota, M., Turcu, R., Trandafir, I., & Corbu, R.B. (2018). Nutritional and bioactive compounds in dried tomato processing waste, CyTA - *Journal of Food*, 16(1), 222–229. <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1383514>

- Palmero, P., Panozzo, A., Simatupang, D., Hendrickx, M., & Van Loey, A. (2014). Lycopene and β -carotene transfer to oil and micellar phases during in vitro digestion of tomato and red carrot based-fractions. *Food Research International*, 64(2), 831-838. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.08.022>
- Peralta, I.E., & Spooner, D.M. (2007). History, origin and early cultivation of tomato (Solanaceae) In: Razdan MK, Mattoo AK, editors. *Genetic improvement of solanaceous crops*. United States: Tomato, Science Publishers, Enfield; pp. 1-27
- Rodriguez-Maturino, A., Troncoso-Rojas, R., Sánchez-Estrada, A., González-Mendoza, D., Ruiz-Sánchez, E., Zamora-Bustillos, R., Ceceña-Duran, C., Grimaldo-Juarez, O., & Aviles-Marin, M. (2015). Antifungal effect of phenolic and carotenoids extracts from chiltepin (*Capsicum annum* var. *glabriusculum*) on *Alternaria alternata* and *Fusarium oxysporum*. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(1), 72-7. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2014.12.005>
- Rosa, G.P., Barreto, M.D.C., Pinto, D.C., & Seca, A.M. (2020). A Green and Simple Protocol for Extraction and Application of a Peroxidase-Rich Enzymatic Extract. *Methods and protocols*. 3(2), 25. <https://doi.org/10.3390/mps3020025>
- Schanes, K., Dobering, K., & Gözet, B. (2018). Food waste matters - A systematic review of household food waste practices and their policy implications. *Journal of Cleaner Production*, 182(1), 978-991. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.030>
- Sengkhampan, N., & Phonkerd, N. (2019). Phenolic compound extraction from industrial tomato waste by ultrasound-assisted extraction. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 639(1), 012040. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/639/1/012040>
- Sullivan, V.K., Petersen, K.S., & Kris-Etherton, P.M. (2020). Dried fruit consumption and cardiometabolic health: a randomised crossover trial. *The British Journal of Nutrition*, 124(9), 912-921. <https://doi.org/10.1017/S0007114520002007>
- Szabo, K., Cătoi, A.F., & Vodnar, D.C. (2018). Bioactive compounds extracted from tomato processing by-products as a source of valuable nutrients. *Plant Foods Hum Nutrition*, 73(4), 268-277. <https://doi.org/10.1007/s11130-018-0691-0>
- Vázquez-Ovando, A., Mejía-Reyes, J. D., García-Cabrera, K. E., & Velázquez-Ovalle, G. (2022). Antioxidant capacity: concepts, quantification methods and use for tropical fruits and derived products characterization. *Revista Colombiana De Investigaciones Agroindustriales*, 9(1), 9-33. <https://doi.org/10.23850/24220582.4023>

Extraction and characterization of proteins present in concentrates from quality protein maize (QPM)

Extracción y caracterización de proteínas presentes en concentrados de maíz de alta calidad proteica (QPM)

Mariel Garrido-Balam^{ab}  nutriologa.mariel.garrido@gmail.com; Luis Antonio Chel-Guerrero^a  cguerrer@correo.uady.mx;
Arturo Francisco Castellanos-Ruelas^a  cruelas@correo.uady.mx; Yolanda Moguel-Ordóñez^c  moguel.yolanda@inifap.gob.mx;
David Abram Betancur-Ancona^a  bancona@correo.uady.mx

^aUniversidad Autónoma de Yucatán, Mérida Yucatán, México. Grupo de Investigación Desarrollo Alimentario-FIQ-UADY.

^bPosgrado Institucional de Ciencias Agropecuarias y Manejo de Recursos Naturales y Tropicales, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, México

^cCampo Experimental Mocochoá, Centro de Investigación Regional Sureste, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

Received: 10/08/2023 Approved: 06/10/2023

Citing, APA: Garrido-Balam, M., Chel-Guerrero, L.A., Castellanos-Ruelas, A. F., Moguel-Ordóñez, Y. y Betancur-Ancona, D.A. (2023). Extraction and characterization of proteins present in concentrates from quality protein maize (QPM). *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 10 (2), 76–87. <https://doi.org/10.23850/24220582.5809>

Abstract Quality protein maize (QPM) represents an alternative protein source for food. This work aims to characterize fractions, molecular weights, and thermal stability of the proteins present in QPM protein concentrates obtained by isoelectric precipitation. Flours from two treatments, non-nixtamalized and nixtamalized, as well as three types of maize varieties: Sac Beh (QPM white), Chichén Itzá (QPM yellow), and Blanco Uxmal (control), were obtained. The experiment was conducted using a bifactorial 2x3 design. Four isoelectric precipitation pHs were evaluated, having the highest yield and maximum protein precipitation at pH 2,5 at 4 °C. The relative protein fractions in the maize varieties in both treatments showed more elevated amounts of prolamins (PR) and glutelins (GT) compared to the control. All QPM showed higher GT and lower PR. The denaturing electrophoretic profile (SDS-PAGE) showed molecular weights for the concentrates ranging from 17,6 to 225 kDa (non-nixtamalized), from 12,9 to 132,2 kDa (nixtamalized), and from the fractions with weights from 10,2 to 220,7 kDa. The thermograms showed a change in thermal stability in the concentrates from non-nixtamalized flour; there were no thermal transitions in the nixtamalized ones due to the denaturation of the proteins when obtaining the samples during nixtamalization of all the varieties studied.

Keywords: Quality protein maize (QPM), fractionation, prolamins, glutelins, electrophoresis.

Resumen El maíz de alta calidad proteica (QPM) representa una fuente alternativa de proteína para la alimentación. Este trabajo tiene como objetivo caracterizar las fracciones, pesos moleculares y estabilidad térmica de las proteínas presentes en concentrados proteicos de maíces QPM, obtenidos por precipitación isoelectrica. Se obtuvieron harinas de dos tratamientos, sin nixtamalizar y nixtamalizado, así como tres tipos de variedades de maíz: Sac Beh (QPM blanco), Chichén Itzá (QPM amarillo) y Blanco Uxmal (BU testigo). El experimento se realizó utilizando un diseño bifactorial. Se evaluaron cuatro pHs de precipitación isoelectrica, teniendo el mayor rendimiento y máxima precipitación de proteína a pH 2,5 a 4 °C. La cantidad relativa de fracciones en las variedades de maíz en ambos tratamientos mostró cantidades más elevadas de prolaminas (PR) y glutelinas (GT) en comparación con el control. Todos los maíces QPM mostraron mayor cantidad de GT y menor PR. El perfil electroforético desnaturalizante (SDS-PAGE) indicó pesos moleculares para los concentrados que oscilaron entre 17,6 y 225 kDa (no nixtamalizados), entre 12,9 y 132,2 kDa (nixtamalizados), y para las fracciones con pesos desde 10,2 a 220,7 kDa. Los termogramas mostraron un cambio en la estabilidad térmica en los concentrados de harina no nixtamalizados; no hubo transiciones térmicas en los nixtamalizados debido a la desnaturalización de las proteínas durante la nixtamalización de todas las variedades estudiadas.

Palabras clave: Maíz de alta calidad de proteína, fraccionamiento, prolaminas, glutelinas, electroforesis.

Introduction

The existence of quality protein maize (QPM) offers an opportunity to reduce malnutrition and diseases associated with the deficiency of essential amino acids. Two maize with high protein quality had been developed, their Mayan names being Sac Beh (white grain) and Chichén Itzá (yellow grain). The QPMs in this study come from two white and one yellow maize, to which the *opaque-2* gene was added through the incorporation of endosperm phenotype modifier genes to the maize, which gives it the QPM or quality protein characteristic; this material retains 75 % of native germplasm and 25 % corresponds to the QPM characteristics (Mansilla, 2018).

QPM (a biofortified *opaque-2* mutant maize variety) improves the nutritional status of the population that depends on maize as a staple crop and contains a notable amount of tryptophan, lysine, and protein content, which are significantly different from the contents of normal maize varieties (Alamu *et al.*, 2022). Among the protein fractions in normal maize endosperm, zein or prolamin usually have a proportion of 60 %, glutelins of 34 %, albumin of 3 %, and 3 % of globulin (Caballero-Rothar *et al.*, 2019). There is a need to standardize protein extraction processes as to benefit from these, obtaining protein concentrates through specific isoelectric points.

The recording of molecular weights and obtaining of fractions by the solubility of the proteins of the maize varieties will give the guideline to identify the proteins and fractions present in the studied varieties, such as the identification of albumins (soluble in water), globulins (soluble in saline solutions), prolamins (soluble in alcohol) and glutelins (soluble in alkali) so the similarities and differences of the QPM varieties can be identified.

Therefore, the objective of this work was to determine some characteristics of the proteins present in protein concentrates obtained by isoelectric precipitation and fractionation by the solubility of QPM Sac Beh and Chichén Itzá maize varieties and a non-nixtamalized and nixtamalized control variety.

Materials and methods

Raw Materials

Quality protein maize (*Zea mays*, QPM) of Sac Beh (SB) and Chichén Itzá (ChI) varieties, developed by the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) for the state of Yucatán, and a control maize V-539 Blanco Uxmal (BU) were obtained from the Uxmal experimental site in Yucatan, Mexico.

Sample collection and preparation

The kernels were cleaned by removing damaged kernels, as well as impurities (stones and remnants of the husk) and were stored in refrigeration at 4 °C until use.

Non-nixtamalized maize flours

The kernels were crushed in an Oakland disk mill model ME-1501 and subsequently milled with the Cyclotec™ mill until a flour capable of passing through a 60 mesh (0,250 mm) was obtained.

Nixtamalized maize flours

A suspension was prepared with a ratio of 1:2 maize/calcium hydroxide at 1 % w/v, cooked at 100 °C for 25 - 30 min, and then allowed to rest for 19 h. The cooked maize (nixtamal) was washed 3 times with purified water in a 1:1 (v/v) ratio. The nixtamal was placed on stainless steel trays and dried in a Thermo scientific oven (Wyman Street Waltham, MA, USA) at 55 °C for 24 h, grounded in an Oakland disc mill, and subsequently with the Cyclotec™ mill until a flour capable of passing through a 60 mm mesh was obtained.

Isoelectric precipitation of proteins

The procedure reported by Wang and Wang (2004) with some modifications to adjust the isoelectric pH conditions, was used to obtain the concentrate. A pre-treatment was carried out for the separation of starch and protein through the use of the solvent NaOH at 0,1 % on the flours, with a solid-liquid ratio of 1:5 and 1:10 (w/v); two ratios were tested to evaluate in which ratio the protein of each treatment was better solubilized, leaving them at rest for 18 h at 18 °C, then adjusted to pH 9, homogenized, centrifuged, and separated. The supernatant was then recovered and the protein precipitation was performed. To determine the isoelectric point for protein precipitation, different pH values were used: 2,0; 2,5; 3,0; 3,5, and 4,0, all of them adjusted with 0,1% NaOH or 1 N HCl at times of 5, 10, 20 and 30 min at a temperature of 4 °C in the centrifugation. The isoelectric point was established at the pH value where the precipitate presented the highest yield of protein extractable.

Protein concentrates

For protein extraction, a suspension of the flour to NaOH 0,1% and 1:10 w/v ratio was used for non-nixtamalized maize and a 1:5 w/v ratio for the nixtamalized one. The differences in the ratios used were due to the dispersion capacity of the flours. The mixtures were left to rest for 18 h at 18 °C. After this time, were mixed with a KN - Lab IKA T18 digital Ultra - turrax homogenizer and sieved through 100 mesh (0,150 mm). The pH was adjusted to 9 and centrifuged at 3500 x g for 20 min at 4 °C using a Thermo Scientific Heraeus Megafuge 16R centrifuge to separate the starch. Using a siphon, the solubilized protein was separated.

The residues were washed with distilled water and then adjusted to the isoelectric point with 1 N hydrochloric acid to precipitate the proteins. The precipitate was centrifuged at 6000 x g

for 20 min at 4 °C in an Ortoalresa Digicen 21 R universal centrifuge, the pH was adjusted to 7 with 1N NaOH, and were freeze-dried at -47 °C and 13×10^{-3} mbar in a Labconco freeze-dryer for 5 days (Laing & Christefeller, 2004).

Protein Composition

Determination of this component for QPM (ChI and SB) and the control (BU) protein concentrates was performed according to the Nitrogen method 954,01 of the Association of Official Agricultural Chemists (AOAC, 2005).

Sample conditioning process

The complete and selective elimination of the soluble non-protein compounds present in the concentrates was carried out through defatting with hexane by Soxhlet method and dialysis for the removal of salts in Spectra/Por dialysis tubes of 14,6 mm diameter and MWCO 6000 to 8000 of cut off, subsequently they were immersed in a cold buffer solution of deionized water with pH 7,3. Three 6-h dialysates were performed for each sample and freeze-dried for 2 days. Protein quantification by the Bradford method was performed on the samples, using bovine serum albumin as a reference standard.

Fractionation by solubility of non-nixtamalized and nixtamalized protein concentrates

The extraction of the albumin (AB) and globulin (GB) fractions was performed using a modification of the method reported by Barba de la Rosa *et al.* (1992). The supernatant containing the AB and GB fractions was dialyzed with distilled water at 4 °C. It was then centrifuged to separate the AB (soluble) fraction from the GB (insoluble) fraction. The residue from AB and GB extraction was dispersed with 70 % isopropanol for prolamins (PR) extraction. Glutelin (GT) extraction was carried out by dispersing the residue of PR extraction with a 1 M NaOH solution at a 1:15 w/v ratio, stirring for 1 h. The percentage of protein extracted in each fraction

was calculated as: (g of protein extracted in the fraction / g of protein in the concentrate) x 100. The protein content of the maize concentrates was calculated by the method of Bradford, using bovine serum albumin as a reference standard.

Electrophoretic analysis of maize protein concentrates.

The fractions obtained were subjected to the following evaluations:

- **Denaturing (SDS-PAGE):** following Laemmli (1970), 12 % polyacrylamide gels and proteins of 225, 150, 100, 75, 50, 35, 25, 15, and 10 kDa Bio-Rad catalog number V849A as standards were used. The protein loaded was 20 µg per lane. The electrophoretic analysis was performed with a constant current of 8 - 10 V/gel for 5 h. At the end of the electrophoretic analysis then they were stained with a 0,1% solution of Coomassie blue G-250 (Fluka 27815) in water:methanol:acetic acid in a 4:1:5 ratio (v/v/v) for 1 h. Subsequently, they were decolorized using a mixture of water:acetic acid:methanol in 5:1:2 ratio (v/v/v) for 12 h. Molecular weights were determined by linear regression analysis based on the standard RFs.

The electrophoretic analysis was performed with a constant current of 8 - 10 V/gel for 5 h. At the end of the electrophoretic analysis then they were stained with a 0,1 % solution of Coomassie blue G - 250 (Fluka 27815) in water:methanol:acetic acid in a 4:1:5 ratio (v/v/v) for 1 h. Subsequently, they were decolorized using a mixture of water:acetic acid:methanol in 5:1:2 ratio (v/v/v) for 12 h. Molecular weights were determined by linear regression analysis based on the standard RFs.

- **Native-PAGE:** modification of Laemmli's technique (1970), in which SDS was excluded and replaced by distilled water. Proteins of 225, 150, 100, 75, 50, 35, 25, 15, and 10 kDa (Bio-Rad) and 7 % concentration gels containing

30 % acrylamide (Sigma A - 9099) and 0,8 % bisacrylamide (Sigma M-2022) were used. The sample volume loaded was 5 to 10 µL. The electrophoretic analysis was equal to the denaturation technique.

- **Reducing denaturants (SDS-PAGE Me):** the method of Schagger and Jagow (1987) was used. The distilled water was replaced by 0.5 ml of mercaptoethanol. Proteins of 225, 150, 100, 75, 50, 35, 25, 15, and 10 kDa (Bio-Rad) and 13% polyacrylamide gels were used. The gels were stained in the same way as denaturing SDS-PAGE and Native-PAGE, staining with the same dye, for the same time and decolorizing for 12 h with the same mixture.

- **Denaturing electrophoretic analysis of maize protein concentrates fractions (SDS-PAGE):** The technique described by Laemmli (1970) as explained before was used with the same standards, sample volume, constant current, and time as previously established with the protein concentrates. The gels were stained and decolorized as indicated by the established technique.

Differential scanning calorimetry (DSC) of maize concentrates

The modified methodology of Michnik and Drzazga (2010) was used. 2,5 mg (d.b.) of sample were weighed and suspended in 12,5 µL of deionized water (30 %). Sample pans (Perkin-Elmer No. 0219 - 0062) were used, allowing the samples to stabilize for 30 min at room temperature (25 °C) and performing a heating flow rate of 10 °C /min at a range of 30 to 120° with a Perkin Elmer DSC-6 Pyris.

Experimental design and statistical analysis.

A 2x3 bifactorial design was carried out, the factors were flour process (Non-nixtamalized and nixtamalized) and the maize varieties Sac

Beh (SB), Chichén Itzá (ChI) and Blanco Uxmal (BU, control). This was performed in triplicate. The statistical analysis was carried out with a two-way analysis of variance (ANOVA). The statistical software STATGRAPHICS Centurion XVIII was used.

Results and discussion

The results obtained indicated significant differences ($p < 0,05$) in the protein content of the flours of the varieties under study. The non-nixtamalized and nixtamalized Sac-Beh varieties, with 10,79 and 10,31 %, presented the highest protein percentages among the varieties studied; the results were lower compared to the hybrid Sac Beh (11,37 %) and higher than the predecessor Sac Beh (9,77 %) according to

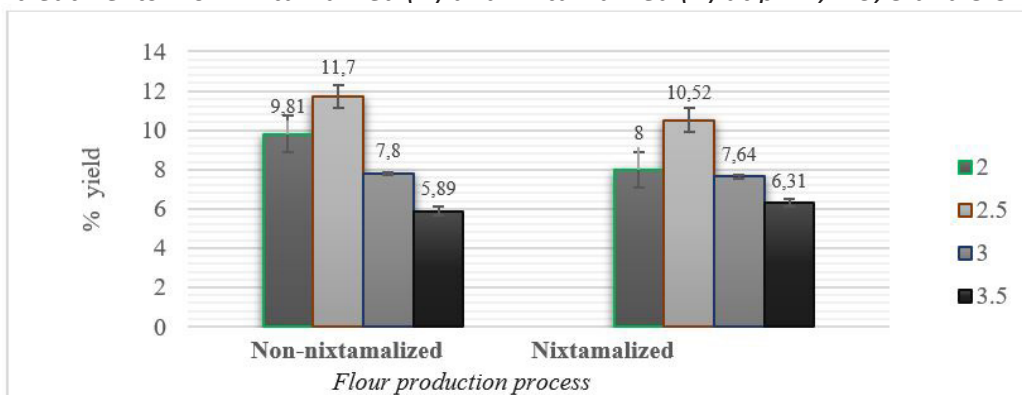
Chan-Chan *et al.* (2021). Palacios *et al.* (2020) conducted studies with QPM hybrids that reported between 8,2 and 9,4 %, lower than those found in this study.

Determination of the isoelectric point

Higher yields were recorded based on the weight and protein quantification for isoelectric precipitation at pH 2,5 (**Figure 1**). The extractable concentrate is smaller in quantity than the initial raw material. The behavior of pH does significantly affect the yield; this coincides with Aquino-Méndez *et al.* (2015), who states that factors such as the type of solvent, raw material, ionic strength, temperature, and mainly pH, significantly affect the protein extraction process.

Figure 1

Yield of protein concentrates obtained from maize flours subjected to different treatments: non-nixtamalized (A) and nixtamalized (B) at pH 2, 2.5, 3 and 3.5.



The protein concentrates from non-nixtamalized and nixtamalized flours showed a relative balance between the amount of fat and the amount of protein, which indicate that there is a ratio of up to 30 % fat and 70 % protein existent in the non-nixtamalized concentrates in the varieties. However, the amount of protein in the concentrates of the nixtamalized varieties was reduced, a consequence of the loss of pericarp and protein during nixtamalization (**Table 1**).

Therefore, it is congruent that the non-nixtamalized ChI defatted varieties registered a higher percentage of protein in all the treatments and varieties present in the research, while the nixtamalized ChI non-defatted variety presented a lower percentage of protein. There were significant differences ($p < 0,05$) between the QPM concentrates and the control when non-nixtamalized and nixtamalized. Molina-Paredes *et al.* (2018) pointed out that there isn't just one pH value as an isoelectric point, since

it depends on the primary composition of the protein chains that make up the protein, the amino acids, and peptides that constitute it, as well as the interactions that exist between

these molecules and the medium. The results for fiber and nitrogen-free extract did not show significant differences ($p < 0,05$) between varieties.

Table 1

Protein content of non-nixtamalized (A) and nixtamalized (B) QPM Chichen Itzá (ChI) and Sac Beh (SB) maize concentrates and a control maize Blanco Uxmál (BU) (% d.b. 1).

Variety	Protein from fat concentrates	Protein from defatted concentrates
ChI(A)	42,09±2,3 ^c	86,81±1,15 ^f
ChI(B)	21,99±4,54 ^b	59,62±1,67 ^c
SB (A)	43,35±2,3 ^{cd}	75,137±2,66 ^e
SB (B)	19,12±5,23 ^a	57,083±1,75 ^b
BU (A)	44,08±1,29 ^d	64,393±1,55 ^d
BU (B)	22,56±4,43 ^b	51,347±1,94 ^a

Note. ^{a-f} Different letters in the same column indicate that the means are statistically different ($p < 0,05$), ¹ Dry basis, data are the average of three replicates.

Solubility fractionation of proteins

The protein fraction with the highest relative percentage in the QPM varieties were prolamins (PR), followed by globulins (GB), albumins (AB) and glutelins (GT) (Table 2).

A higher percentage of total protein was obtained in the BU (non-nixtamalized) variety with 86,81%, and there was a significant difference ($p < 0,05$) in the protein content obtained between varieties from non-nixtamalized and nixtamalized flours. The majority fraction for all varieties was PR, followed by GL; the variety with the highest amount of PR and GL was BU (non-nixtamalized) with 38,68 % and 25,41 % respectively with significant differences ($p < 0,05$) when compared with all varieties from non-nixtamalized and nixtamalized flour of the present study. In reference to the fractions obtained from PR in the QPM varieties, there was no significant difference ($p > 0,05$), the variety ChI (non-nixtamalized) presented a significant difference ($p < 0,05$), presenting the lowest percentage of 22,66 %. Aguirre-Mancilla *et al.* (2020) reported in a study with

QPM accession (non-nixtamalized), a highest protein quality because its endosperm content includes high levels of albumins and globulins with a decreased zein content. These proteins constituted the main fraction of the storage proteins, representing 50 to 70 %.

The relative percentages of the QPMs in GT were higher compared to the control maize, although the relative % of PR in the QPMs was lower in comparison. Approximately 80 % of the grain proteins were storage proteins. PR or zeins represent the major part of grain protein (52 %), AB and GB represent 5 - 7 % of grain nitrogen, and GT represents 25 % of grain nitrogen according to Mansilla (2018). The fractionation of QPM (ChI and SB) and control (BU) maize concentrates showed differences. This phenomenon occurs because in common maize the zein content is 47 % and GT 35 % while in maize modified by the *o2* genes the zein content drops to 22 % and GT increases to 50 % of its initial value, Ortiz-Martínez *et al.* (2017). Therefore, the increase of GT fractions, which have a good amino acid balance of lysine and tryptophan, is preferred, Chavez *et al.* (2022).

Table 2

Proportion of fractions of protein concentrates of QPM varieties (ChI and SB) and a control variety (BU) non-nixtamalized (A) and nixtamalized (B).

Variety	Fractions	Extracted protein (%)	% Relative
ChI(A)	AB	1,83±0,25 ^a	3,59
ChI(A)	GB	4,84±1,13 ^b	9,43
ChI(A)	PR	22,66±0,46 ^d	44,13
ChI(A)	GT	22,01±0,09 ^c	42,85
TOTAL		51,35	100
ChI(B)	AB	0,143±0042 ^a	0,25
ChI(B)	GB	10,32±452 ^b	17,31
ChI(B)	PR	25,96±0,042 ^d	43,54
ChI(B)	GT	23,19±0,268 ^c	38,9
TOTAL		59,62	100
SB(A)	AB	16,64 ± 1,35 ^b	22,17
SB(A)	GB	8,54 ± 0,18 ^a	11,37
SB(A)	PR	25,96 ± 0 ^d	34,55
SB(A)	GT	23,98 ± 0,01 ^c	31,91
TOTAL		75,14	100
SB(B)	AB	5,63 ± 0,5 ^a	9,71
SB(B)	GB	8,549 ± 0,56 ^b	14,72
SB(B)	PR	25,94 ± 0,08 ^d	44,67
SB(B)	GT	17,94 ± 0,11 ^c	30,9
TOTAL		58,08	100
BU(A)	AB	6,07 ± 0,04 ^a	7,02
BU(A)	GB	16,63 ± 0,14 ^b	19,15
BU(A)	PR	38,68 ± 0,03 ^d	44,56
BU(A)	GT	25,41 ± 0,15 ^c	29,27
TOTAL		86,81	100
BU(B)	AB	5,68 ± 0,7 ^a	8,84
BU(B)	GB	7,66 ± 0,46 ^b	11,9
BU(B)	PR	31,60 ± 0,56 ^d	49,07
BU(B)	GT	19,44 ± 0,45 ^c	30,19
TOTAL		64,39	100

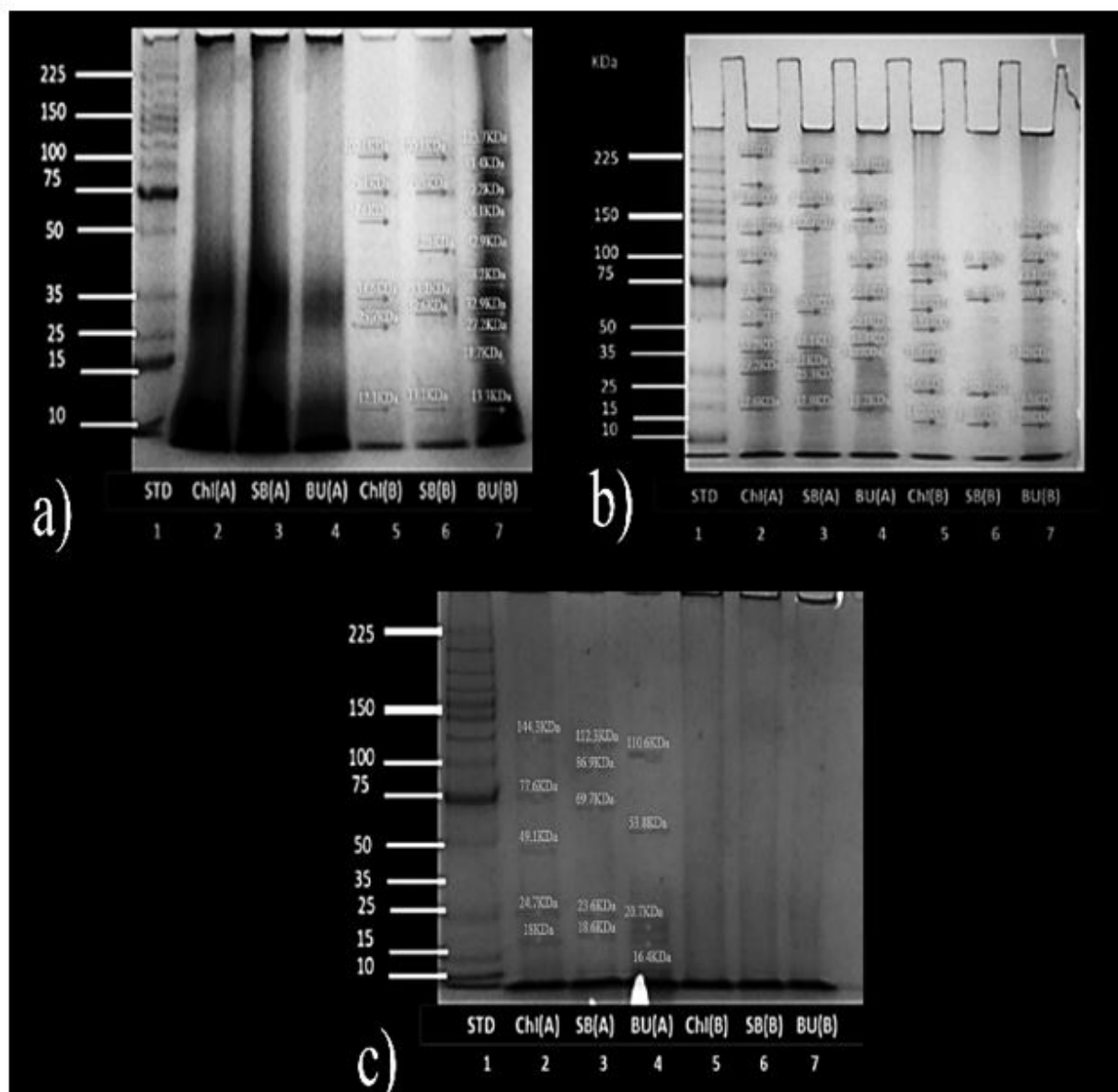
Electrophoretic analysis of maize concentrates

In the electrophoretic profile of maize concentrates by Native - PAGE electrophoresis (Figure 2), bands between 12,1 to 125,7 kDa were observed in lanes 5, 6, and 7 in the three varieties of nixtamalized maize. The corresponding

varieties of non-nixtamalized maize in lanes 2, 3, and 4 didn't show any defined bands (Figure 2). The nixtamalization process of the maize reduced the solubility of albumins and globulins and the same occurred with the solubility of PRs. The appearance of high-molecular-weight GTs was also observed.

Figure 2

Native-PAGE (a), denaturing SDS-PAGE (b), and reducing denaturing SDS-PAGE-Me (c) electrophoresis of protein concentrates from QPM (SB and ChI) and control (BU) maize flour subjected to treatment A (non-nixtamalized) and B (nixtamalized).



In commercial zein, a molecular weight of approximately 21,5 kDa were reported and in studies performed with zein fractions obtained through polyacrylamide gel electrophoresis (SDS - PAGE), molecular sizes between 18 to 10 kDa were observed (Nuñez-Terrones, 2018). This author observed that QPM presented

a lower prolamin content than normal maize ranging from 35,39 to 61,28 kDa. The denaturing electrophoresis (SDS-PAGE) was chosen to determine the molecular weights of the protein fractions, obtaining the following electrophoretic profiles (Figure 3).

Figure 3

Denaturing electrophoresis (SDS-PAGE) of the fractions (Albumins (a), Globulins (b), Prolamines (c) and Glutelins (d) of the QPM protein concentrates (SB and ChI) and control (BU) subjected to treatment A (not nixtamalized) and B (nixtamalized) obtained by solubility.

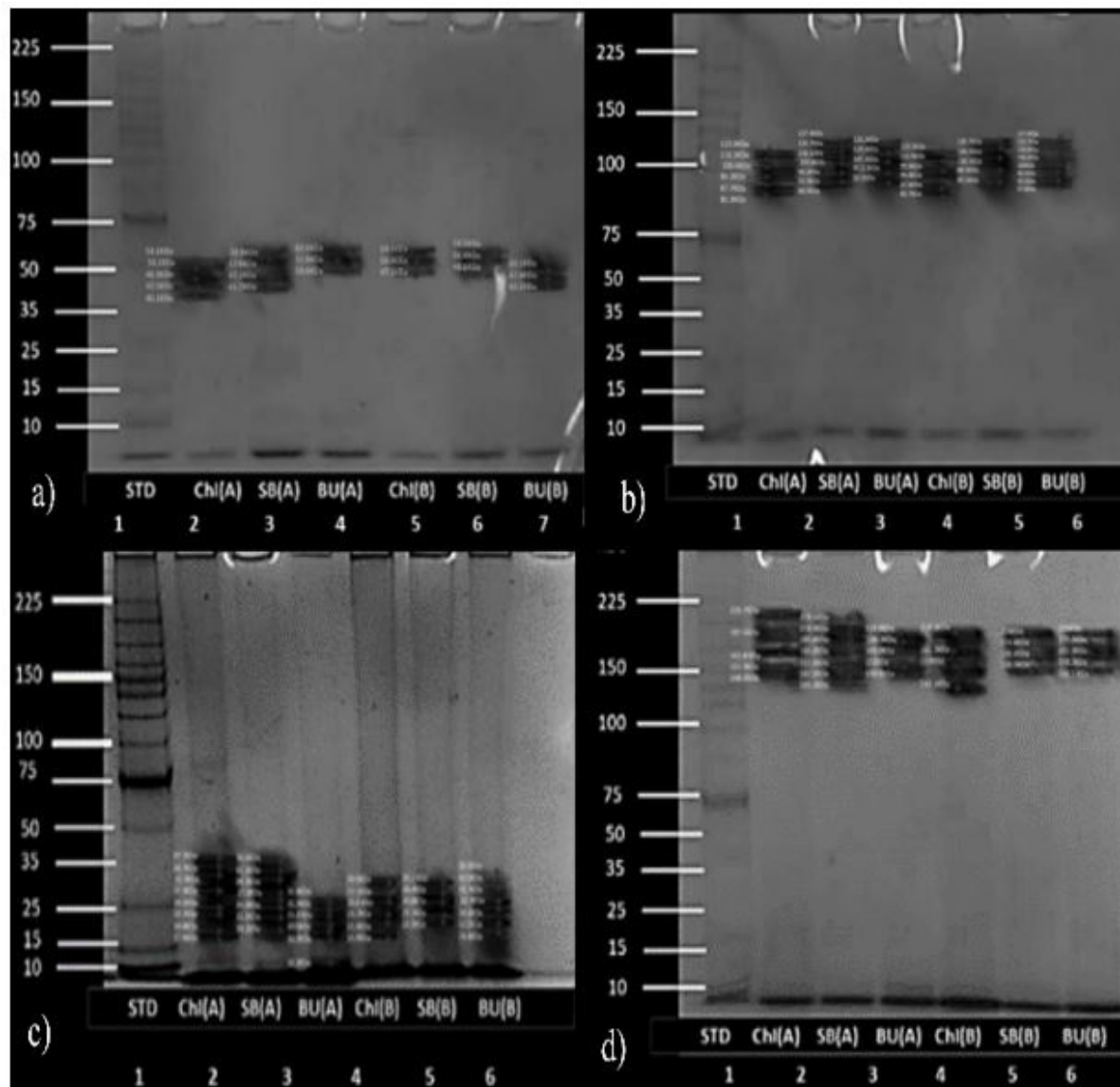


Table 3 shows the molecular weights and number of bands of the fractions obtained by denaturing electrophoresis (SDS-PAGE) of the different varieties of concentrates obtained from maize for the present study. The GTs exhibit higher molecular weights. The variety with the highest molecular weight was recorded in BU (nixtamalized) with 150,5 kDa and the band with the lowest molecular weight was observed in variety SB (nixtamalized) with 142,1 kDa. The band with the lowest molecular weight was 200 kDa in BU (nixtamalized).

The non-nixtamalized QPM showed the highest number of bands and molecular weights compared to the nixtamalized QPM. The QPM ChI (non-nixtamalized) in lane 2 showed the highest molecular band weight with 37,7 kDa, followed by SB (non-nixtamalized) with 36,2 kDa in lane 3. The nixtamalized QPMs obtained lower molecular weights compared to the BU control (19,8 to 30,3 kDa) and a lower number of bands in their respective lanes, 4 and 5 (ChI 16,9 to 29,0 kDa and 22,3 to 29,1 kDa). AB and GBs

presented a lower number of bands in relation to PRL fractions, and their molecular weights

ranged from 40,1 to 50,0 kDa in ABs and from 85,3 to 124,4 kDa in GB.

Table 3

Molecular weights of fractions of protein concentrates of nixtamalized (A) and non-nixtamalized (B) QPM (ChI and SB) and BU maize obtained by denaturing electrophoresis (SDS-PAGE).

Fractions	ChI (A) (kDa)	ChI (B) (kDa)	SB (A) (kDa)	SB (B) (kDa)	BU (A) (kDa)	BU (B) (kDa)
AB	40,1 – 54,1	47,6 – 59,6	41,7 – 59,8	48,6 – 59,5	50,0 – 62,0	42,3 – 50,1
GB	85,3 – 123,9	85,7 – 123,3	86,5 – 127,4	89,1 – 126,7	92,2 – 125,3	87,8 – 127,4
PR	17,4 – 37,7	16,9 – 29,0	20,2 – 36,2	22,3 – 29,1	10,2 – 26,8	19,8 – 30,3
GT	148,6 – 220,7	142,1 – 219,1	143,2 – 219,1	150,3 – 216	149 – 218,9	150,5 – 200

PLR had generally lower molecular weights. As observed in both ChI and SB without nixtamalization, they had some bands with more weight in GT and GB, and lower in AB and PR when compared to the other treatments. According to previous research maize prolamins are grouped into α -zeins of 19 kDa and 22 kDa, β -zeins of 15 kDa, γ -zeins of 16 kDa, 27 kDa, and 5 kDa, and δ -zeins of 10 kDa and 18 kDa (Li *et al.*, 2021).

The electrophoretic pattern of prolamins found in this work can be seen in the presence of bands of molecular weights located from 10,2 to 37,7 kDa, corresponding to fraction α -zeins (21,00–26 kDa), which matches that reported by Huang *et al.* (2022). Zein is a mixed polypeptide comprised of α -zein (21 – 25 kDa, 75 – 85 %), β -zein (17 –18 kDa, 10 – 15 %), γ -zein (27 kDa, 5 – 10 %) and δ -zein (10 kDa, 3 %), respectively, Molecular weights from 16,7 to 24,2 kDa correspond to the β -zein fraction (18,00 – 24 kDa), similar to those reported by Abdelsalam *et al.* (2021), (18 to 24 kDa). The bands ranging from 10,00 to 17,2 kDa and lower than 10 kDa correspond to zein peptides, as indicated by Li *et al.* (2021). According to Aguirre-Mancilla *et al.* (2020), the prolamins of INIFAP-QPM accession (non-nixtamalized) had an electrophoretic pattern that included bands 67, 45, 25, 20, 16 and 13,2 kDa. One band at 33,1 kDa that the other materials under study did not present was reported.

It can be concluded that there are differences in the bands and molecular weights when comparing non-nixtamalized and nixtamalized maize, as well as a decrease in the solubility of the different protein fractions obtained by the different techniques used. In relation to the effect observed in the QPM and the control maize, there were differences in bands and molecular weights in the non-nixtamalized and nixtamalized maize, the ones with the modified gene presented a decrease in the solubility of the different fractions in relation to the control and the most notable changes were noticed in the nixtamalized QPM where high temperatures were applied and an adjustment of pH was done for the isoelectric precipitation to obtain the concentrate.

Differential scanning calorimetry (DSC) of QPM and control maize concentrates

The concentrates from non-nixtamalized flour of all varieties presented endothermic transitions during the analysis of thermal behavior, the samples under study recorded for the QPM varieties showed a slight increase in the denaturation enthalpy ($DH_{total} = 7,12 \pm 0,52$ J/g) and transition temperatures (T_p of $82,40 \pm 1,91$ °C and $89,28 \pm 0,76$ °C), for ChI (non-nixtamalized) and $DH_{total} = (6,23 \pm 0,32$ J/g), (T_p of $80,20 \pm 1,12$ °C and $81,16 \pm 0,71$ °C), for SB (non-nixtamalized), respectively. For the control BU (non-nixtamalized) a slight increase

in denaturation enthalpy ($DH_{total} = 5,54 \pm 01,02$ J/g), (T_p of $67,90 \pm 1,10$ °C and $70,17 \pm 0,41$ °C) was recorded.

This result was confirmed doing an assay with a standard egg albumin sample with which a transition was recorded at $87,765 \pm 1,21$ °C to $76 \pm 1,32$ °C, with a DH of $66,4 \pm 01,00$ J/g. The starting raw material (non-nixtamalized concentrates) and the absence of denaturing treatments during the obtaining of the concentrate justify the absence of peaks in the thermograms of concentrates from nixtamalized flour and the presence of peaks in the non-nixtamalized ones, this due to the preservation of that part of the native structure of the proteins present in the varieties of non-nixtamalized maize concentrates.

The nixtamalized concentrates didn't register denaturation enthalpies and transition temperatures could have been affected in the process of obtaining the sample by the alkaline treatment realized before obtaining the concentrate, which attributes this effect to the decrease in solubility, and formation of disulfide bridges between zein monomers and cross-linking of disulfide bonds Khalid *et al*, (2022). Therefore, in the varieties of maize concentrates of the present study, the disulfide bonds of the non-nixtamalized varieties were preserved during sample collection, the increase in denaturation enthalpy and transition temperature was observed during the differential scanning analysis; the opposite happened with the concentrates from nixtamalized flours, the proteins were denatured in the process of obtaining the samples during nixtamalization.

Conclusions

The varieties of non-nixtamalized and nixtamalized maize flours were precipitated at pH 2,5 obtaining protein concentrates, the defatting of the concentrates had positive

effects by notably increasing the percentages of protein in both treatments. Nixtamalization affected the purity of the concentrates and denaturation of the proteins present due to the high temperatures and the presence of salts.

The decrease in the fraction of prolamins (zeins) and increase of glutelins in the QPM varieties used in this study, compared to the BU confirmed the positive effect of the presence of *opaque -2* gene. Denaturing electrophoresis (SDS-PAGE) allowed the determination of the molecular weight of the unknown proteins.

Differential scanning calorimetry proved that the non-nixtamalized QPM wasn't denatured during the breeding process, confirming the results of the gel electrophoresis in the native state, where it was observed that the lanes showed protein bands with a structure corresponding to QPM and control maize. With non-nixtamalized maize there was an increase in the denaturation enthalpy and the transition temperature. A different case occurred with the concentrates from nixtamalized maize where the proteins were denatured in the process.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) for the state of Yucatán, for providing the QPM grain samples and the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for the financial support.

References

- Abdelsalam, A. M., Somaida, A., Ayoub, A. M., Alsharif, F. M., Preis, E., Wojcik, M. & Bakowsky, U. (2021). Surface-tailored zein nanoparticles: strategies and applications, *Pharmaceutics*, 13(9), 1354. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13091354>
- Aguirre-Mancilla, C. L., Godínez-Galán, R. Y., Raya-Pérez, J. C., Gutiérrez-Benicio, G. M., Ramírez-Pimentel, J. G., Covarrubias-Prieto & García-Rodríguez, J. G. (2020). Protein content and

- quality of seeds in central mexican maize (*Zea mays*) accessions (2020). *Rev. Fac. Cienc. Agrar. UNCuyo*, 52(1), 14-25. <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/RFCFA/article/view/3065/2218>
- Alamu, E.O., Menkir, A., Adesokan, M., Fawole, S. & Maziya-Dixon, B. (2022). Near-infrared reflectance spectrophotometry (NIRS) application in the amino acid profiling of quality protein maize (QPM), *Foods*, 11(18),2779, <https://doi.org/10.3390/foods11182779>
- Association of Official Analytical Chemistry [AOAC] International. (2005). Official methods of analysis. AOAC method 954.01. Determination of Nitrogen. 18th Edition, Washington D.C. https://www.researchgate.net/publication/292783651_AOAC_2005#fullTextFileContent
- Aquino-Méndez, E. M. (2015). Optimization of the protein extraction process of sachu inchi (*Plukenetia volubilis*, L.) cake, [MSc. Thesis]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/1926>
- Barba De La Rosa, A., Guéguen, J., Paredes-López. O. & Viroben, G. (1992). Fractionation procedures, electrophoresis characterization, and amino acid composition of amarant seeds proteins, *J Agric Food Chem*, 40, 931-936. <https://doi.org/10.1021/jf00018a002>
- Caballero-Rothar, N.N., Abdala, L.J., Borrás, L. & Gerde, J.A. (2019). Role of yield genetic progress in biochemical determinants of maize kernel hardness. *J Cereal Sci*, 87, 301-310. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.04.019>
- Chan-Chan M., Ordoñez-Moguel, Y., Gallegos-Tintoré, S., Chel-Guerrero. L. & Betancur-Ancona, D. (2021). Chemical and nutritional characterization of high protein quality maize (*Zea mays* L.) varieties developed in Yucatan, Mexico, *Biotechnia*, 23(2), 11-21. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v23i2.1334>
- Chávez, A., Narro León, L. A., Jara Calvo, T. W., Narro León, T. P., Medina Hoyos, A. E., Cieza Ruiz, I., Díaz Chuquisuta, P., Alvarado Rodríguez, R. & Escobal Valencia, F. (2022). Tecnologías disponibles para incrementar la producción de maíz en Perú. *ACI Avances En Ciencias E Ingenierías*, 14(1), 1-31. <https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2507>
- Huang, W., Liu, S., Li, Z., Liu, Y., Xie, Q., & Jiang, Y. (2022). Analysis of the differences in self-assembly behaviour, molecular structure and drug delivery performance between α and β -Zein, *Industrial Crops and Products*, 181, 114822. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114822>
- Khalid, W., Arshad, M. S., Aslam, N., Mukhtar, S., Rahim, M. A., Ranjha, M.M. A. N. & Awuchi, C.G. (2022). Food applications of sorghum derived kafirins potentially valuable in celiac disease, *International Journal of Food Properties*, 25(1), 2348-2363. <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2135532>
- Laemmli, U.K. (1970). Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4, *Nature*, 227, 680-685. <https://doi.org/10.1038/227680a0>
- Laing, W. & Christefeller, J. (2004). Protein extraction from plant tissues, *Current Protocols in Protein Science*, 38(1), 4.7.1-4.7.7. <https://doi.org/10.1002/0471140864.ps0407s38>
- Li, P., Li, Z., Xie, G., & Zhang, J. (2021). Trihelix transcription factor ZmThx20 is required for kernel development in maize, *International Journal of Molecular Sciences*, 22(22), 12137. <https://doi.org/10.3390/ijms222212137>
- Mansilla, P. S. (2018), Evaluation of the nutritional value of specialty corn (*Zea mays* L.): selection for agri-food quality, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, [Doctoral Thesis]. <http://hdl.handle.net/11336/89302>
- Michnik, A. & Drzazga, Z. (2010). Thermal denaturation of human serum protein mixtures: a DSC study, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 101(2), 513-518. <https://doi.org/10.1007/s10973-010-0826-5>
- Molina-Paredes, K. E. (2018). Influence of pH on the extraction of protein isolate from quinoa (*Chenopodium quinoa* willd) white juli and pasankalla variety, [Doctoral Thesis]. <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3277776>
- Núñez-Terrones, E. (2018). Genetic evaluation for nutritional components in a crossbreeding scheme of white grain maize [Master's thesis]. <http://hdl.handle.net/10521/3289>
- Ortiz-Martínez, M., Otero-Pappatheodorou, J.T., Serna-Saldivar, S.O. & García-Lara, S. (2017). Antioxidant activity and characterization of protein fractions and hydrolysates from normal and quality protein maize kernels, *Journal of Cereal Science*, 76, 85-91. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.05.021>
- Palacios-Rojas, N., McCulley, L., Kaeppler, M., Titcomb, T. J., Gunaratna, N. S., Lopez-Ridaura, S. & Tanumihardjo, S.A. (2020). Mining maize diversity and improving its nutritional aspects within agro-food systems, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(4), 1809-1834. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12552>
- Schägger, H. & von Jagow, G. (1987). Tricine-sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis for the separation of proteins in the range from 1 to 100 kDa. *Anal. Biochemistry*, 166(2), 368-79. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(87\)90587-2](https://doi.org/10.1016/0003-2697(87)90587-2)
- Wang, L. & Wang, Y. J. (2004). Isolation of rice starch by neutral protease and high-intensity ultrasound, *Journal of Cereal Science*, 39, 291-296. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2003.11.002>

Morfometría de cladodios de nopal cultivado en Santander – Colombia: estudio exploratorio

Cladodes morphometry grown in Santander – Colombia: an exploratory study

Adriana Patricia Ramírez-Castaño^a aramirez887@unab.edu.co; Francisco Javier León^a fleon2@unab.edu.co; Yudy Mariana Alfaro-Wisaquillo^b yalfaro321@unab.edu.co; Rafael Mariano Alvarez-Quintero^c ralvarezq@ces.edu.co; Paola Andrea Zapata-Ocampo^c opazapata@ces.edu.co

^aUniversidad Autónoma de Bucaramanga, Santander – Colombia. Facultad de Estudios Técnicos y Tecnológicos. Regencia de Farmacia.

^bUniversidad Autónoma de Bucaramanga, Santander – Colombia. Facultad de Estudios Técnicos y Tecnológicos. Gestión Gastronómica – Gastronomía y Alta Cocina.

^cUniversidad CES, Bucaramanga – Colombia. Facultad de Ciencias y Biotecnología. Química Farmacéutica.

Recibido: 07/06/2023 Aceptado: 20/10/2023

Citar, APA: Ramírez-Castaño, A. P., León, F. J., Alfaro-Wisaquillo, Y. M., Alvarez-Quintero, R. M. y Zapata-Ocampo, P. A. (2023). Morfometría de cladodios de nopal cultivado en Santander – Colombia: estudio exploratorio. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 10 (2), 88–101. <https://doi.org/10.23850/24220582.5737>

Resumen El nopal, es una planta carnosa con propiedades nutricionales y terapéuticas ampliamente investigada a nivel industrial. En Colombia, se cultiva en abundancia en el municipio de La Mesa de los Santos-Santander, gracias a las condiciones desérticas de la zona. El propósito principal de este estudio fue llevar a cabo una detallada caracterización morfométrica del cladodio de nopal, que es una rama del cactus, con apariencia de hoja y analizar las propiedades nutricionales y microbiológicas de la harina producida a partir de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. Por lo cual, se procesaron un total de 108 cladodios, con longitud superior a los 30 cm, analizando las variables: peso, longitud y grosor. Adicionalmente, se determinaron valores bromatológicos como ceniza, humedad, fibra cruda, calcio, acidez y proteína. La presencia de microorganismos se determinó por medio de recuento de microorganismos aerobios; identificación de bacterias aerobias y anaerobias; análisis de levaduras y algunos hongos. Los resultados del análisis morfométrico revelaron una correlación significativa entre el peso; el ancho (con un coeficiente de correlación $r = 0,80$) y la longitud vertical de los cladodios del nopal ($r = 0,72$). En cuanto a la caracterización bromatológica de la harina de nopal, los valores obtenidos fueron: humedad 11,7%, ceniza 15,4 %, grasa 2,3 %, proteína 6,2 %, fibra cruda 8,2 %, carbohidratos totales 64,22 %, acidez 0,12 %. En cuanto al análisis microbiológico de la harina de nopal se reportan valores por debajo de los límites permitidos para presencia de microorganismos aerobios mesófilos, coliformes totales, *Escherichia coli*, mohos y levaduras. Este estudio permite tener información base sobre el cultivo de nopal producido en La Mesa de los Santos – Santander, develando su potencial alimenticio sustentado en el análisis morfométrico, al estimar el peso de los cultivos sin causarles daño, y complementado con el análisis nutricional. Estos hallazgos son de gran relevancia a nivel local, por lo cual se espera que futuras investigaciones promuevan el uso y profundización del conocimiento de esta planta.

Palabras clave: análisis bromatológico, análisis de componente principal, *Opuntia*, productos agrícolas, valor nutritivo.

Abstract The prickly pear, a fleshy plant with widely researched nutritional and therapeutic properties at the industrial level, is cultivated abundantly in the municipality of La Mesa de los Santos-Santander in Colombia, because to the arid conditions of the area. The main purpose of this study was to carry out a detailed morphometric characterization of the nopal cladode, which is a cactus branch resembling a leaf, and to analyze the nutritional and microbiological properties of the flour produced from *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. A total of 108 cladodes, each with a length greater than 30 cm, were processed, analyzing variables such as weight, length, and thickness. Additionally, bromatological values, including ash content, moisture, crude fiber, calcium, acidity, and protein, were determined. The presence of microorganisms was assessed through aerobic microorganism counts, identification of aerobic and anaerobic bacteria, yeast, and fungi analysis. The results of the morphometric analysis revealed a significant correlation between weight and width (with a correlation coefficient of $r = 0,80$) and the vertical length of the nopal cladodes ($r = 0,72$). Regarding the bromatological characterization of nopal flour, the obtained values were as follows: moisture 11,7 %, ash 15,4 %, fat 2,3 %, protein 6,2 %, crude fiber 8,2 %, total carbohydrates 64,22 %, and acidity 0,12 %. As for the microbiological analysis of nopal flour, values were reported below the allowed limits for mesophilic aerobic microorganisms, total coliforms, *E. coli*, molds, and yeasts. This study provides fundamental information about nopal cultivation in La Mesa de los Santos – Santander, highlighting its potential as a food source through morphometric analysis, by estimating the weight of the crops without causing damage to them, in addition to nutritional analysis. These findings are of great local significance, and it is hoped that future research will promote the use and further knowledge of this plant.

Keywords: agricultural products, bromatological analysis, principal component analysis, *Opuntia*, nutritional value.

Introducción

El nopal pertenece a la familia Cactaceae y al género *Opuntia*, el nombre fue asignado por Tournefort en 1700, dada su similaridad con una planta espinosa originaria de la ciudad de Opus en Grecia (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2018). Este cactus ha suscitado el interés de muchas culturas durante miles de años, los antiguos habitantes de Mesoamérica iniciaron su cultivo de manera sistemática en regiones semiáridas de México en la Gran Tenochtitlán (capital del Imperio Azteca). España fue la puerta de entrada a Europa durante la conquista de México y de allí se expandió su cultivo por toda la región mediterránea y desde allí hacia África, Asia y Oceanía (Sáenz *et al.*, 2006).

La especie de cactus *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller se destaca por su valor nutricional, y por su versatilidad en la gastronomía, así como en la medicina tradicional en varias regiones del mundo. El nopal se considera como un alimento que tiene alto valor nutricional, fundamentado por su contenido en minerales, proteínas y fibra dietética (Feugang *et al.*, 2006). Además, el nopal contiene sustancias bioactivas y fitoquímicas de interés farmacéutico, dado que ha demostrado tener efectos terapéuticos positivos en pacientes con enfermedades cardiovasculares al exhibir propiedades antioxidantes y antiinflamatorias. Como dato adicional su cultivo es beneficioso al aumentar la biomasa en áreas agrícolas (Brinker, 2009; Budinsky *et al.*, 2001; El Kossori *et al.*, 1998; Gouws *et al.*, 2019; Kashif *et al.*, 2022; Torres-Ponce *et al.*, 2015)

Del nopal suelen aprovecharse partes como: las flores, los frutos o tunas y los cladodios o pencas, que son los tallos articulados y suculentos, en donde se realiza la fotosíntesis, por lo tanto, son las hojas modificadas que se encuentran protegidos por una cutícula gruesa,

y por espinas que ayudan a reducir la pérdida de agua (Sáenz *et al.*, 2006).

En el caso mexicano más allá de satisfacer la demanda interna, el nopal es una fuente significativa de divisas para el país debido a sus exportaciones, principalmente a los Estados Unidos, así como a países de Europa y Asia (Corzo-Rios *et al.*, 2016). Este éxito en la producción y exportación se debe en gran medida a la cultura del consumo, el conocimiento ancestral de la hortaliza y la tecnificación de la producción de dos cultivares específicos, conocidos como 'Milpa Alta' y 'Atlixco', también denominado 'Negrito', ambos pertenecientes a la especie *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Gallegos-Vázquez *et al.*, 2006; López *et al.*, 2018)

En Colombia, contrario a lo que sucede en México no se evidencia un impacto importante de los cultivos de nopal en la economía de las regiones que lo producen, siendo el caso del municipio Mesa de los Santos – Santander donde no existe registro científico actual que referencie temáticas de producción y sostenimiento de esta especie aun cuando su cultivo es alto. De allí la importancia de realizar una caracterización específica de este cactus lo cual es crucial para conservar sus cultivos y así llevar a cabo investigaciones relacionadas con la supervisión de su crecimiento sin la necesidad de cortarlo (De Mello *et al.*, 2020).

Dado lo anteriormente descrito y la escasa información disponible sobre el nopal en Colombia, y particularmente en la región de Santander, se llevó a cabo este estudio exploratorio con el propósito de realizar una descripción morfológica de los cladodios, así como un análisis microbiológico y bromatológico del polvo obtenido de la especie de nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. cultivada en esta región. Este estudio representa un primer acercamiento para comprender mejor las características y

posibles aplicaciones de esta verdura en esta región de Colombia.

Materiales y métodos

Obtención de muestras

La recolección de los cladodios (tallos con un grosor de 1 a 1,5 cm) se realizó a partir de cultivos artesanales de nopal que presentaban una edad de 1 a 2 años (**Figura 1**), los durante los meses de junio a agosto de 2019. La zona del estudio se ubicó en la región semiárida del cañón del río Chicamocha - vereda Regadero Bajo del municipio de Los Santos, departamento de Santander. Este sitio se encuentra a una altitud de 1310 msnm y experimenta una temperatura promedio de 21 °C.

Análisis morfométrico

En el análisis morfométrico de los cladodios de nopal, se tomaron en cuenta múltiples características morfológicas. Estas características incluyeron el peso en gramos, así como la longitud (mayor o igual a 24 cm) y el grosor en centímetros (1 cm). Los puntos de medición fueron la longitud del eje vertical, el ancho del eje horizontal, el grosor derecho, el grosor izquierdo, el grosor apical, el grosor de la base, el color, el número de hileras de areolas en una cara del cladodio, las cicatrices y el color de la piel. Este enfoque permitió una evaluación detallada de las dimensiones y la estructura de los cladodios de nopal en estudio (Gallegos-Vázquez *et al.*, 2006).

Elaboración de la harina de nopal

Preparación de los cladodios

Los cladodios de nopal fueron sometidos a un proceso de limpieza y preparación riguroso para garantizar su asepsia. En primer lugar, se lavaron con agua por aspersión, con el objetivo de eliminar cualquier partícula de polvo, así como residuos de materia orgánica e impurezas. A continuación, se sumergieron en

una solución de hipoclorito de sodio a 100 ppm durante 3 - 5 minutos con fines de desinfección. Posteriormente, los cladodios se lavaron cuidadosamente con agua potable corriente y se dejaron secar a temperatura ambiente. Se procedió a la remoción de las espinas utilizando una pinza y, nuevamente, se llevó a cabo otro ciclo de lavado por aspersión para asegurar su completa limpieza. Posterior a esto, se cortaron en tiras longitudinales de 1 cm.

Una vez preparados, los cladodios se sometieron a un proceso de secado en un horno ChepTop Unox®. La temperatura de secado se mantuvo constante a 75 °C por un período de 10 horas. Cabe destacar que dicho horno, estaba equipado con cuatro ventiladores para asegurar una distribución uniforme del calor y un sistema de extracción de humedad, que contribuyó a acelerar el proceso de secado.

Una vez que los cladodios estuvieron completamente secos, se pulverizaron utilizando un Procesador de Alimentos KitchenAid®, modelo KFP0719BM. Posteriormente, se pesaron y se empacaron en bolsas de 250 a 300 gramos al vacío utilizando una máquina Henkelman®, referencia jumbo 30. Los productos finales se conservaron a temperatura ambiente y en condiciones de oscuridad para preservar su calidad y propiedades. Todo este procedimiento se realizó en la cocina Banú de la Universidad Autónoma de Bucaramanga.

A continuación, se describe la metodología para el análisis bromatológico y microbiológico, procedimientos que fueron realizados por laboratorios externos certificados.

Análisis bromatológico

El análisis de las características bromatológicas de la harina de nopal se desarrolló considerando los siguientes métodos:

La humedad se determinó mediante el método gravimétrico de secado en estufa. La ceniza se evaluó utilizando el método gravimétrico por calcinación. La cantidad de grasa se extrajo utilizando el equipo Soxhlet y se determinó por este proceso de extracción con solvente. La proteína se cuantificó mediante el método Kjeldahl (Association of Official Agricultural Chemists [AOAC], 2000). La fibra cruda se evaluó siguiendo la metodología del Anexo B de la Norma Técnica Colombiana NTC 1363:2017 (NTC, 2017). Los carbohidratos totales y las calorías se calcularon mediante fórmulas matemáticas basadas en la Resolución 333 de 2011 del Ministerio de la Protección Social (MPS, 2011). El calcio se determinó en el remanente de las cenizas y se cuantificó utilizando espectrometría de absorción atómica, empleando como referencia el método oficial de la AOAC 985.35 (AOAC, 2005). Finalmente, la acidez se midió utilizando el método titulométrico de rutina y se expresó en términos de ácido málico.

Análisis microbiológico

Para evaluar la calidad de la muestra de harina, se realizaron varios análisis microbiológicos siguiendo estándares reconocidos. Primero, se llevó a cabo un recuento de microorganismos aerobios, expresado en Unidades Formadoras de Colonias (UFC), siguiendo las pautas establecidas por la Organización Internacional de Normalización ISO 4833-1:2013 (ISO, 2013). Además, se procedió a la identificación de formas vegetativas y esporas de bacterias aerobias y anaerobias utilizando el método detallado en la Norma Técnica Colombiana NTC 4516:2009 (NTC, 2009) para microbiología de alimentos y productos de alimentación animal. Así como el método horizontal para la detección y enumeración de coliformes, acompañado de la técnica del número más probable (NTC, 2009). Asimismo, se realizó un análisis específico de levaduras y algunos hongos utilizando el método ISO 21527-1:2008 (ISO, 2008). Por último, se efectuó una identificación de la presencia de

Salmonella utilizando el método ISO 6579-1:2017/Amd 1:2020 (ISO, 2020).

Análisis estadístico

Los datos se analizaron empleando estadística descriptiva. Adicionalmente se usó una matriz de dispersión, histograma y correlación para evaluar las medidas morfométricas de los cladodios de nopal. Posteriormente se realizó un Análisis Factorial de Componentes Principales (A.F.C.P.) y para evaluar la idoneidad de los datos, se calcularon las medidas de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin y se realizó la prueba de esfericidad de Bartlett.

Se utilizaron dos programas estadísticos para llevar a cabo estos análisis: SPSS en su versión 25 (IBM Corp) y RStudio en su versión 1.3.959. En el proceso, se emplearon diversas librerías estadísticas, incluyendo ca (versión 0.71.1), ggplot2 (versión 3.3.2), factoextra (versión 1.0.7), FactoMineR (versión 2.3), Factosinh (versión 2.2), y corrplot (versión 0.84).

Resultados y discusión

Análisis descriptivos

Se procesaron 108 cladodios de nopal con un peso total de 69,545 gramos. En la **Tabla 1** se muestran los datos descriptivos de los caracteres morfométricos de los cladodios de nopal.

Los cladodios de nopal se clasificaron de acuerdo con el Codex Stan 185 (Codex Alimentarius, [Codex], 1993), en las siguientes categorías según la longitud de los cladodios D (21 a 25 cm) el 0,9 %; E (25 a 30 cm) el 7,4 % y mayores de 30 cm el 91,7 %.

En cuanto a la calidad de los cladodios, se observaron varios tipos de defectos. El mayor porcentaje de defectos correspondió a las cicatrices con un 28 %, seguido de la presencia de

manchas con un 26 %. Las costras representaron el 23 % de los defectos identificados, mientras que las magulladuras fueron menos comunes, con un 3 %. Finalmente, el 20 % del porcentaje restante represento a los cladodios en buen estado con ausencia de defectos. Estos valores, no son muy prometedores si se piensa comercializar este cactus a futuro, esto debido a que los aspectos visuales juegan un papel importante entre los consumidores, a la hora de adquirir un producto (Codex, 1993). De un total de 300 cladodios analizados, el 38 % presentaba ocho areolas (lugar en dónde emergen las

espinas en un cactus), el 32,4 % presentaba siete areolas, el 16,7 % tenía seis, el 12 % nueve y solo el 1 % presentaba dos areolas.

Respecto al color de los cladodios, se identificaron dos variantes principales, el verde ligero atribuido a el 54,6 % de las muestras y el verde soldado correspondiente al 45,4 % restante. Los datos anteriores pueden ser relevante para la clasificación a nivel de calidad y comercialización de los cladodios.

Tabla 1

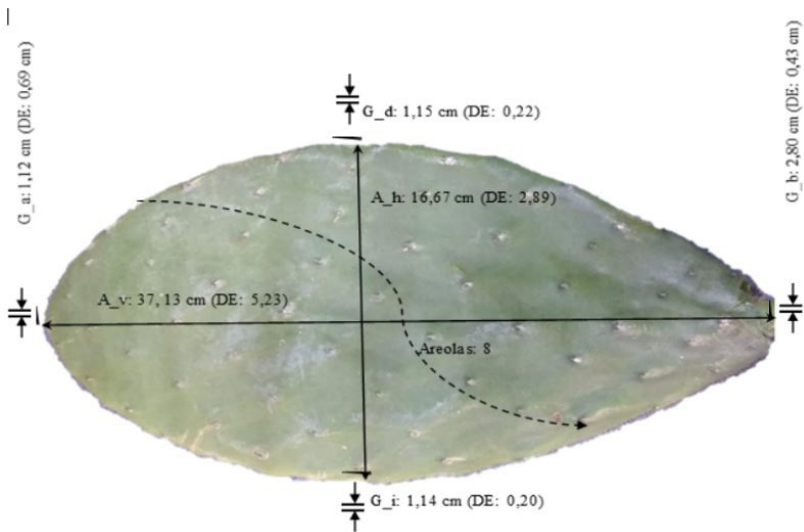
Análisis descriptivo de las medidas morfométricas de los cladodios de nopal

Variables	Media	Error estándar de la media	Mediana	Desviación estándar	Varianza	Rango	Mínimo	Máximo
w	581,4	19,1	551	198,51	39407,57	860	204	1064
A_v	37,13	0,5	37	5,23	27,43	26	24	50
A_h	16,64	0,28	16,55	2,89	8,37	15	8	23
G_d	1,15	0,02	1,1	0,22	0,05	1,3	0,5	1,8
G_i	1,14	0,02	1,1	0,2	0,04	1	0,6	1,6
G_a	1,13	0,07	1,1	0,69	0,48	7,5	0,5	8
G_b	2,8	0,04	2,8	0,43	0,19	1,75	2	3,75
Areo	7,43	0,09	7,5	0,96	0,92	4	5	9

Nota. w: peso en gramos. Longitud, ancho y grosor en centímetros. Longitud del eje vertical (A_v), el ancho del eje horizontal (A_h), el grosor derecho (G_d), el grosor izquierdo (G_i), el grosor apical (G_a), el grosor de la base (G_b) y el número de hileras de areolas en una cara del cladodio (Areo).

Figura 1

Descripción de las medidas morfométricas tomadas al cladodio de nopal



Análisis de Correlación

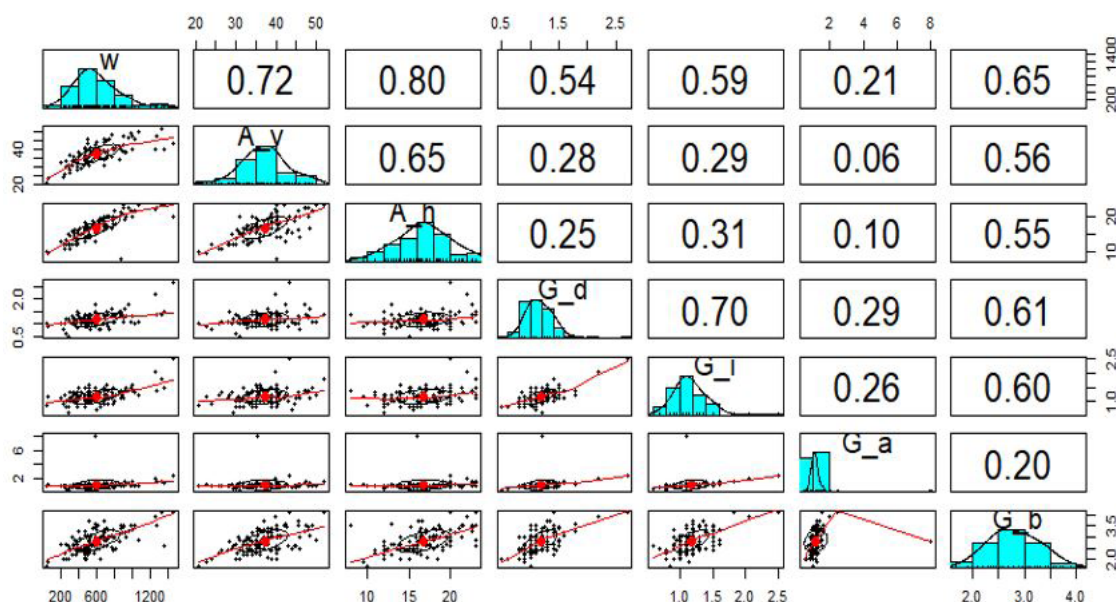
En la **Figura 2**, se aprecia la matriz de dispersión, el histograma y la correlación entre las variables de los cladodios de nopal, calculados a partir de los datos tabulados de las medidas morfométricas. La correlación positiva fuerte (0,80) entre el peso (w) y el ancho del eje horizontal (A_h) sugiere que, en general, a medida que aumenta el peso de los cladodios, tiende a aumentar su ancho horizontal. Del mismo modo, la correlación positiva fuerte (0,72) entre el peso y la longitud del eje vertical (A_v) indica que los cladodios tienden a ser más largos a medida que aumenta su peso. La correlación moderada y positiva (0,70) entre el grosor derecho (G_d) y el grosor izquierdo (G_i) sugiere que estos

dos atributos tienden a estar relacionados. Esto guarda relación con el hecho de que se evaluarán dos medidas de grosor en lados opuestos de un cladodio.

El que todas las variables tengan al menos un coeficiente de correlación significativo ($p < 0,05$) indica que existe una relación entre varias de estas características morfométricas. Estas correlaciones pueden ser importantes para comprender cómo estas características morfométricas se relacionan entre sí. Por otra parte, las medidas morfométricas que presentaron una distribución normal según la prueba de Kolmogórov-Smirnov fueron: w (KS = 0,77, $p = 0,12$), A_v (KS = 0,75, $p = 0,16$) y A_h (KS = 0,70, $p = 0,20$).

Figura 2

Matriz de las medidas de dispersión histograma y correlación de los cladodios de nopal



Nota. w: peso. Longitud del eje vertical (A_v), el ancho del eje horizontal (A_h), el grosor derecho (G_d), el grosor izquierdo (G_i), el grosor apical (G_a), el grosor de la base (G_b)

Los resultados de este estudio coinciden con los de Lucena *et al.*, quienes analizaron 1018 cladodios de nopal de la especie *N. cochenillifera* en la región de Pernambuco, Brasil, encontrando que hay una correlación directa entre el peso y la medida de la longitud del eje horizontal

y ancho del cladodio ($r = 0,82$) (de Lucena *et al.*, 2020). También son consistentes con lo reportado por Alkhtib *et al.* (2023), quienes analizaron 100 cactus de la especie *Opuntia ficus-indica* y emplearon mediciones morfométricas correspondientes a (ancho, largo y grosor),

encontrando que había una relación fuerte entre la morfometría del cladodio y su peso ($r > 0,7$; $p < 0,001$) (Alkhtib *et al.*, 2023).

Análisis factorial

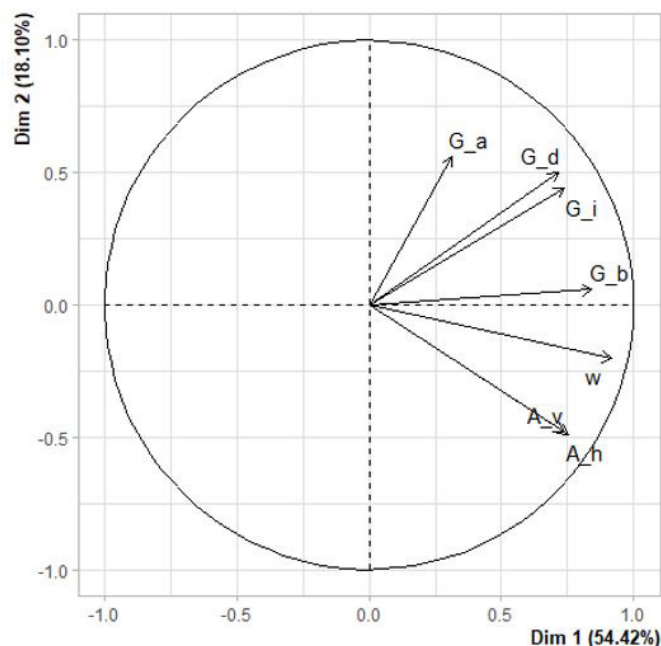
Con el objetivo de reducir la dimensionalidad de las medidas morfométricas y explorar patrones subyacentes se realizó un Análisis Factorial de Componentes Principales (A.F.C.P.) en los datos recopilados. La Prueba de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) de adecuación de muestreo fue de 0,72, lo cual indica que la suma de los coeficientes de correlación parcial al cuadrado es aceptable, por lo tanto, el análisis factorial de componentes principales es un procedimiento viable. La prueba de esfericidad de Bartlett $X^2(21) = 318,08$, $p < 0,00$, mostro la existencia de verdaderos componentes principales en los datos.

La inercia de las primeras dimensiones indica la existencia de relaciones sólidas entre las variables y señala el número de dimensiones a estudiar. Para una mejor comprensión de

la estructura de las variables, aplicamos una rotación varimax cuyos resultados se presentan en la **Figura 3**. La Dimensión 1 (Dim 1) corresponde al primer componente principal (CP1) y explica el 54,4 % de la variabilidad total de los cladodios de nopal. Este alto porcentaje indica que el primer componente captura una parte significativa de la variabilidad de los datos, y este factor incluye las variables Peso (w), Ancho del eje vertical (A_v) y Ancho del eje horizontal (A_h). La Dimensión 2 (Dim 2) representa el segundo componente principal (CP2), que explica el 18,1 % de la variación total. Este componente constituye un segundo factor que agrupa las variables Grosor derecho (G_d), Grosor izquierdo (G_i), Grosor apical (G_a) y Grosor de la base (G_b). En conjunto, Dim1 y Dim2 explican el 72,5 % de la variación en los cladodios de nopal, ya que sus autovalores son mayores que 1. Los otros componentes, CP3, CP4, CP5 y CP6, explican el 11,6 %, 5,5 %, 4,62 % y 4,1 %, respectivamente. En su totalidad, en conjunto todos los componentes explican el 98,5 % de la variabilidad total.

Figura 3

Gráfica de los componentes principales de los cladodios de nopal



Como se puede observar en la **Tabla 2**, los datos indican que el Factor 1 está relacionado con las dimensiones que influyen en el tamaño y el

peso, mientras que el Factor 2 está asociado con el grosor de los cladodios del nopal.

Tabla 2

Análisis descriptivo de las medidas morfométricas de los cladodios de nopal

Matriz de componente rotado		
	CP1	CP2
W	0,89	0,26
A_h	0,84	0,61
A_h	0,89	-0,02
G_d	0,16	0,82
G_i	0,19	0,77
G_a	-0,07	0,47
G_b	0,56	0,61

Análisis bromatológico

La caracterización bromatológica realizada a la harina de nopal (*Opuntia ficus-indica*) se describe a continuación. En cuanto a la variable humedad, se obtuvo un porcentaje igual al 11,7 %, lo que indica que la harina tiene un contenido moderado de agua. La ceniza representa un 15,4 % del peso total de la harina, lo que sugiere la presencia de minerales y otros compuestos inorgánicos. La grasa es relativamente baja, con un 2,3 %, lo que hace que la harina sea una fuente alimenticia baja en grasas. La concentración de proteína en la harina fue de 6,2 %, lo que indica la presencia de una cantidad moderada de proteínas, convirtiéndola en un alimento interesante desde el punto de vista nutricional. La fibra cruda se encuentra en una cantidad apreciable del 8,2 %, lo que sugiere que esta harina puede ser beneficiosa para la salud digestiva y tener aplicaciones en la industria alimentaria.

Los carbohidratos totales son la principal fuente de energía presente en la harina de nopal, representando un 64,22 % de su composición. Cada 100 gramos de nopal aportan aproximadamente 302,75 kilocalorías, lo que significa que es una fuente moderada de energía.

El nopal es una excelente fuente de calcio, con una concentración de 2032 mg por cada 100 gramos de muestra, lo que lo convierte en un alimento importante para mantener la salud de los huesos (Sáenz *et al.*, 2006)). La acidez del nopal, medida como ácido málico, es baja, con un nivel del 0,12 %, lo que sugiere que tiene un sabor suave y no muy ácido.

Estos análisis bromatológicos demuestran que la harina de nopal obtenida a partir del cultivo artesanalmente de *Opuntia ficus-indica* en la región del Caño del Chicamocha en Santander tiene un equilibrio nutricional valioso destacado por su contenido en proteínas y calcio, además de representar una fuente moderada de energía y fibra. Los resultados de este análisis bromatológico son consistentes con investigaciones previas sobre la composición nutricional de la harina de nopal. Según Sáenz *et al.* (2006) las características químicas y físicas de la harina de nopal varían dependiendo del origen de la muestra ya sea a partir de brotes nuevos, la penca o de tallos suberificados, otros factores que pueden influir se relacionan con la edad (0,5, 1, 2, 3 y 4 años) y la especie. Adicionalmente, Sáenz *et al.*, 2006, citando a Flores (1995), señalan que la composición química en 20 variedades de nopal analizando los cladodios de los cuales se

obtuvo harina presentaron variaciones a nivel de: proteínas (2,5 % a 9,4 %), grasa (1 % a 1,67 %), fibra cruda (8,0 % a 17,5 %), cenizas (13,2 % a 21 %), y acidez (0,08 %) (Flores *et al.*, 1995; Porras *et al.*, 2018; Sáenz *et al.*, 2006).

De acuerdo con el estudio realizado por Castillo *et al.* (2013) la composición química de la harina de nopal (g/100g en base seca) de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., presentó diferencias con los datos obtenidos en esta investigación en cuanto a la concentración de carbohidratos totales (16,3 %), proteína (12,6 %), grasa (3,0 %), cenizas (20,2 %), calcio (334 mg/100g) y los valores de fibra que fueron superiores para ellos (Castillo *et al.*, 2013). En la República Dominicana, en las regiones suroeste y nordeste, se cultiva *Opuntia ficus-indica* (L.), subgénero *Platyopuntia* en zonas áridas y semiáridas de forma silvestre. En estas regiones, se procesaron cactus en diferentes etapas de desarrollo, incluyendo los estados de tierno, semitierno, lleno y fruto, para obtener harina. El análisis bromatológico reveló valores más bajos de agua (9 %), grasa (0,02 %), carbohidratos totales (58 %) y calcio (9 %) en comparación con el estudio previo realizado en cactus de la Mesa de los Santos (Santander, Colombia) con cladodios de mayor edad. Sin embargo, se observó un mayor contenido de proteínas (8 %) (IIBI, s.f.). En un estudio llevado a cabo en Ecuador, se examinó la sustitución parcial de la harina de trigo en la elaboración de pan por harina de Nopal (*Opuntia ficus-indica*). Los resultados obtenidos mostraron valores diferentes en comparación con el presente estudio, particularmente en los niveles de humedad (6 %), grasa (0,02 %), calcio (310 mg), acidez (0,2 %), carbohidratos totales (18 %), y concentraciones más altas de ceniza (16 %), fibra cruda (48 %) y proteínas (10 %) confirmando que el nopal es una fuente importante de fibra y calcio (Cando & Gallardo, 2020).

Es importante destacar la variabilidad en los datos observados en nuestro análisis tanto en la composición química como en la composición

física de la harina *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. Este hecho se ratifica con la investigación de Ö-Zcan & Al Juhaimi, 2011 quienes señalan que la composición bromatológica de la harina de nopal podría estar influenciada por factores como la parte del cactus a analizar y fase de desarrollo de la verdura dado que a medida que envejece y los cladodios maduran, tienden a aumentar los contenidos de acidez, carbohidratos y carotenos en la harina, mientras que disminuyen los contenidos de proteína y fibra cruda.

Además de considerar los aspectos bromatológicos mencionados en este estudio, consideramos necesario abordar en investigaciones futuras el análisis de las características fenológicas relacionadas con el clima, como lo son: la temperatura, la radiación y la humedad, así como un análisis de las propiedades químicas del suelo en cada región de cultivo, para comprender la incidencia en la biología del cactus (Paucara & Del Castillo, 2021). Posteriormente, se podrían establecer correlaciones entre estos hallazgos y las propiedades fisicoquímicas de la harina de nopal. La comprensión de los cambios atribuidos a diversos factores ambientales y externos servirán para entender la biología de la especie y su influencia en el valor nutricional de la harina de nopal. Esto, a su vez, proporcionaría información valiosa para su potencial aplicación en la industria alimentaria y en la nutrición, tanto humana como animal.

Análisis microbiológico

Los resultados microbiológicos en cierta medida evidencian las buenas prácticas de manipulación que se realizaron a los cladodios de nopal en esta investigación, de acuerdo con la Organización Internacional de Normalización (ISO) 4833-1:2013 (ISO, 2013) de los microorganismos aerobios mesófilos se encontraron 100 UFC/g (Unidades Formadoras de Colonias por gramo) en la harina de nopal. Esto está por debajo del límite permitido de 150,000 UFC/g ISO 4833-1:2013 (ISO, 2013).

Este resultado sugiere que la harina de nopal tiene una carga bacteriana baja de microorganismos mesófilos, lo que es positivo desde el punto de vista de la seguridad alimentaria. Para los Coliformes Totales, se detectaron menos de 3 NMP/g (Números Más Probables por gramo) de coliformes totales en la harina de nopal (ISO, 2013). La presencia de coliformes totales a niveles tan bajos es un buen indicador de la higiene durante la producción y procesamiento de la harina. Esta observación fue similar a lo reportado por Castillo *et al.* (2013) donde el recuento de Coliformes Totales fue negativo, garantizándose la inocuidad de la harina de nopal empleada en la formulación de alfajores de alto contenido en fibra.

También se analizó la presencia de *Escherichia coli* y se encontraron menos de 3 NMP/g, (por debajo del límite permitido de 3 NMP/g) (ISO, 2013). Al igual que los coliformes totales, los niveles bajos de *E. coli* indican que no existe contaminación fecal en las muestras analizadas. Estos resultados son similares a lo reportado por Castillo *et al.* (2013) quienes realizaron un estudio microbiológico en harina de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., señalando como negativo el recuento total de colonias y coliformes; esto último debido a la metodología usada en el proceso de secado (Castillo *et al.*, 2013).

Respecto a los mohos y levaduras, se encontraron valores iguales a 2,000 UFC/g en la harina de nopal. Esta cantidad está fuera del rango de 3,000 a 5,000 UFC/g, que es el límite permitido (ISO, 2013). Los valores obtenidos indican una contaminación mínima de la muestra, incluso por debajo de los límites permitidos. Esto sugiere una cuidadosa manipulación de las muestras durante el estudio.

Complementando esta discusión, consideramos es fundamental prevenir el deterioro y mantener la calidad los cladodios o tunas, especialmente durante el proceso de

corte, dado su alto riesgo de ser afectados por hongos, levaduras y bacterias patógenas que suelen encontrarse en el nopal debido a su baja acidez y alto contenido de azúcares (FAO, 2018); por lo tanto, es esencial preservar la calidad nutricional del producto y evitar la proliferación de agentes nocivos que podrían comprometer su integridad. Para una futura producción industrial de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. en esta región del país, se debe promover entre los cultivadores la implementación de buenas prácticas de cosecha y postcosecha.

Adicionalmente, se analizó la presencia de *Salmonella* sp, reportándose como ausente en las muestras de harina procesadas siendo este un resultado positivo si se desea impulsar el uso de esta materia prima. La determinación de este microorganismo es importante porque estudios como el realizado por Landa *et al.*, (2013), demuestran que *S. Typhimurium* puede persistir hasta por 14 días en el suelo de cultivo, así como colonizar la superficie y tejidos internos. Por lo tanto, se destaca la importancia de asegurar que los cladodios se mantengan en condiciones fisiológicas óptimas.

Finalmente, los resultados obtenidos para los análisis microbiológicos muestran que la harina de los nopales recolectados en la vereda Regadero Bajo de la Mesa de los Santos – Santander (Colombia), por seguir las buenas prácticas de manufactura cumple con los parámetros de calidad exigidos en los reglamentos sanitarios para alimentos, de acuerdo con normas nacionales e internacionales (ISO, 2008, 2013, 2020; NTC, 2009).

Limitaciones del estudio

Una de las principales limitaciones de este estudio radica en la falta de conocimiento sobre la edad exacta de los cultivos de nopal. Esto se debe principalmente a que el cultivo de nopal en la región se realiza de manera artesanal y no tecnificada. La falta de información precisa

sobre la edad de los nopales podría influir en las variaciones observadas en la composición de los cladodios y, por lo tanto, en los resultados del análisis bromatológico y morfométrico (Sáenz *et al.*, 2006). Futuros estudios deberán abordar esta limitación mediante métodos de registro y seguimiento más precisos de la edad de las plantas de nopal en diferentes etapas de crecimiento.

Es importante destacar que este proyecto se llevó a cabo en una única región geográfica, lo que significa que se trabajó con un solo cultivo de nopal distribuido en varios sectores. Esta limitación geográfica pudo influir en la representatividad de los resultados. Para investigaciones futuras, se recomienda abordar esta limitación ampliando el alcance geográfico del estudio (FAO, 2018; Sáenz *et al.*, 2006). Esto implica la inclusión de cultivares de nopal de diferentes regiones geográficas, lo que permitirá evaluar si las características morfométricas y la composición nutricional varían significativamente en función de la ubicación geográfica (FAO, 2018; Flores *et al.*, 1995). Además, sería relevante incorporar análisis genéticos de filogenia para comprender mejor la diversidad genética y la posible ancestralidad de los cultivares de nopal en diferentes regiones (FAO, 2018).

Componente Social

A nivel social y académico, el proyecto tuvo impactos positivos a nivel de la comunidad. Se llevó a cabo un concurso de cocina enfocado en la preparación de alimentos destacando el nopal, como ingrediente principal. Este evento contó con la participación de estudiantes del programa de Tecnología en Gestión Gastronómica de la Universidad Autónoma de Bucaramanga y culminó con la creación de una cartilla culinaria que incluye recetas gastronómicas (Ramírez Castaño *et al.*, 2022). A su vez, los ganadores del concurso brindaron capacitación sobre el cultivo y el aprovechamiento del nopal desde

una perspectiva gastronómica, a madres de familia dedicadas al cultivo de nopal en la vereda Regadero Bajo de la Mesa de los Santos, Santander, Colombia, enseñándoles a preparar encurtidos y repostería (Bula-Barbosa, 2019).

Conclusiones

Existe una correlación entre el peso de los cladodios de nopal de la especie *Opuntia ficus-indica* cultivados en el municipio de la mesa de los santos Santander con sus medidas de ancho y longitud. Conocer la correlación entre morfometría y peso de los cladodios hace posible el desarrollo de ecuaciones matemáticas a fin de estimar la producción masiva de cactus.

Realizar estudios no invasivos para monitorear el desarrollo de los cultivos de nopal es fundamental para preservar esta planta, que desempeña un papel crucial en el aumento de la biomasa, que impulsa el desarrollo rural debido a sus numerosos usos.

Este estudio proporciona una descripción detallada de las características morfométricas de los cladodios de nopal cultivados en la vereda Regadero Bajo de la Mesa de los Santos – Santander (Colombia). Se destaca la presencia de correlaciones significativas entre estas características y presenta una reducción de dimensionalidad efectiva a través del PCA y la rotación varimax. Estos resultados pueden ser de utilidad tanto para la caracterización de los cladodios como para su clasificación y comercialización en función de sus dimensiones y grosor.

En relación con los análisis bromatológicos, se puede concluir que los resultados son consistentes con investigaciones previas sobre la composición nutricional de la harina de la especie *Opuntia ficus*. Es importante destacar que algunos de los cambios observados en la

composición con respecto a otros estudios pueden atribuirse a factores como la fase de desarrollo del cactus (edad). Además, sería beneficioso estudiar los aspectos fenológicos que afectan el cultivo, ya que podrían influir en su valor nutricional, considerando las variaciones observadas en la composición de la harina de nopal. Estos hallazgos resaltan la importancia de la tecnificación del cultivo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Asociación de mujeres campesinas de regadero bajo ASACA, por todo su apoyo y acompañamiento en el proceso de muestreo del producto en sus cultivos. Así como, al laboratorio de Biotecnología de la Universidad de Santander – UDES, quienes amablemente facilitaron algunos equipos para estandarizar el proceso de secado de los cladodios de nopal.

Financiamiento

Los investigadores recibieron financiación de la Universidad Autónoma de Bucaramanga UNAB y a la Universidad CES de Medellín. Lo anterior esta consignado en el acta de inicio N° 62. código 128 de la convocatoria bienal interna 2019 – 2020.

Descargos de responsabilidad

Todos los autores realizaron aportes significativos al documento, están de acuerdo con su publicación y manifiestan que no existen conflictos de interés en este estudio.

Referencias

- Alkhtib, A., Muna, M., Darag, M., Alkhalid, I., Al-asa'ad, Z., Mfeshi, H., Zayod, R., & Burton, E. (2023). Spineless cactus cladode is a viable replacement to barley and maize grains in the feed rations of dromedary camel calves. *Veterinary Medicine and Science*, 9, 2368–2375. <https://doi.org/10.1002/vms3.1227>
- Association of Official Agricultural Chemists AOAC. (2000). *Official Methods of Analysis* (17th ed.). Association of Official Analytical Chemists. <https://www.aoac.org/>
- Association of Official Agricultural Chemists AOAC. (2005). *Minerals in infant formula, enteral products, and pet foods. Atomic absorption spectrophotometric method*. Association of Official Analytical Chemists. <https://www.aoac.org/>
- Brinker, F. (2009). Prickly pear as food and medicine. *Journal of Dietary Supplements*, 6(4), 362–376. <https://doi.org/10.3109/19390210903280280>
- Budinsky, A., Wolfram, R., Oguogho, A., Efthimiou, Y., Stamatopoulos, Y., & Sinzinger, H. (2001). Regular ingestion of opuntia robusta lowers oxidation injury. *Prostaglandins, Leukotrienes, and Essential Fatty Acids*, 65(1), 45–50. <https://doi.org/10.1054/PLEF.2001.0287>
- Bula Barbosa, L. (2019). *Nopal a la colombiana, una receta que alimenta y ayuda a sanar*. Ciencia Abierta UNAB. <https://unab.edu.co/cienciaabierta/nopal-a-la-colombiana-una-receta-que-alimenta-y-ayuda-a-sanar/>
- Cando, K., & Gallardo, L. (2020). Sustitución parcial de la harina de trigo por harina de nopal (*Opuntia ficus-indica*) en la elaboración de pan [Universidad Técnica de Cotopaxi]. In Universidad Técnica de Cotopaxi. <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/4501/1/PI-000727.pdf>
- Castillo, S., Estrada, L., Margalef, M., & Tóffoli, S. (2013). Obtención de harina de nopal y formulación de alfajores de alto contenido en fibra. *Diaeta*, 31(142), 20–26. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-73372013000100003
- Codex Alimentarius. (1993). *Norma mundial del Codex Stan 185 para el nopal*. https://alimentosargentinos.magyp.gob.ar/contenido/marco/Codex_Alimentarius/normativa/codex/stan/185-1993.PDF
- Corzo-Rios, L., Bautista-Ramírez, M., Gómez y Gómez, Y., & Torres-Bustillos, L. (2016). Frutas de cactáceas: Compuestos bioactivos y sus propiedades nutraceuticas. In M. E. Ramírez Ortiz (Ed.), *Alimentos Funcionales de Hoy* (pp. 35–66). OmniaScience. <https://doi.org/10.3926/oms.360>
- De Mello, M., Rodrigues de Lucena, L., Melo de Oliveira, A., Chagas, de L. C., Queiroz dos Anjos, F., Masterson de Farias, I., Laamon Pinto Simões, V. J., & Rodrigues de Almeida, M. C. (2020). Cladode area and weight of Nopalea cochenillifera clones as a function of morphometric characteristics. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 22, 18–28. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v22i15>

- El Kossori, R. L., Villaume, C., El Boustani, E., Sauvaire, Y., & Méjean, L. (1998). Composition of pulp, skin and seeds of prickly pears fruit (*Opuntia ficus-indica* sp.). *Plant Foods for Human Nutrition*, 52(3), 263–270. <https://doi.org/10.1023/A:1008000232406>
- Feugang, J., Konarski, P., Zou, D., Stintzing, F., & Zou, C. (2006). Nutritional and medicinal use of Cactus pear (*Opuntia* spp.) cladodes and fruits. *Frontiers in Bioscience: A Journal and Virtual Library*, 11(SUPPL. 2), 2574–2589. <https://doi.org/10.2741/1992>
- Flores, C., de Luna, J., & Ramírez, P. (1995). *Mercado mundial del nopalito*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Gallegos-Vázquez, C., Valdez-Cepeda, R. D., Barrón-Macias, M., Barrientos-Priego, A. F., Andrés-Agustín, J., & Nieto-Ángel, R. (2006). Caracterización morfológica de 40 cultivares de nopal de uso como hortaliza del banco de germoplasma del CRUCEN-UACH. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 12(1), 41–49. <https://doaj.org/article/74235b40ac3d442c8921d341ef439d86>
- Gouws, C., Georgousopoulou, E., Mellor, D., McKune, A., & Naumovski, N. (2019). Effects of the Consumption of Prickly Pear Cacti (*Opuntia* spp.) and its Products on Blood Glucose Levels and Insulin: A Systematic Review. *Medicina (Kaunas, Lithuania)*, 55(5). <https://doi.org/10.3390/medicina55050138>
- Instituto de Innovación en Biotecnología e Industria IIBI. (s.f.). *Harina y derivados del nopal. Fomento del consumo e industrialización para la soberanía alimentaria*. Instituto de Innovación en Biotecnología e Industria (IIBI). <https://www.ideassonline.org/pic/doc/BrochureHarinadeNopal.pdf>
- International Organization for Standardization ISO. (2008). ISO 21527-1:2008 *Microbiology of food and animal feeding stuffs — Horizontal method for the enumeration of yeasts and moulds — Part 1: Colony count technique in products with water activity greater than 0.95* (1st ed.). International Organization for Standardization - ISO. <https://www.iso.org/standard/38275.html>
- International Organization for Standardization ISO. (2013). ISO 4833-2:2013 *Microbiology of the food chain — Horizontal method for the enumeration of microorganisms — Part 1: Colony count at 30 °C by the pour plate technique*. International Organization for Standardization - ISO. <https://www.iso.org/standard/53728.html>
- International Organization for Standardization ISO. (2020). ISO 6579-1:2017/Amd 1:2020 *Microbiology of the food chain — Horizontal method for the detection, enumeration and serotyping of Salmonella — Part 1: Detection of Salmonella spp. — Amendment 1: Broader range of incubation temperatures, amendment to the stat*. International Organization for Standardization - ISO. <https://www.iso.org/standard/76671.html>
- Kashif, R., D’cunha, N., Mellor, D., Alexopoulos, N., Sergi, D., & Naumovski, N. (2022). Prickly Pear Cacti (*Opuntia* spp.) Cladodes as a Functional Ingredient for Hyperglycemia Management: A Brief Narrative Review. *Medicina*, 58(2). <https://doi.org/10.3390/MEDICINA58020300>
- Landa, P., Hernández, A., Vargas, M., Eslavas, C., Chaidez, C., & Patel, J. (2013). Persistencia de *Salmonella typhimurium* en nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(2), 147–153. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802013000200007&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- López, C., Malpica, A., López, J., García, E., & Sol Sánchez, A. (2018). Crecimiento de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. en la zona central de Veracruz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (5), 1005–1014. <https://doi.org/10.29312/remexca.v015.1306>
- Ministerio de la Protección Social MPS. (2011). Resolución Número 333 de 2011 (10 de Febrero de 2011). Ministerio de la Protección Social (MPS). <https://www.minsalud.gov.co/Portada2021/index.html>
- Norma Técnica Colombiana NTC. (2009). *Norma Técnica Colombiana NTC 4516:2009. Microbiología de alimentos y productos de alimentación animal. Método horizontal para la detección y enumeración de coliformes técnica del número más probable*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). <https://www.icontec.org/>
- Norma Técnica Colombiana NTC. (2017). *Norma Técnica Colombiana NTC 1363:2017. Productos de molinería. Pan envasado (empacado)*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). <https://www.icontec.org/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO. (2018). *Ecología del cultivo, manejo y usos del Nopal*. In P. Inglese, J. C. Mondragon, A. Nefzaoui, & C. Sáenz (Eds.), *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (Vol. 1)*. <https://www.fao.org/3/i7628es/i7628es.pdf>
- Ö-Zcan, M., & Al Juhaimi, F. (2011). Nutritive value and chemical composition of prickly pear seeds (*Opuntia ficus-indica* L.) growing in Turkey. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 62(5), 533–536. <https://doi.org/10.3109/09637486.2011.552569>
- Paucara, C., & Del Castillo, C. (2021). Caracterización física y química de la tuna (*Opuntia ficus-indica*) en el municipio de Luribay, La Paz – Bolivia. *Revista Estudiantil AGRO-VET*, 5(1 SE-Artículos de Investigación), 5–12. <https://agrovvet.umsa.bo/index.php/AGV/article/view/45>
- Porras, D., Albesiano, S., & Arrieta, L. (2018). El género *Opuntia* (Opuntioideae–Cactaceae)

en el departamento de Santander, Colombia. *Biota Colombiana*, 18(2), 112–132. <https://doi.org/10.21068/C2017.V18N02A07>

Ramírez Castaño, A. P., Alfaro Wisaquillo, Y. M., León, F. J., Avendaño Celis, R. J., Peña Lizcano, C. A., Gómez, L. E., Gómez Rivero, J. S., & Ovalle Gómez, L. M. (2022). *El nopal en Colombia: más que un cactus*. <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/17409>

Sáenz, C., Berger, H., Corrales, J., Galletti, L., García de Cortazar, V., Higuera, I., Mondragón, C., Rodríguez-Félix, A., Sepúlveda, E., & Varnero, M. (2006). Utilización agroindustrial del nopal. In C. Rosell (Ed.), *Boletín de servicios agrícolas de la FAO* (Vol. 162). FAO. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/120301/Utilizacion-agroindustrial-del-nopal.pdf>

Torres-Ponce, R. L., Morales-Corral, D., Ballinas-Casarrubias, M. de L., & Nevárez-Moorillón, G. V. (2015). El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5), 1129–1142. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342015000500018&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Evaluación de las características fisicoquímicas y sensoriales del pan de molde enriquecido con Kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.) y Cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen)

Physicochemical and sensory characteristics of bread leaf enriched with Kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.) and Cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen)

Ruth Esther Chamorro–Gómez^a  rhamorro@unheval.edu.pe; Dani Abad–Villar^a  2015150026@unheval.edu.pe;
Ángel David Natividad–Bardales^a  davidnatividad@unheval.edu.pe; Roger Estacio–Laguna^a  rogerestacio@unheval.edu.pe;
Geaninne Ríos–García^a  grios@unheval.edu.pe; Sergio Grimaldo Muñoz–Garay^a  sergiomunoz@unheval.edu.pe;
Rubén Max Rojas–Portal^a  rubenrojas@unheval.edu.pe; César Robert Cueto–Rosales^a  ccueto@unheval.edu.pe;
Juan Edson Villanueva–Tiburcio^a  juanedvi@unheval.edu.pe

^aUniversidad Nacional Hermilio Valdizán, Huánuco – Perú. Facultad de Ciencias Agrarias. Ingeniería Agroindustrial.

Recibido: 15/09/2023 Aceptado: 04/12/2023

Citar, APA: Chamorro–Gómez, R. E., Abad–Villar, D., Natividad–Bardales, A. D., Estacio–Laguna, R., Ríos–García, G., Muñoz–Garay, S. G., Rojas–Portal, R. M., Cueto–Rosales, C. R., y Villanueva–Tiburcio, J. E. (2023). Evaluación de las características fisicoquímicas y sensoriales del pan de molde enriquecido con Kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.) y Cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen). *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 10 (2), 102–116.
<https://doi.org/10.23850/24220582.5943>

Resumen El pan es un alimento de consumo masivo, que tiene como ingrediente básico al trigo; existen diversas formulaciones en la que incluyen harina de distintas fuentes de cereales. El objetivo de la investigación fue evaluar el efecto de la inclusión de Kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.) y Cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) en las características fisicoquímicas y sensoriales del pan de molde. La elaboración del pan de molde se desarrolló con el método de masa directa; la mezcla se realizó con diseño de mezclas simples y se seleccionaron solo las tres formulaciones con los contenidos más altos de proteínas, F₁ (trigo, Kiwicha, Cañihua: 73 %, 17 %, 10 %); F₂ (trigo, Kiwicha, Cañihua: 73 %, 20 %, 7 %) y F₃ (trigo, Kiwicha, Cañihua: 70 %, 20 %, 10 %); se consideró como control F₀: pan de molde elaborado con 100 % de harina de trigo. Las características fisicoquímicas se analizaron mediante diseño completo al azar (DCA), con prueba de Tukey ($p \leq 0,05$) y las propiedades sensoriales se analizaron con la prueba de Friedman ($p \leq 0,05$). Los resultados mostraron que las características fisicoquímicas fueron diferentes ($p \leq 0,05$), a excepción del pH y acidez titulable. La formulación F₃, reportó menor contenido de alanina y mayor cantidad leucina con 0,10 a 1,79 g de aminoácido (AA) por 100 g de proteína pura, determinada en (g/100 g de muestra original y factor 6,25), respectivamente. En la corteza de pan, el análisis de color L* fue mayor en la formulación F₃ (50,0) ($p \leq 0,05$) mientras que las otras formulaciones variaron F₁ y F₂. Sensorialmente, el tratamiento F₀ tuvo mayor aceptabilidad, sin embargo, en los panes elaborados (F₁, F₂ y F₃) se destaca el contenido de hierro, aminoácidos y macronutrientes. Se concluye que los panes elaborados con adición de Kiwicha y Cañihua a la formulación de la harina son una buena fuente de proteínas, hierro y aminoácidos.

Palabras clave: aminoácidos esenciales, color, granos andinos, hierro, proteína.

Abstract Bread is a widely consumed food, which has wheat as its basic ingredient; there are various formulations that include flour from different cereal sources. The objective of the research was to evaluate the effect of including Kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.) and Cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) on the physicochemical and sensory characteristics of bread leaf. The preparation of bread leaf was developed with the direct dough method; the mixture was carried out with a simple mixture design and only the three formulations with the highest protein contents were selected., F₁ (trigo, Kiwicha, Cañihua: 73 %, 17 %, 10 %); F₂ (wheat, Kiwicha, Cañihua: 73 %, 20 %, 7 %) and F₃ (wheat, Kiwicha, Cañihua: 70 %, 20 %, 10%); F₀ was considered as control: bread leaf made with 100% wheat flour. The physicochemical characteristics were analyzed using a complete randomized design (RCD), with Tukey's test ($p \leq 0,05$) and sensory properties with Friedman's test ($p \leq 0,05$). The results showed that the physicochemical characteristics were different ($p \leq 0,05$) except for pH and titratable acids. The F₃ formulation reported lower alanine content and higher leucine content with 0,10 to 1,79 g of amino acid (AA) per 100 g of protein pure, determined in (g/100 g of original sample and factor 6,25), respectively. In the bread crust, the L* color analysis was higher in formulation F₃ (50,0) ($p \leq 0,05$) while the other formulations F₁ and F₂ varied. Sensorily, the F₀ treatment had greater acceptability, however, in the prepared breads (F₁, F₂ and F₃) the content of iron, amino acids and macronutrients stands out. It is concluded that breads made with the addition of Kiwicha and Cañihua to the flour formulation are a good source of proteins, iron, and amino acids.

Keywords: andean grains, color, essential amino acids, iron, protein.

Introducción

El pan o *pannus* (masa blanca), es un alimento elemental y tradicional que se consume a nivel mundial (Shin *et al.*, 2013), caracterizado por acompañar las meriendas o desayunos como el tradicional café con pan (Perez-Leon *et al.*, 2018) y a nivel de Latinoamérica, en países como Perú su consumo promedio suele ser de siete panes por día (La República, 2022). El pan, generalmente se prepara con harina de trigo, agua, levadura, manteca, sal, entre otros (Gomes *et al.*, 2013), siendo la harina de trigo refinada la materia prima más utilizada para recrear este producto, sin embargo, esta harina posee un bajo nivel de aminoácidos esenciales como: la lisina, treonina, contenido de fibra y hierro. En consecuencia, la deficiencia de estos bioelementos suele estar relacionada con la desnutrición a nivel poblacional (Reyes *et al.*, 2019). Adicionalmente, se ha reportado que los componentes nutricionales del pan de molde son menores frente al pan elaborado con harina integral (Calvo-Carrillo *et al.*, 2020).

Diversos estudios en elaboración de panes se centran en el efecto de la sustitución de la harina de trigo por harina obtenida a partir de granos andinos y harina integral, la interacción de algunos parámetros de producción del pan, y el análisis de las propiedades fisicoquímicas, microbiológicas, organolépticas (Gostin, 2019; Reyes-Aguilar *et al.*, 2004), parámetros como tiempo y temperatura de fermentación (Alshehry *et al.*, 2022), horneado (Montevecchi *et al.*, 2022), digestibilidad (Xu *et al.*, 2019), entre otros. También, se han investigado el contenido de aminoácidos en panes elaborados con leguminosas (Perez-Moral *et al.*, 2023).

Actualmente, se emplean diversas herramientas tecnológicas para formular panes que implementan un diseño de mezclas soportado por el uso de software informáticos

(Ammar *et al.*, 2022). Respecto a la adición de Kiwicha y Cañihua para fabricar panes son pocos los referentes, siendo (Pascual & Zapata, 2010), pioneros en la elaboración de panes utilizando Kiwicha de 11 y 15 %, mientras que Zegarra *et al.* (2019) formularon panes usando proporciones de Cañihua al 7,6 %; 9,5 % y 8,3 %. La adición de granos andinos, contribuye a la aceptación del consumo de panes en personas celiacas (Martínez-Villaluenga *et al.*, 2020).

Los granos andinos poseen alta calidad nutritiva, por ello, es necesario investigar sobre sus aportes nutricionales, proteicos, aminoacídicos y sensoriales, que se obtienen al sustituir parcialmente la harina de trigo por la harina Kiwicha y Cañihua y así proporcionar una base científica dirigida a la formulación de nuevos productos de panadería con las características de alimentos alternativos considerados sanos y saludables (Cerezal-Mezquita *et al.*, 2007; Zegarra *et al.*, 2019). Desde hace algunos años, se han venido desarrollando investigaciones enfocadas en la adición de pseudocereales en alimentos industriales por ejemplo, en pan, pasta/fideos, galletas, bizcochos, pasteles, galletas saladas, panqueques y gofres, entre otros productos (Haros & Sanz-Penella, 2017), por lo cual, el objetivo del presente estudio se enfocó evaluar las características fisicoquímicas y sensoriales del pan de molde enriquecido con harina de Kiwicha y Cañihua.

Materiales y Métodos

Obtención de Muestras

La obtención de la harina de fuerza o harina de trigo común (*Triticum aestivum* L.), marca “Blanca nieve” se adquirió en el mercado local de la ciudad de Huánuco, de igual manera, la harina de Kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.) y Cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Allen), e insumos (Tabla 1), fueron adquiridos en el Mercado Nuevo de la ciudad de Huánuco. Las

respectivas muestras, fueron embaladas en bolsas de polietileno a temperatura ambiente, para luego ser trasladadas a las instalaciones de la planta de procesamiento de pan.

Procedimiento para la elaboración de pan de molde

La elaboración de pan de molde se realizó por el método de masa directa, y con la combinación de los ingredientes se obtuvieron tres formulaciones diferentes y un tratamiento control (Tabla 1).

Durante el proceso de elaboración de panes de molde, se empleó la metodología de Reyes-Aguilar *et al.* (2004), para obtener 10 kg de masa por cada formulación. De esta manera, se diluyeron 300 g levadura fresca (Fleischmann®) en 6 L de agua fría con 800

g de azúcar rubia doméstica (Anduasi®) hasta obtener una masa homogénea, inmediatamente se incorporaron 200 g de sal yodada (Mi purita®), 600 g de manteca (Manpan®), 20 g de esencia de vainilla Umsha®), 200 g de leche en polvo, 50 g de mejorador (Starpan®) y 30 g de antimoho (puratos). Seguidamente, la mezcla se amasó por 30 min hasta obtener una masa lisa y elástica, la cual se dejó reposar 20 min; a continuación, se llevó a cabo el boleado de la masa para eliminar el aire por periodo de 8 min. Finalmente, a la masa se le dio forma alargada y rectangular con un peso de 900 g para introducirla al molde, dejándola reposar por 30 min. El horneado del pan se realizó por un tiempo de cocción de 30 min a 180 °C. Culminado este tiempo, se retiraron las tapas de los moldes dejándose enfriar por 5 min. Los panes obtenidos, se enfriaron individualmente por 90 min y se procedió a su embalaje y almacenamiento, conservándose a temperatura ambiente hasta realizar los respectivos análisis.

Tabla 1

Formulación y lista de ingredientes para la elaboración de panes enriquecidos con Kiwicha y Cañihua.

Formulación	Ingredientes en la formulación de pan
F ₀ : 100 % de harina de trigo	6 L de agua fría 300 g levadura fresca (Fleischmann®) 800 g azúcar rubia doméstica (Andahuasi®)
F ₁ : 73 % de trigo, 17% de Kiwicha y 10 % de Cañihua	200 g de sal yodada (Mi purita®) 600 g de manteca (Manpan®) 20 g de esencia de vainilla Umsha®)
F ₂ : 73 % de trigo, 20% de Kiwicha y 7 % Cañihua	200 g de leche en polvo 50 g de mejorador (Starpan®)
F ₃ : 70 % de trigo, 20% de Kiwicha, y 10 % de Cañihua	30 g de antimoho (puratos)

Análisis fisicoquímicos

La determinación de la humedad, ceniza, fibra cruda, proteínas, grasas, carbohidratos, hierro, pH y acidez titulable se realizaron según normativa de la Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2023). Para los análisis de color se usó un colorímetro Konica Minolta (Rodríguez *et al.*, 2018), y se midieron las variables L*, a*, b*, C*, h* y ΔE, por lo cual,

se comparó el color de los tratamientos con el control (F₀), este último constituido por harina de trigo al 100%.

Perfil de aminoácidos

Este análisis se realizó únicamente a la formulación F₃, por tener el mayor contenido de proteínas, se utilizó un Cromatógrafo Líquido de Alta Eficiencia (HPLC) modelo Chromaster,

marca Hitachi, Praga-República Checa. Con detector de arreglo de diodos, modelo DAD - 5430. Horno modelo, Column Oven - 5310. Automuestreador, modelo autosampler - 5260, bomba modelo Pump - 5160. Columna Purospher STAR-RP 18 endcapped (5µm) LichroCart 250 - 4.6. (Marca Merck) (Analytical Biochemistry, 2023; AOAC, 2023).

Las muestras de pan fueron homogeneizadas con 0,01 N de HCL y centrifugado a 4 °C y 10000 rpm por 20 min, los sobrenadantes fueron filtrados con membrana de 0,45 µm (Igual *et al.*, 2021). La fase móvil fue desarrollada con acetato de sodio 70 mM a pH 6,55 que contenía 2,5 % de acetonitrilo y agua-acetonitrilo-metanol, 40:45:15 (v/v/v), el flujo fue 1 mL/min (Flores *et al.*, 2006). Las muestras se desproteinizaron en

300 µL más 50 µL de una solución de estándar interno (alfa-aminobutírico, 2,5 mM) con 875 µL de acetonitrilo. Los 300 µL del sobrenadante se derivatizaron (Bidlemeier *et al.*, 1987). Las muestras derivatizadas se analizaron a 254 nm, la separación se logró en 65 min a 52 °C.

Evaluación sensorial.

Los panes de molde se trozaron y se presentaron en un platillo de color blanco rotulado aleatoriamente, con suministro de un vaso con agua y se concedieron cuestionarios a 30 jueces semi-entrenados, consumidores habituales de pan. Se evaluaron las variables de color, olor, sabor y aspecto general, aplicando una escala hedónica de 5 puntos; 1= disgusta mucho, 2= disgusta, 3 = ni gusta ni disgusta, 4 = gusta y 5 = gusta mucho (Anzaldúa-Morales, 1994).

Tabla 2
Formulaciones resultantes del diseño de mezclas para la elaboración de panes.

Repeticiones	Trigo (%)	Proteína de trigo (%)	Kiwicha (%)	Proteína de Kiwicha (%)	Cañihua (%)	Proteína de Cañihua	Proteína total (%)
1	73	10,7	17	12,9	10	15	11,51
2	80	10,7	13	12,9	7	15	11,29
3	77	10,7	18	12,9	5	15	11,31
4	80	10,7	13	12,9	7	15	11,29
5	78	10,7	15	12,9	7	15	11,34
6	75	10,7	15	12,9	9	15	11,43
7	75	10,7	20	12,9	5	15	11,36
8	75	10,7	15	12,9	9	15	11,43
9	80	10,7	15	12,9	5	15	11,25
10	75	10,7	18	12,9	7	15	11,40
11	73	10,7	20	12,9	7	15	11,45
12	80	10,7	10	12,9	10	15	11,35
13	70	10,7	20	12,9	10	15	11,57
14	80	10,7	10	12,9	10	15	11,35
15	75	10,7	15	12,9	9	15	11,43
16	73	10,7	20	12,9	7	15	11,44

Nota. Se destacan en negrilla, las formulaciones que presentaron los mayores porcentajes de proteína total.

Diseño experimental

Para las formulaciones de los panes, se utilizó el diseño de mezclas simplex para tres componentes y se empleó software Design-Expert ® (Cornell, 2011; Vidaurre-Ruiz *et al.*,

2022; Yilmaz *et al.*, 2015), se establecieron contenidos de trigo de 70 % a 80 %, Kiwicha de 10 % a 20 % y Cañihua de 5 % a 10 %, con 15 repeticiones (Tabla 2). Se seleccionaron las tres formulaciones que presentaron mayor contenido de proteínas (11,51 para F₁; 11,45 para

F₂ y 11,57 % para F₃) en la superficie de respuesta y correspondieron a F₁: 73 % de trigo, 17 % de Kiwicha y 10 % de Cañihua; F₂: 73 % de trigo, 20 % de Kiwicha y 70 % de Cañihua y F₃: 70 % de trigo, 20 % de Kiwicha, y 10 % Cañihua y se empleó para control (F₀): 100% de harina de trigo (Pascual & Zapata, 2010; Zegarra *et al.*, 2019).

Análisis estadístico

El estudio de las variables fisicoquímicas y sensoriales en los panes, se realizó mediante el análisis de varianza ANOVA, y los resultados se reportaron como valores de media $\pm$ desviación estándar. La estimación de las diferencias estadísticas entre formulaciones se realizó empleando la prueba de Tukey, para las características sensoriales se usó la prueba no paramétrica de Friedman ($p \leq 0,05$) (Rodríguez *et al.*, 2018). Los resultados se analizaron con el software Minitab V26 (versión DEMO).

Resultados y Discusión

Formulación y elaboración del pan de molde

La evaluación de las características fisicoquímicas en la formulación de panes, en la cuantificación de proteína en muestras de trigo Kiwicha y Cañihua, arrojó valores iguales a 10,7; 12,9 y 15 g/100 g de muestra respectivamente ($p \leq 0,05$). Estos valores de proteínas fueron positivos en esta investigación ya que las harinas de trigo de Kiwicha y Cañihua aportaron contenido de proteína significativo, de las cuales, la mejor formulación correspondió al tratamiento con mayor contenido proteico o tratamiento (F₃). Este resultado es de vital importancia ya que el pan constituye uno de los alimentos básicos más importantes de la dieta humana, siendo una buena fuente de macronutrientes en hidratos de carbono, proteínas y micronutrientes como vitaminas y minerales (Tsanasidou *et al.*, 2021).

De igual manera, en investigaciones realizadas en México, evaluando 150 muestras de trigo reportaron de 7,4 a 14 % de contenido proteico, de los cuales el valor promedio para esta variable fue de 10,53 % (Cervantes *et al.*, 2002). Comparando este resultado, con el valor promedio del contenido proteínico en los granos de trigo en el presente experimento se obtuvo un porcentaje cercano igual al 10,7 % de proteína. Generalmente, los rangos de variación de proteína en el trigo para panificación están influenciados predominantemente por los antecedentes genéticos de las variedades (Alemu *et al.*, 2021). En un estudio realizado por Chamorro *et al.* (2018), se reportó que el contenido de proteína en Kiwicha presentó rangos de 14,13 a 16,59 %, aunque Trino *et al.* (2017), reportaron 11,4 %.

En la presente investigación, los granos de Kiwicha empleados para el enriquecimiento de panes reportaron un contenido de 12,9 % de proteína, gracias a este resultado es posible indicar que la Kiwicha tiene un uso prometedor en la elaboración de pan, además de caracterizarse por su alta solubilidad y digestibilidad de proteínas (Burgos *et al.*, 2021; Sanz-Penella *et al.*, 2013). Por otra parte, la Kiwicha a diferencia del trigo, el arroz y la avena, no contiene gluten y en cambio presenta un 30 % más de proteínas con un conjunto completo de aminoácidos, lo que ofrece nuevas posibilidades para el procesamiento de alimentos antihiperlipidémicos y antihipercolesterolémicos, por tanto, podría estar asociada con la promoción en el cuidado de la salud y la prevención de enfermedades (Martínez-López *et al.*, 2020).

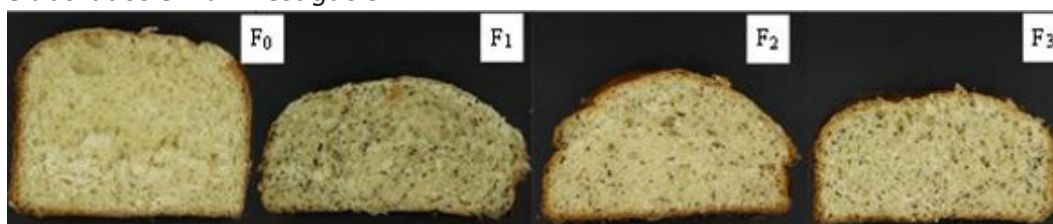
Respecto a la Cañihua del altiplano peruano se sabe que su grano presenta entre un 15 a 18 % de proteína (Mangelson *et al.*, 2019), lo cual se corrobora en la presente investigación, donde se obtuvo 15 % de proteína en el grano de cañihua.

Analizando el contenido de proteína evidenciado en las mezclas de pan analizadas, se encontró que la harina de Cañihua tuvo efecto creciente en el contenido de proteínas, esto podría estar relacionado con el perfil nutricional único del grano, que presenta con un conjunto completo de aminoácidos esenciales, incluyendo la lisina en un porcentaje de 5 a 6 % aminoácido que suele ser limitante en los cultivos de cereales monocotiledóneas (Mangelson *et al.*, 2019).

A partir del procesamiento de datos, se seleccionaron las tres formulaciones que presentaron mayor contenido de proteínas: (F_1 - 11,51 %), (F_2 - 11,45 %) y (F_3 - 11,57 %), derivando a las siguientes formulaciones: control o F_0 : 100 % de harina de trigo; F_1 : 73 % de trigo, 17% de Kiwicha y 10 % de Cañihua; F_2 : 73% de trigo, 20% de Kiwicha y 7% Cañihua y F_3 : 70% de trigo, 20% de Kiwicha, y 10% de Cañihua (**Figura 1**)

Figura 1

Corte transversal de los diferentes tratamientos (F_0 , F_1 , F_2 , F_3) de panes de molde, elaborados en la investigación



Análisis fisicoquímicos

El aporte de energía total de los panes de molde elaborados según las cuatro formulaciones seleccionadas (F_0 , F_1 , F_2 y F_3), arrojó valores respectivos de 261,1; 282,7; 273,4 y 275,2 (Kcal/100 g de muestra original). Adicionalmente, de estas formulaciones es posible indicar aportes energéticos, distribuidos de la siguiente manera: 82,3; 80,7; 80,6 y 77,3 % de Kcal provenían de los carbohidratos. El 3,8; 7,3; 5,9 y 6,5 % de Kcal provenían de la grasa y el 13,9; 12,0; 13,5 y 16,2 % de Kcal derivaban de las proteínas, respectivamente.

Entre las formulaciones evaluadas, los resultados en el contenido de cenizas, pH y acidez titulable de F_1 , F_2 y F_3 , no arrojaron diferencias significativas ($p \geq 0,05$), de igual manera no se obtuvo diferencia estadística ($p < 0,05$) evaluando los componentes de carbohidratos, grasa, humedad, proteína, fibra cruda y hierro (**Tabla 3**). El contenido de humedad varió de $31,07 \pm 0,06$ % a $32,64 \pm 0,15$ %, siendo menor al rango de humedad (del 38 a 41 %) reportado por

Sanz-Penella *et al.* (2013). Es posible que el bajo contenido de humedad indicado en nuestras formulaciones, esté relacionado con la presencia de algunos ingredientes usados como: la sal, el antimoho y el mejorador, que se adicionaron con el fin de aumentar la vida útil del pan de molde. Destacamos de manera particular la adición de sal, la cual se sabe reduce la humedad debido a la interacción química con las moléculas de agua provocando que estas últimas queden atrapadas por acción del disolvente en la red iónica, durante el proceso de amasado para la elaboración del pan (Barroca *et al.*, 2023).

La adición de los ingredientes mencionados (sal, antimoho y mejorador) es necesaria en la elaboración de mezclas de pan, debido a que este es susceptible al crecimiento de mohos cuando se almacena a temperatura ambiente por su alto contenido de humedad (alrededor del 40 %) y actividad del agua (alrededor de 0,94 a 0,97). El pan generalmente tiene una vida útil corta (normalmente de 3 a 7 días), pero a menor contenido de humedad tendrá mayor durabilidad (Tsanasidou *et al.*, 2021).

Tabla 3

Resultados de los análisis fisicoquímicos en panes de molde sustituidos con harina de Kiwicha y Cañihua

Análisis	Tratamientos			
	F ₀	F ₁	F ₂	F ₃
Carbohidratos*	54,05 ± 0,01a	51,80 ± 0,16b	53,39 ± 0,00c	51,45 ± 0,07c
Grasa *	1,09 ± 0,00d	2,30 ± 0,011a	1,80 ± 0,00c	1,99 ± 0,01b
Humedad *	33,08 ± 0,01a	32,64 ± 0,15b	31,26 ± 0,01c	31,07 ± 0,06c
Proteína *	8,51 ± 0,02d	9,09 ± 0,01c	9,18 ± 0,01b	11,12 ± 0,01a
Ceniza *	1,98 ± 0,00b	2,58 ± 0,03a	2,55 ± 0,02a	2,58 ± 0,02a
Fibra cruda *	1,30 ± 0,00c	1,61 ± 0,01b	1,83 ± 0,02a	1,80 ± 0,04a
Hierro **	12,34 ± 0,04d	41,12 ± 0,04c	41,33 ± 0,02b	41,87 ± 0,03a
pH (20 °C)	5,88 ± 0,01a	5,89 ± 0,01a	5,89 ± 0,01a	5,89 ± 0,01a
Acidez titulable (% ácido sulfúrico)	0,10 ± 0,01a	0,11 ± 0,01a	0,11 ± 0,01a	0,11 ± 0,01a

Nota. *En g/100 g, **ppm. Diferentes letras en superíndice en cada fila indican diferencias estadísticas ($p < 0,05$). Tratamientos: trigo, Kiwicha y Cañihua (F₁: 73 %, 17 %, 10 %; F₂: 73 %, 20 %, 7 %; F₃: 70 %, 20 %, 10 %).

El contenido de macronutrientes como la fibra, grasa, ceniza y proteína se incrementó significativamente en los panes de molde formulados con la mezcla de harina de Kiwicha y Cañihua, este incremento podría deberse a la composición proximal de los granos de kiwicha alta en fibra (3,60 a 4,59 g/100 g), grasa (8,08 a 9,50 g/100 g), ceniza (2,39 a 2,83 g/100 g) y proteína (13,1 a 15,4 g/100 g) (Mérida-López *et al.*, 2023a). Por su parte, la Cañihua, aportó valores más altos respecto a la fibra (7,19 a 8,40 g/100 g), grasa (9,10 a 10,32 g/100 g), ceniza (2,42 a 5,12 g/100 g) y proteína (13,92 a 19,56 g/100 g), en este sentido este pseudocereal ha sido destacado por presentar mayor contenido de nutrientes que *Chenopodium quinoa* (Mérida-López *et al.*, 2023b). Nuestros resultados coinciden con lo reportado por Banerji *et al.* (2018); Miranda-Ramos *et al.* (2019) y Zegarra *et al.* (2019), quienes señalan el incremento de la fibra, grasa, ceniza y proteína en pan de molde se debe principalmente a la presencia de Kiwicha y Cañihua.

El tratamiento F₁, presentó mayor contenido de grasa (2,30 %), en comparación con las otras formulaciones (1,80 a 1,99 %), esto podría deberse a la cantidad de lípidos añadidos a las

harinas de trigo no convencionales, los cuales fueron aportados por la Kichicha y la Cañihua sin desconocer el aporte efectuado por la manteca vegetal añadida en la masa (Pareyt *et al.*, 2011). Resultados similares, fueron reportados por Sanz-Penella *et al.* (2013).

El mayor contenido en fibra cruda se dio en los tratamientos F₂ y F₃ (1,80 a 1,83 %), siendo inferiores a los porcentajes reportados (11 a 12 %) por Alshehry *et al.* (2022), sin embargo, si se han reportado contenidos de fibra inferiores a 0,1 a 0,5 % en panes de trigo sustituidos con harina de Kiwicha (0 a 20 %) (Pascual & Zapata, 2010). La formulación sin granos andinos (control), presentó mayor contenido de humedad (33,08 %) y menor contenido de grasa (1,09 %), cenizas (1,98 %), proteína (8,51 %), fibra cruda (1,30 %) y hierro (12,34 ppm), en comparación con los tratamientos F₁ y F₃.

Referente al contenido de proteína obtenido en la formulación F₃, que fue igual a 11,12 el incremento estaría relacionado con el aporte proteico que ejercen las mezclas de las harinas de trigo, Kiwicha y Cañihua, las cuales proporcionan alternativas saludables y beneficios para la salud

de los consumidores y mejores propiedades químicas, físicas y funcionales del pan (Prieto-Vázquez *et al.*, 2022).

En pan elaborado con 100% de harina de trigo, se obtuvo 8,51 % de proteína lo cual es estadísticamente inferior a las demás formulaciones que alcanzaron porcentajes de 9,09 % y 11,12 %, estos valores difieren con diversas investigaciones que han reportado 14% contenido proteico (Dyner *et al.*, 2007; Gostin, 2019; Sanz-Penella *et al.*, 2013) y valores de 8 a 9,7 % en panes formulados con harina de Kiwicha (Pascual & Zapata, 2010). La variación en los contenidos de proteínas en las mezclas podría deberse a la variabilidad genética de las diferentes especies (Partida *et al.*, 2007).

Nótese que el contenido de hierro se incrementó en F₁, F₂ y F₃ (pasando de 41,22 a 41,87 ppm) en más de 340 % respecto al control (12,32 ppm). Estos valores son muy prometedores para la industria panadera, ya que se reporta que el consumo de hierro previene la anemia (Salas *et al.*, 1990). Si comparamos estos porcentajes con lo reportado por Dyner *et al.* (2007), quienes evaluaron la presencia del hierro en panes enriquecidos con 20 % de harina de kiwicha, los contenidos fueron menores a 1,4 ppm a 5,5 ppm. Menores valores reportaron Miranda-Ramos *et al.* (2019) con 32 ppm en panes sustituidos con 25 % de harina de Kiwicha, los contenidos pueden ser menores porque solo enriquecieron con este pseudocereal y no con la combinación de varias especies, como lo realizado en este estudio.

Sanz-Penella *et al.* (2013), reportaron valores similares en el rango de 18,85 a 43,74 ppm, en panes sustituidos con 0 a 40 % de harina de Kiwicha, evidenciando que el aporte proteico fue favorecido por la presencia de semillas de *Amaranthus cruentus*. Valores ligeramente inferiores encontraron Miranda-Ramos *et al.* (2019), con 39 ppm al sustituir 50 % de harina

de Kiwicha, estos contenidos inferiores según los autores se debieron al origen de los granos de *A. hypochondriacus*, que provenían de México. Los pseudocereales, por su constitución, aportan minerales a las diversas formulaciones empleadas en panes (Yeşil & Levent, 2022), y también contribuyen con efectos benéficos a la salud, como la disminución del índice glicémico (Collar *et al.*, 2014).

Respecto al análisis del pH, se encontraron valores en un rango de 5,88 a 5,89 para las cuatro formulaciones de panes, por lo tanto, es posible inferir que los panes elaborados en este estudio son alimentos de baja acidez; además, se encuentran por debajo de un pH de 6,01 dato reportado por Zegarra *et al.*, (2019). Mientras que la acidez titulable estuvo dentro del rango de 0,10 a 0,11 % de ácido sulfúrico, estos valores son inferiores a 0,50 %, el cual se considera como la máxima acidez para panes; la acidez de la masa favorece la formación del gluten y ayuda en la obtención de una masa más extensible además de retrasar el desarrollo de microorganismos (Pascual & Zapata, 2010).

En la **Tabla 4**, se puede observar los valores de color expresados como L*, a*, b*, C*, h° y ΔE evaluados en las formulaciones de panes de molde enriquecidos. Analizando estas variables, se evidenciaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$). En la corteza exterior de los panes, los valores de L* de las tres formulaciones: (F₁, F₂ y F₃) fueron estadísticamente inferiores (43,64 a 39,86) respecto al control (50,03), el mismo comportamiento tuvo la corteza interna del pan. De manera similar se mostraron los valores b*, que indican mayor color amarillento en comparación al control (100 % harina de trigo); los cuales fueron más oscuros y color amarillento en la corteza externa y migas oscuras en la corteza interna (Sanz-Penella *et al.*, 2013). Estos resultados de coloración, estarían influenciados por los compuestos bioactivos de

los pseudocereales (flavonoides, carotenoides, betalainas y otros) presentes en la cubierta de las semillas (Hidalgo *et al.*, 2017; Repo-Carrasco-*et al.*, 2010). De manera general, es posible indicar

que el color marrón de los panes de molde está influenciado por la reacción de Maillard que se produce entre los azúcares y los aminoácidos durante el proceso de cocción (Alshehry *et al.*, 2022).

Tabla 4

Resultados del análisis de color del pan de molde

Corteza de pan	T	L*	a*	a*	b*	h°	ΔE
Corteza externa	F ₀	50,03±0,01a	12,58±0,04c	26,31±0,04a	29,14±0,02a	64,25±0,03a	
	F ₁	43,64±0,02b	12,81±0,03b	24,16±0,02c	27,36±0,03c	62,08±0,03c	6,75±0,03c
	F ₂	41,82±0,02c	14,65±0,02a	24,25±0,02b	28,32±0,01b	58,74±0,03d	8,72±0,02b
	F ₃	39,86±0,02d	12,05±0,02d	23,95±0,01d	26,76±0,03d	63,45±0,03b	10,45±0,02a
Corteza interna	F ₀	71,25±0,02a	6,16±0,01a	21,55±0,02a	22,45±0,03a	74,05±0,03d	
	F ₁	64,84±0,02b	1,90±0,01b	14,57±0,01d	14,63±0,02d	82,57±0,02c	10,39±0,03c
	F ₂	60,56±0,01c	1,36±0,02d	15,79±0,01b	15,86±0,02b	85,16±0,03a	13,06±0,03b
	F ₃	56,27±0,01d	1,83±0,03c	15,04±0,03c	15,25±0,02c	82,82±0,01b	16,90±0,04a

Nota. T: Tratamientos: trigo, Kiwicha y Cañihua (F₁: 73 %, 17 %, 10 %; F₂: 73 %, 20 %, 7 %; F₃: 70 %, 20 %, 10 %). Resultados expresados como promedio ± desviación estándar. Diferentes letras en superíndice de cada columna indican diferencias estadísticas (p < 0,05).

Similares coloraciones en L* se observaron (37,0 a 53,9) en panes con formulaciones de 7,6 a 9,5 % de Cañihua (Zegarra *et al.*, 2019). De forma similar Sanz-Penella *et al.* (2013), reportaron valores de L* (42,7 a 48,7) asociados a la parte superficial y L* (53,0 a 53,5) en la parte interior en pan elaborado con 10 y 40 % de harina de Kiwicha.

Los valores de a*, b* y C* en la corteza superficial, fueron mayores que los valores obtenidos en la porción interior del pan de molde. Se puede ver que existen diferencias estadísticas significantes de la formulación F₀ en cuanto al color en la parte superficial respecto a los tratamientos de F₁ a F₃ en la parte interior del pan. Generalmente, el color intenso del pan de molde depende del contenido de proteínas, aminoácidos, y fibra cruda que aportan los granos andinos, siendo la parte externa de estos granos el lugar donde se concentran los compuestos fenólicos como flavonoides, y betalainas, que le otorgan coloraciones oscuras al pan (Chamorro *et al.*, 2018).

Perfil de aminoácidos

En la **Tabla 5**, se muestran únicamente los resultados del perfil de aminoácidos de la formulación F₃ (70 % de trigo, 20 % Kiwicha, y 10 % Cañihua), más no de las formulaciones F₀, F₁ y F₂ a las cuales no se les hizo el análisis de perfil de aminoácidos debido al bajo contenido en proteínas que reportaron ubicándose en el rango de (8,5 a 9,18) (AOAC, 2023; Cooper, 2023). En la formulación F₃, se encontraron diecisiete aminoácidos entre ellos destacan la histidina; treonina; valina; metionina; isoleucina; leucina; fenilalanina; lisina y triptófano, por ser aminoácidos esenciales o indispensables ya que el organismo humano no puede sintetizarlos de manera natural (Martínez & Martínez, 2006). Por lo tanto, el pan con esta combinación de harinas, sería una fuente externa de nutrientes que proporcionaría aminoácidos esenciales al consumidor.

En los panes evaluados según las formulaciones (F₀, F₁, F₂ y F₃), los aminoácidos

encontrados fueron: alanina en (0,1 g de AA/100 g) y leucina en (1,79 g de AA/100 g), hecho que es bastante positivo porque convierte a los panes en una fuente de aminoácidos esenciales. Por otra parte, los valores de metionina se encuentran dentro de lo reportado por Diana *et al.* (2014), quienes examinaron el perfil de aminoácidos libres, en once panes comerciales y doce panes artesanales con y sin masa madre de Barcelona (España), los ingredientes fueron harina integral, harina de trigo blanco y harina de soya tostada, encontrando que los panes sin masa madre tenían menos contenido de aminoácidos (de 0,03 de metionina hasta 8,11 de ácido aspártico g/100 g) que los panes con masa madre (de 0,12 de metionina hasta 10,89 de ácido aspártico g/100 g). De manera similar Kowalski *et al.* (2022) encontraron aminoácidos esenciales (0,1672 a 0,7351 g/100 g) y aminoácidos no esenciales (0,1948 a 3,8660 g/100 g) en panes con trigo Cerraceno. Cojovanu *et al.* (2023) indicaron la presencia de solo seis aminoácidos esenciales (isoleucina, leucina, metionina, fenilalanina, treonina y valina) en pan de trigo, al adicionar 7,89; 9,39 y 9,41% de

harina de kiwicha a la mezcla de pan. Calderón de la Barca *et al.* (2022) reportaron en mezcla para elaborar pan con 30,23 % de harina de kiwicha y camote la presencia de 2,98 g/ 100 g de lisina y 5,42 g/100g de leucina. Por último, Ballester-Sánchez *et al.* (2019), reportaron de 0,7 a 8,9 g/100 g de aminoácidos esenciales en panes enriquecidos con harina de *Chenoposium quinoa* color rojo, blanco y negro.

La elección de los pseudocereales para enriquecer los panes de molde obedeció principalmente a que la Kiwicha contiene mejor score aminoacídico respecto al maíz que va en un rango de (3,5 a 27,3 g por kg) para la metionina vs (1,4 a 14,6 g por kg) de ácido glutámico (Ravindran *et al.*, 1996). Además, porque las personas adultas requieren de 8 a 12 mg/kg de histidina por día, así como 10 mg/kg de isoleucina y valina al día, 12 mg/kg de lisina, 13 mg/kg de metionina más cisteína por día, 14 mg/kg por día de fenilalanina más tirosina, sin dejar de lado el consumo de 7 mg/kg de treonina y 3,5 mg/kg de triptófano por día (Allowances, 1989).

Tabla 5

Contenido de aminoácidos presentes en pan de molde correspondiente al tratamiento F₃

Aminoácidos*	F ₃
Ácido aspártico	0,33±0,01
Ácido glutámico	1,60±0,02
Serina	0,31±0,03
Glicina	0,22±0,01
Histidina	0,22±0,01
Treonina	0,21±0,02
Alanina	0,10±0,01
Arginina	0,52±0,01
Prolina	0,72±0,01
Tirosina	0,32±0,01
Valina	0,33±0,01
Metionina	0,21±0,02
Isoleucina	0,22±0,02
Leucina	1,79±0,03
Fenilalanina	0,52±0,01
Lisina	0,22±0,01
Triptófano	0,32±0,01
Proteína (g/100 g de muestra original)	8,5±0,00

Nota. *g de AA/100 g de proteína pura. F₃: empleando Trigo, Kiwicha y Cañihua (70 %, 20 %, 10 %), respectivamente.

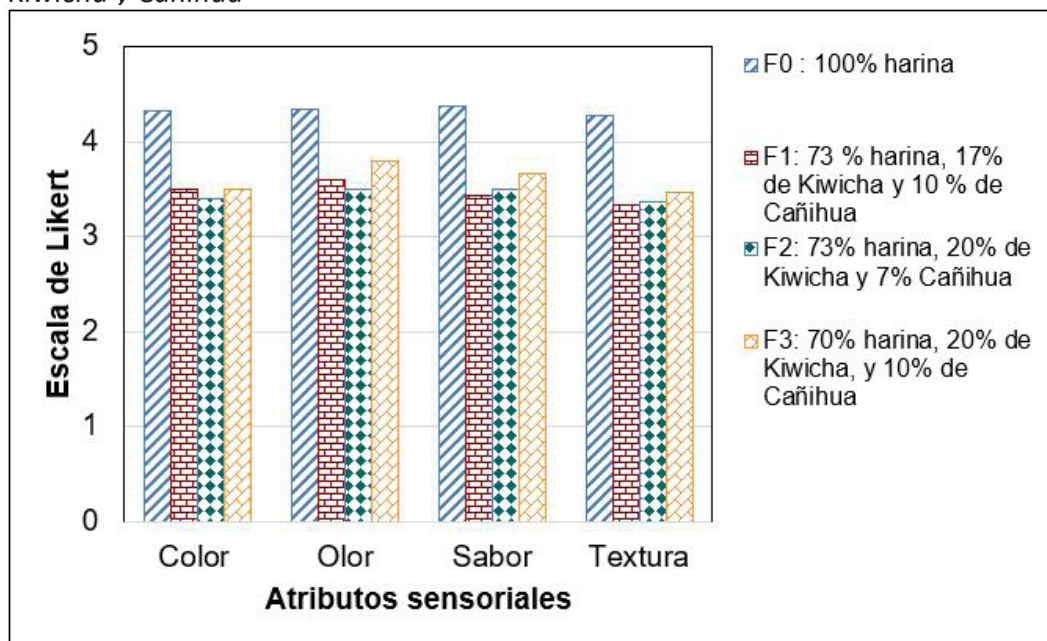
Análisis sensorial

La evaluación sensorial se realizó apoyada en treinta panelistas (catadores), mediante la aplicación de una escala hedónica de 1 a 5 puntos. La evaluación del pan de molde se dio en función de la percepción global de los atributos

(color, olor, sabor y textura). En la **Figura 2**, se muestra claramente que el F_0 del pan de molde elaborado con 100 % harina de trigo tuvo la media más elevada respecto al color, olor, sabor y textura, por lo cual, resultó ser la formulación más aceptada por los panelistas.

Figura 2

Resultados del análisis sensorial de los tratamientos de pan elaborados con Kiwicha y Cañihua



No se encontraron diferencias estadísticas entre los tratamientos F_1 , F_2 y F_3 además los promedios de las puntuaciones se encuentran por encima de 3,33/5, esto podría deberse a que la presencia de los granos andinos genera en el pan diferencias sensoriales, pero agradables al paladar. Después del tratamiento control (F_0), el tratamiento F_3 , tuvo una ventajosa aceptabilidad sensorial en comparación a las otras formulaciones (F_1 y F_2), especialmente en color, sabor y textura.

En el presente estudio, los panelistas evaluados indicaron preferir panes con masas refinadas de color, sabor, olor y textura típicos, por lo cual la formulación más aceptada

correspondió a F_0 . Se sabe que el aporte nutritivo en este tipo de panes (100 % harina), es limitado respecto al contenido de fibra, hierro y aminoácidos; en este sentido para mejorar la aceptabilidad del consumidor por mezclas alternativas de pan de molde, a nivel industrial se podría adicionar granos andinos finamente molidos para no ser perceptibles por los consumidores. Zegarra *et al.* (2019) encontraron puntuaciones similares con valores de 3,16 a 3,61/5 en tres formulaciones en las que se variaron los porcentajes de harina de Cañihua (7,6 % 9,5 % y 8,3 %) siendo la formulación que contenía harina de Cañihua (8,3 %), la que presentó mayor aceptabilidad. Así mismo, Ravindran *et al.* (1996) encontraron diferencias

estadísticas en las características sensoriales al variar pocas concentraciones de harina Kiwicha en galletas.

Conclusiones

Las harinas de Kiwicha y Cañihua son una alternativa viable para elaborar pan de molde en reemplazo de la harina tradicional, debido a que incrementan el contenido de proteínas, grasa, fibra, hierro y aminoácidos esenciales cuando se adicionan de manera respectiva en porcentajes de 20 y 10% a la mezcla de pan. Además, su uso genera variaciones a nivel de color (mayor oscuridad) en la presentación del pan, lo cual da un valor agregado al producto.

Respecto a las características sensoriales, en las formulaciones F_1 , F_2 y F_3 , la adición de Kiwicha y Cañihua influenciaron de manera negativa en la aceptabilidad del pan de molde, sin embargo, para mejorar la aceptabilidad se podría reformular la adición de pseudocereales, incluso se podría utilizar otros ingredientes que enmascaren las características sensoriales poco aceptadas.

Finalmente, los panes de trigo enriquecidos con Kiwicha y Cañihua son una buena propuesta de un alimento nutritivo, debido a su alto contenido en macronutrientes, aminoácidos y hierro, por lo cual estas formulaciones con harinas alternativas (destacando la F_3) en el pan de molde ayudarían a disminuir la desnutrición, y podrían considerarse una buena propuesta para pacientes celíacos.

Agradecimientos

La presente investigación fue financiada por la Dirección de Investigación Universitaria de la Universidad Nacional Hermilio Valdizán, Huánuco – Perú.

Referencias

- Alemu, A., El Baouchi, A., El Hanafi, S., Kehel, Z., Eddakhir, K., & Tadesse, W. (2021). Genetic analysis of grain protein content and dough quality traits in elite spring bread wheat (*Triticum aestivum*) lines through association study. *Journal of Cereal Science*, 100, 103214. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103214>
- Allowances, N. R. C. (US) S. on the T. E. of the R. D. (1989). Protein and Amino Acids. in Recommended Dietary Allowances: 10th Edition. *National Academies Press* (US). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK234922/>
- Alshehry, G., Algarni, E., Aljumayi, H., Algheshairy, R. M., & Alharbi, H. F. (2022). Development and Characterization of Multigrain Pan Bread Prepared Using Quinoa, Lupin, and Fenugreek Seeds with Yellow Maize as a Gluten-Free Diet. *Journal of Food Quality*, 2022, e4331353. <https://doi.org/10.1155/2022/4331353>
- Ammar, I., Sebi, H., Aloui, T., Attia, H., Hadrich, B., & Felfoul, I. (2022). Optimization of a novel, gluten-free bread's formulation based on chickpea, carob and rice flours using response surface design. *Heliyon*, 8(12), e12164. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12164>
- Anzaldúa-Morales, A. (1994). La Evaluación Sensorial de Los Alimentos en la Teoría y la Práctica. *Acribia*, Editorial, S.A.
- Association of Official Analytical Chemists. (2023). Official methods of analysis (AOAC). *Scientific Standards & Methods*. (22.^a ed.). <https://www.aoac.org/scientific-solutions/>
- Ballester-Sánchez, J., Millán-Linares, M. C., Fernández-Espinar, M. T., & Haros, C. M. (2019). Development of Healthy, Nutritious Bakery Products by Incorporation of Quinoa. *Foods*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/foods8090379>
- Banerji, A., Ananthanarayan, L., & Lele, S. (2018). Rheological and nutritional studies of amaranth enriched wheat chapatti (Indian flat bread). *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(1), e13361. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13361>
- Barroca, M. J., Flores, C., Ressurreição, S., Guiné, R., Osório, N., & Moreira da Silva, A. (2023). Re-Thinking Table Salt Reduction in Bread with Halophyte Plant Solutions. *Applied Sciences*, 13(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/app13095342>
- Bidlingmeyer, B. A., Cohen, S. A., Tarvin, T. L., & Frost, B. (1987). A new, rapid, high-sensitivity analysis of amino acids in food type samples. *Journal - Association of Official Analytical Chemists*, 70(2), 241-247.

- Burgos, V. E., Castillo, V. C. D., Burgos, V. E., & Castillo, V. C. D. (2021). Utilización de kiwicha precocida (*Amaranthus caudatus*) para el desarrollo de barras funcionales. *Revista chilena de nutrición*, 48(3), 307–318. <https://doi.org/10.4067/s0717-75182021000300307>
- Calderón de la Barca, A. M., Mercado-Gómez, L. E., Heredia-Sandoval, N. G., Luna-Alcocer, V., Porras Loaiza, P. M. A., González-Ríos, H., & Islas-Rubio, A. R. (2022). Highly Nutritional Bread with Partial Replacement of Wheat by Amaranth and Orange Sweet Potato. *Foods*, 11(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/foods11101473>
- Calvo-Carrillo, M. de la C., López-Méndez, O. X., Carranco-Jáuregui, M. E., Marín, J., Calvo-Carrillo, M. de la C., López-Méndez, O. X., Carranco-Jáuregui, M. E., & Marín, J. (2020). Evaluación físicoquímica y sensorial de un pan tipo baguette utilizando harinas de trigo (*Triticum spp*) y chícharo (*Pisum sativum* L.). *Biotechnia*, 22(3), 116–124. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v22i3.1227>
- Cerezal-Mezquita, P., Carrasco-Verdejo, A., Pinto-Tapia, K., Romero-Palacios, N., & Arcos-Zavala, R. (2007). Suplemento alimenticio de alto contenido proteico para niños de 2–5 años: Desarrollo de la formulación y aceptabilidad. *Interciencia*, 32(12), 857–864. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442007001200013&lng=es&tng=es
- Cervantes, M., Copado, F., Cervantes, M., Soto, R., Torrentera, N., & Figueroa, J. L. (2002). Predicción del contenido de aminoácidos en el trigo con base en su valor de proteína. *Interciencia*, 27(12), 695–701. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442002001200009&lng=es&tng=es
- Chamorro, R., Repo Carrasco, R., Ccapa Ramírez, K., & Quispe Jacobo, F. (2018). Composición química y compuestos bioactivos de treinta accesiones de kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 84(3), 363–375. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v84i3.200>
- Collar, C., Jiménez, T., Conte, P., & Fadda, C. (2014). Impact of ancient cereals, pseudocereals and legumes on starch hydrolysis and antiradical activity of technologically viable blended breads. *Carbohydrate Polymers*, 113, 149–158. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.07.020>
- Cooper, A. (2023). Analytical Biochemistry: Methods in the biological sciences (Vol. 678). Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/journal/analytical-biochemistry>
- Cornell, J. A. (2011). A Primer on Experiments with Mixtures | *Wiley Series in Probability and Statistics*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470907443>
- Cotovanu, I., Mironeasa, C., & Mironeasa, S. (2023). Incorporation of Buckwheat Flour at Different Particle Sizes and Distinctive Doses in Wheat Flour to Manufacture an Improved Wheat Bread. *Foods*, 12(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/foods12081730>
- Diana, M., Rafecas, M., & Quílez, J. (2014). Free amino acids, acrylamide and biogenic amines in gamma-aminobutyric acid enriched sourdough and commercial breads. *Journal of Cereal Science*, 60(3), 639–644. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.06.009>
- Dyner, L., Drago, S. R., Piñeiro, A., Sánchez, H., González, R., Villaamil, E., & Valencia, M. E. (2007b). Composición y aporte potencial de hierro, calcio y zinc de panes y fideos elaborados con harinas de trigo y amaranto. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 57(1), 69–78.
- Flores, M., Aristoy, C., Spanier, A., & Toldrá, F. (2006). Non-Volatile Components Effects on Quality of “Serrano” Dry-cured Ham as Related to Processing Time. 62(6). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1997.tb12252.x>
- Gomes, D. I., Souza Dantas, M. I. de, Teixeira Ribeiro Vidigal, M. C., Machado Rocha Ribeiro, S., Ribeiro Silva, R., & Stampini Duarte Martino, H. (2013). Physical and sensorial properties of potato breads fortified with whole soybean flour. *Revista chilena de nutrición*, 40(1), 62–70. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182013000100010>
- Gostin, A. I. (2019). Effects of substituting refined wheat flour with wholemeal and quinoa flour on the technological and sensory characteristics of salt-reduced breads. *LWT*, 114, 108412. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108412>
- Haros, C. M., & Sanz-Penella, J. M. (2017). Food Uses of Whole Pseudocereals. En *Pseudocereals* (pp. 163–192). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118938256.ch8>
- Hidalgo, A., Ferraretto, A., Noni, I., Bottani, M., Cattaneo, S., Galli, S., & Brandolini, A. (2017). Bioactive compounds and antioxidant properties of pseudocereals-enriched water biscuits and their in vitro digestates. *Food Chemistry*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.014>
- Igual, M., García-Segovia, P., & Martínez-Monzó, J. (2021). Amino acids release from enriched bread with edible insect or pea protein during in vitro gastrointestinal digestion. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 24, 100351. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100351>
- Kowalski, S., Mikulec, A., Mickowska, B., & Buksa, K. (2022). Nutritional properties and amino acid profile of buckwheat bread. *Journal of Food Science and Technology*, 59(8), 3020–3030. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05518-w>

- La República. (2022). Hogares peruanos reducen su consumo de pan hasta en la mitad debido al alza de precios. <https://larepublica.pe/economia/2022/07/14/hogares-peruanos-reducen-su-consumo-de-pan-hasta-en-la-mitad-debido-al-alza-de-precios-atmp>
- Mangelson, H., Jarvis, D. E., Mollinedo, P., Rollano-Penaloza, O. M., Palma-Encinas, V. D., Gomez-Pando, L. R., Jellen, E. N., & Maughan, P. J. (2019). The genome of *Chenopodium pallidicaule*: An emerging Andean super grain. Applications in Plant Sciences, 7(11), e11300. <https://doi.org/10.1002/aps3.11300>
- Martínez, O., & Martínez, E. (2006). Proteínas y péptidos en nutrición enteral. *Nutrición Hospitalaria*, 21, 01-14.
- Martínez-Lopez, A., Millan-Linares, M. C., Rodríguez-Martin, N. M., Millan, F., & Montserrat-de la Paz, S. (2020). Nutraceutical value of kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.). *Journal of Functional Foods*, 65, 103735. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103735>
- Martínez-Villaluenga, C., Peñas, E., & Hernández-Ledesma, B. (2020). Pseudocereal grains: Nutritional value, health benefits and current applications for the development of gluten-free foods. *Food and Chemical Toxicology*, 137, 111178. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111178>
- Mérida-López, J., Pérez, S. J., Bergenstahl, B., Purhagen, J., & Rojas, C. C. (2023a). Nutritional Composition of Six Amaranth (*Amaranthus caudatus*) Andean Varieties. *Crops*, 3(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/crops3010008>
- Mérida-López, J., Pérez, S. J., Morales, R., Purhagen, J., Bergenstahl, B., & Rojas, C. C. (2023b). Comparison of the Chemical Composition of Six Canihua (*Chenopodium pallidicaule*) Cultivars Associated with Growth Habits and after Dehulling. *Foods*, 12(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/foods12081734>
- Miranda-Ramos, K. C., Sanz-Ponce, N., & Haros, C. M. (2019a). Evaluation of technological and nutritional quality of bread enriched with amaranth flour. *LWT*, 114, 108418. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108418>
- Montevecchi, G., Santunione, G., Licciardello, F., Köker, Ö., Masino, F., & Antonelli, A. (2022). Enrichment of wheat flour with Spirulina. Evaluation of thermal damage to essential amino acids during bread preparation. *Food Research International*, 157, 111357. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111357>
- Pareyt, B., Finnie, S. M., Putseys, J. A., & Delcour, J. A. (2011). Lipids in bread making: Sources, interactions, and impact on bread quality. *Journal of Cereal Science*, 54(3), 266-279. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.08.011>
- Partida, L., Cervantes Santana, T., Salazar Zazueta, A., Castillo Morales, A., & Velázquez Alcaraz, T. de J. (2007). Selección para contenido de proteína y rendimiento de grano en trigo irradiado recurrentemente. *Interciencia*, 32(10), 686-691.
- Pascual, G., & Zapata, J. (2010). Sustitución parcial de harina de trigo *Triticum aestivum* L. por harina de kiwicha *Amaranthus caudatus* L., usando el método directo y esponja y masa, en la elaboración de pan. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 76(4), 377-388. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2010000400008
- Perez-Leon, S., Pesantes, M. A., Aya Pastrana, N., Raman, S., Miranda, J., & Suggs, L. S. (2018). Food Perceptions and Dietary Changes for Chronic Condition Management in Rural Peru: Insights for Health Promotion. *Nutrients*, 10(11), 1563. <https://doi.org/10.3390/nu10111563>
- Perez-Moral, N., Saha, S., Pinto, A. M., Bajka, B. H., & Edwards, C. H. (2023). In vitro protein bioaccessibility and human serum amino acid responses to white bread enriched with intact plant cells. *Food Chemistry*, 404, 134538. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134538>
- Prieto-Vázquez del Mercado, P., Mojica, L., & Morales-Hernández, N. (2022). Protein Ingredients in Bread: Technological, Textural and Health Implications. *Foods*, 11(16), 2399. <https://doi.org/10.3390/foods11162399>
- Ravindran, V., Hood, R. L., Gill, R. J., Kneale, C. R., & Bryden, W. L. (1996). Nutritional evaluation of grain amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) in broiler diets. *Animal Feed Science and Technology*, 63(1), 323-331. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(96\)00997-2](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(96)00997-2)
- Repo-Carrasco-Valencia, R., Hellström, J. K., Pihlava, J.-M., & Mattila, P. H. (2010). Flavonoids and other phenolic compounds in Andean indigenous grains: Quinoa (*Chenopodium quinoa*), kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*) and kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Food Chemistry*, 120(1), 128-133. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.09.087>
- Reyes, S. E., Contreras Contreras, A. M., & Oyola Canto, M. S. (2019). Anemia y desnutrición infantil en zonas rurales: Impacto de una intervención integral a nivel comunitario. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 21(3), 205-214. <https://doi.org/10.18271/ria.2019.478>
- Reyes-Aguilar, M. J., de Palomo, P., & Bressani, R. (2004). Desarrollo de un producto de panificación apto para el adulto mayor a base de harina de trigo y harina de arroz. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 54(3), 314-321.
- Rodríguez, G., Avellaneda, S., Pardo, R., Villanueva, E., & Aguirre, E. (2018). Pan de molde enriquecido con

- torta extruida de sachu inchi (*Plukenetia volubilis* L.): Química, reología, textura y aceptabilidad. *Scientia Agropecuaria*, 9(2), 199-208. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.02.04>
- Salas, J., Galán, P., Arijá, V., Marti-Henneberg, C., & Hercberg, S. (1990). Iron status and food intakes in a representative sample of children and adolescents living in a mediterranean city of Spain. *Nutrition Research*, 10(4), 379-390. [https://doi.org/10.1016/S0271-5317\(05\)80665-7](https://doi.org/10.1016/S0271-5317(05)80665-7)
- Sanz-Penella, J.M., Wronkowska, M., Soral-Smietana, M., & Haros, M. (2013). Effect of whole amaranth flour on bread properties and nutritive value. *LWT - Food Science and Technology*, 50(2), 679-685. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.07.031>
- Shin, D.-J., Kim, W., & Kim, Y. (2013). Physicochemical and sensory properties of soy bread made with germinated, steamed, and roasted soy flour. *Food Chemistry*, 141(1), 517-523. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.03.005>
- Trino, R. D., Grados Torrez, R. E., Gutierrez Duran, M. D. P., Mamani Mayta, D. D., Perez Gonzales, J., Magariños Loredo, W., Arias Miranda, J. L., & Gonzales Dávalos, E. (2017). Evaluación del aporte nutricional del amaranto (*amaranthus caudatus* linnaeus), quinua (*chenopodium quinoa* willd) y tarwi (*lupinus mutabilis* sweet) en el desayuno. *Revista CON-CIENCIA*, 5(2), 15-28.
- Tsanasidou, C., Kosma, I., Badeka, A., & Kontominas, M. (2021). Quality Parameters of Wheat Bread with the Addition of Untreated Cheese Whey. *Molecules*, 26(24), 7518. <https://doi.org/10.3390/molecules26247518>
- Vidaurre-Ruiz, J., Vargas, R. J. Y., Alcázar-Alay, S., Encina-Zelada, C. R., Cabezas, D. M., Correa, M. J., & Repo-Carrasco-Valencia, R. (2022). Andean crops: Kañiwa and tarwi flours used for the development of vegan gluten-free muffins. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(15), 7282-7292. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12094>
- Xu, X., Luo, Z., Yang, Q., Xiao, Z., & Lu, X. (2019). Effect of quinoa flour on baking performance, antioxidant properties and digestibility of wheat bread. *Food Chemistry*, 294, 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.037>
- Yeşil, S., & Levent, H. (2022). The influence of fermented buckwheat, quinoa and amaranth flour on gluten-free bread quality. *LWT*, 160, 113301. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113301>
- Yilmaz, M. T., Yildiz, Ö., Yurt, B., Toker, O. S., Karaman, S., & Baştürk, A. (2015). A mixture design study to determine interaction effects of wheat, buckwheat, and rice flours in an aqueous model system. *LWT - Food Science and Technology*, 61(2), 583-589. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.11.045>
- Zegarra, S., Muñoz, A., & Ramos-Escudero, F. (2019). Elaboración de un pan libre de gluten a base de harina de cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) y evaluación de la aceptabilidad sensorial. *Revista chilena de nutrición*, 46(5), 561-570. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182019000500561>

Compuestos orgánicos volátiles presentes en el aroma de 17 frutas exóticas en Colombia: revisión

Volatile organic compounds present in the aroma of 17 exotic fruits in Colombia: review

Daniela Andrea Aguirre-López^a  luckydani0904@gmail.com; Angela María López-Calvo^a  angela.l.c.chem@gmail.com; Sandra Milena López-Calvo^b  sanmlopezcal@unal.edu.co; Gonzalo Taborda-Ocampo^a  gtaborda@ucaldas.edu.co

^aUniversidad de Caldas. Grupo de Investigación en Cromatografía y Técnicas Afines – GICTA. Programa de Maestría en Química. Departamento de Química.

^bUniversidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. Grupo de Investigación en Modelos Estadísticos. Programa de Matemáticas.

Recibido: 14/10/2022 Aceptado: 07/12/2023

Citar, APA: Aguirre-López, D. A., López-Calvo, A. M., López-Calvo, S. M. y, Taborda-Ocampo, G. (2023). Compuestos orgánicos volátiles presentes en el aroma de 17 frutas exóticas en Colombia: revisión. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 10 (2), 117-142. <https://doi.org/10.23850/24220582.5208>

Resumen El aroma es la sensación obtenida con la activación de los receptores olfativos en la nariz humana y animal, ante la presencia de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV o en inglés VOC's) que son liberados por los organismos como producto de procesos biogénicos. Las frutas a menudo liberan compuestos orgánicos volátiles o semivolátiles que incluyen diferentes grupos funcionales y heteroátomos como el azufre y el nitrógeno, aportando notas olfativas particulares y diferenciadoras entre los diversos frutos, éste hecho, les permite realizar procesos de comunicación química o ecología química y les confiere características organolépticas útiles para establecer parámetros de calidad y de aceptación al consumidor. La metodología analítica más frecuente para el muestreo del entorno volátil de las frutas, es la Microextracción en Fase Solida (MEFS o en inglés SPME) acompañado de una Cromatografía de Gases acoplada a espectrometría de masas (CG/EM ó GC/MS en inglés), para separar e identificar compuestos. Esta revisión realiza un inventario de los compuestos orgánicos volátiles más abundantes, presentes en frutos catalogados como exóticos en etapa de maduración a punto de consumo, para establecer diferencias y similitudes a fin de considerar potenciales biomarcadores de calidad. También se pretende visualizar como han evolucionado los métodos de análisis de COV, en estos últimos 20 años. Las frutas catalogadas en este estudio como exóticas podían ser originarias de Colombia o con una alta aceptación y consumo en este país, seleccionando así a: el aguacate, el arazá, el carambolo, la chirimoya, la guanábana, la guayaba agria, la guayaba dulce, la guayaba manzana, la gulupa, el lulo, el mango, el maracuyá, el melón, la papaya, el tomate de árbol, la uchuva y el zapote. Empleamos diferentes métodos de búsqueda en frutas exóticas en redes bibliométricas, usando los siguientes descriptores: compuestos volátiles, volátiles, aroma, MEFS y CG/EM (volatile compounds, volatile, aroma, SPME y GC/MS en inglés). Los resultados de los diversos estudios analizados, registraron 194 compuestos volátiles del aroma así: aldehídos (24,2 %), alcoholes (16,5 %), ésteres (34,0 %) y otros -terpenos, cetonas, furanos, lactonas y compuestos azufrados- (25,3 %), con sus correspondientes descriptores del aroma para cada compuesto. Dado que cada compuesto puede repetirse en varias frutas, el listado final presentó 39 tipos de compuestos diferentes, a los cuales se le realizó un análisis de correspondencias múltiples (ACM), que mostró un porcentaje de variabilidad superior al 80 %; con características distintivas que relacionan a aromas agradables y desagradables (off-flavor). Los diferentes estudios de las fracciones volátiles de frutas exóticas como la carambola, la gulupa, el lulo, el mango, la papaya y la uchuva determinaron moléculas representativas mediante el ACM como: 1-octen-3-ona, 1-hexanol, 1-butanol, linalol, disulfuro de dimetilo, metional, acetato de 3-sulfanil-hexilo entre otros. Igualmente se encontró que los principales descriptores de aromas de las frutas exóticas en Colombia son: afrutado, verde, menta, dulce, floral y aromas desagradables como azufrado, sudoroso, graso, mohoso, papa cocida, rancio, cebolla o aroma a hongos. Finalmente, este estudio aporta una herramienta que contiene los COV y los descriptores de aroma de las frutas exóticas incluidas en este estudio..

Palabras clave: análisis de correspondencias múltiples, bibliometría, CG/EM, MEFS.

Abstract Aroma is the sensation obtained with the activation of olfactory receptors in the human and animal nose, in the presence of Volatile Organic Compounds (VOCs) that are released by organisms as a product of biogenic processes. Fruits often release volatile or semivolatile organic compounds that include different functional groups and heteroatoms such as sulfur and nitrogen, providing particular and differentiating olfactory notes among the different fruits. This fact allows them to carry out chemical communication processes or chemical ecology and confers them organoleptic characteristics useful to establish quality and consumer acceptance parameters. The most common analytical methodology for sampling the volatile environment of fruits is Solid Phase Microextraction (SPME) coupled with Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC/MS) to separate and identify compounds. This review makes an inventory of the most abundant volatile organic compounds present in fruits catalogued as exotic in the ripening stage at the point of consumption, to establish differences and similarities in order to consider potential biomarkers of quality. It is also intended to visualize how VOC analysis methods have evolved over the last 20 years. The fruits catalogued in this study as exotic could be native to Colombia or with a high acceptance and consumption in this country, thus selecting: avocado, arazá, carambolo, custard apple, sour sop, sour guava, sweet guava, apple guava, gulupa, lulo, mango, passion fruit, melon, papaya, tree tomato, uchuva and sapote. We employed different search methods on exotic fruits in bibliometric networks, using the following descriptors: volatile compounds, volatile, aroma, MEFS and GC/MS (volatile compounds, volatile, aroma, SPME and GC/MS). The results of the various studies analyzed recorded 194 volatile aroma compounds as follows: aldehydes (24,2 %), alcohols (16,5 %), esters (34,0 %) and others -terpenes, ketones, furans, lactones and sulfur compounds- (25,3 %), with their corresponding aroma descriptors for each compound. Since each compound can be repeated in several fruits, the final list presented 39 different types of compounds, to which a multiple correspondence analysis (MCA) was performed, showing a percentage of variability higher than 80 %; with distinctive characteristics that relate to pleasant and unpleasant aromas (off-flavor). The different studies of the volatile fractions of exotic fruits such as carambola, gulupa, lulo, mango, papaya and cape gooseberry determined representative molecules by MCA such as: 1-octen-3-one, 1-hexanol, 1-butanol, linalool, dimethyl disulfide, methional, 3-sulfanyl-hexyl acetate, among others. It was also found that the main aroma descriptors of exotic fruits in Colombia are: fruity, green, mint, sweet, floral and unpleasant aromas such as sulfur, sweaty, greasy, moldy, cooked potato, rancid, onion or mushroom aroma. Finally, this study provides a tool containing the VOCs and aroma descriptors of the exotic fruits included in this study.

Keywords: bibliometrics, GC/MS, multiple correspondence analysis, SPME.

Introducción

Los compuestos orgánicos volátiles (COV o en inglés VOCs) están presentes en sistemas biológicos y hacen referencia a moléculas de bajo peso molecular, con polaridad muy variada debido a la presencia de diferentes grupos funcionales como alcoholes, ésteres, cetonas, aldehídos y terpenos principalmente (Rivera, 2014). La mayoría de los COV están presentes en bajas proporciones, siendo suficientes para difundirse en el ambiente y llegar a sensores olfatorios tanto de animales como humanos, sitio en el cual se discriminan estos aromas característicos de cada especie o variedad (Rivera, 2014; Clark, 2017). Los COV en un organismo vegetal pueden variar de acuerdo a diferentes condiciones: variedad, región geográfica, condición climática, cosecha o a la etapa de maduración (Yang *et al.*, 2013; Pino, 2018).

Los COV en plantas son importantes ya que permiten elucidar procesos referentes al crecimiento de la planta, competencia planta-planta, co-evolución, mecanismos de defensa contra plagas - patógenos - insectos y de alimentación contra herbívoros; de igual forma se observa la importancia de los COV en los procesos de polinización (Qiao *et al.*, 2008).

En frutas los COV son sustancias liberadas en procesos bioquímicos de maduración, que incluyen procesos metabólicos e hidrólisis enzimática para consolidar el potencial del aroma. Mediante el análisis de estos compuestos se puede realizar la caracterización de variedades, calidad, estado de maduración y senescencia (Corpas-Iguarán *et al.*, 2018). No todos los COV recuperados de una muestra y presentes en un perfil cromatográfico tienen la capacidad de ser censados por los receptores olfativos de la nariz humana o de los animales, debido a la presencia de COV inodoros y COV

activos del aroma (Pino, 2012). Es importante destacar que el umbral de percepción olfativa, varía de un compuesto a otro, por lo cual puede haber compuestos volátiles en cantidades muy diluidas generando un aroma ampliamente perceptible, mientras que otros requieren mayor cantidad para ser detectados (Steinhaus *et al.*, 2008). La valoración de la actividad de olor OAV (*Odor Activity Value*) a veces llamada “unidad de olor” o “valor de olor” se usa para estimar la potencia del olor en términos de la relación entre la concentración de un compuesto volátil y su umbral de detección de olor (Beaulieu & Grimm, 2001). Por su parte, las técnicas olfatométricas son metodologías sensoriales empleadas para determinar la concentración de olor y sus descriptores. La técnica de Análisis de dilución de extracto de aroma - AEDA (*Aroma Extract Dilution Analysis*), permite la jerarquización de los odorantes y es muy empleada para el análisis sensorial descriptivo, que permite discriminar los compuestos importantes en el aroma global (Echeverría *et al.*, 2004).

El aroma es un atributo de calidad que indica la aceptación o rechazo de un producto, y por lo tanto es incluido como requisito de control en procesos de producción y distribución de alimentos (Carpenter *et al.*, 2002; Souza-Silva *et al.*, 2015). Así, las percepciones se evalúan por medio del análisis sensorial, el cual se presenta en un sensograma (Valls *et al.*, 1999). Esta percepción es basada en el estudio organoléptico del olor y aroma específicamente de las frutas (Plutowska & Wardencki, 2007; Jeleń *et al.*, 2012).

El aroma se presenta como un atributo positivo respecto a la preferencia de un producto, por ello es tan importante su caracterización como criterio de aceptación del producto (Berrocal, 2012; Ayala-Jara *et al.*, 2018). La base de la comercialización de vinos, mieles, café y frutas en general se basan en la composición de su aroma (Goff & Klee, 2006; Guillot *et al.*, 2006)

El principal método para el muestreo y obtención de COV en frutas, ha sido la microextracción en fase sólida (MEFS o SPME en inglés), por tratarse de una técnica eficiente, fácil de usar, y que ofrece mínima manipulación de muestra. Esta técnica de preparación de muestras MEFS, ha eliminado el uso de solvente, mediante el uso de un material adsorbente sólido, mejorando la extracción de la fracción volátil, para su posterior desorción térmica directamente en el cromatógrafo de gases (Arthur & Pawliszyn, 1990; Augusto *et al.*, 2000). Este método permite obtener COV, de una manera rápida y sencilla, con un gran poder de preconcentración de los analitos (Kataoka *et al.*, 2000; Japan, 2002; Pawliszyn, 2011; Bagheri *et al.*, 2014). Dado que se trata de compuestos volátiles, otra de las técnicas de análisis frecuentemente usada ha sido la cromatografía de gases con detección de espectrometría de masas (GC/MS) (Jalili *et al.*, 2020).

La olfatometría realizada con cromatografía de gases denominada GC-O, ha contribuido al conocimiento de la composición del aroma, estableciendo una correlación entre los compuestos orgánicos volátiles y el aroma que se percibe por medio del sistema sensorial olfativo. Así, el perfil aromático se encuentra correlacionado con los COV permitiendo que los estudios se enfoquen en la cromatografía de gases acoplada a la olfatometría evaluando la contribución de cada volátil en el aroma global de las muestras (Díaz-Maroto & Pérez-Coello, 2006).

Durante muchos años el análisis de COV estuvo direccionado a la determinación de perfiles cromatográficos, mostrando la diversidad molecular y su composición relativa, actualmente, la volatilómica busca comprender la biogénesis de los compuestos aromáticos, permitiendo definir además de los compuestos responsables del aroma, las rutas metabólicas de donde proceden (Baena-Pedroza *et al.*, 2020). Las frutas exóticas a menudo exhiben

compuestos orgánicos volátiles o semivolátiles que incluyen heteroátomos como el azufre, y el nitrógeno, los cuales aportan notas olfativas muy particulares y diferenciadoras que podrían ser considerados biomarcadores (Cannon & Ho, 2018), siendo a nivel nacional escasos los estudios donde se relaciona esta temática. El objetivo de la presente revisión busca consolidar una matriz de los principales COV responsables del aroma de las frutas colombianas a fin de conocer su identidad sensorial y su correlación con el desarrollo de los métodos para análisis de COV en frutas.

Materiales y métodos

Análisis bibliométrico

Se realizó una búsqueda durante los últimos 20 años en las bases de datos: *Web of Science Core Collection* (WOS) y Scopus; considerando solo aquellos papers que vincularan la temática: “análisis de compuestos orgánicos volátiles responsables del aroma y olor en frutas por cromatografía de gases y espectrometría de masas.” Se eliminó el sesgo de estudios en relación a la producción de aromas a partir de hongos y vinos.

Aunque el presente estudio bibliométrico tiene énfasis en el aroma y los COV de frutas exóticas colombianas, se presenta inicialmente la búsqueda global de la temática. La **Tabla 1**, muestra el volumen de consultas realizadas en las bases de datos de WOS y SCOPUS relacionando las publicaciones con diferentes algoritmos para el periodo comprendido entre 2000 y 2022.

La búsqueda se refinó con el siguiente algoritmo:

Fórmula general: (*chromatography OR GC OR GC/MS OR GC-MS OR GCMS OR Gas Chromatography*) AND (*odor*) AND ((*fruits OR juice*) AND NOT (*wine OR fungi OR mushroom*)) AND (*volatile organic compound OR VOC OR VOCs*) AND (*aroma*).

Se desarrolló un Análisis de Acoplamiento siguiendo la metodología propuesta por Ávila

– Toscano *et al.* (2014) y Van Eck & Waltman, (2028), empleando el software VOSviewer.

Tabla 1

Total de artículos hallados y revisados en las bases de datos Web of Science y Scopus

Algoritmo de búsqueda	Resultados de las bases de datos	
	Web of Science	Scopus
Volatile Organic Compounds AND fruit	1165	3274
Volatile Organic Compounds AND fruit AND gas chromatography	345	1311
Fruit AND aroma	4251	6360
Volatile Organic Compounds AND fruit AND gas chromatography AND aroma	164	603

Análisis estadístico

Empleando el software R (Team & R Development Core Team, 2016), se evaluaron los resultados de los compuestos orgánicos volátiles responsables del aroma de frutas mediante un análisis de correspondencias múltiples (ACM), para explorar y comprender las relaciones entre las características en las diversas dimensiones, en este caso: moléculas, grupos funcionales, frutas exóticas en Colombia y aromas reportados por medio de diferentes librerías y paquetes estadísticos ya establecidos (Kassambara & Mundt, 2017; Le *et al.*, 2008), para identificar patrones de asociación de los artículos seleccionados.

Resultados y discusión

Análisis bibliométrico

Las búsquedas preliminares con los descriptores [Fruta + Aroma] y [Compuestos orgánicos volátiles + Frutas], mostraron mayor número de artículos, posteriormente al incluir el descriptor

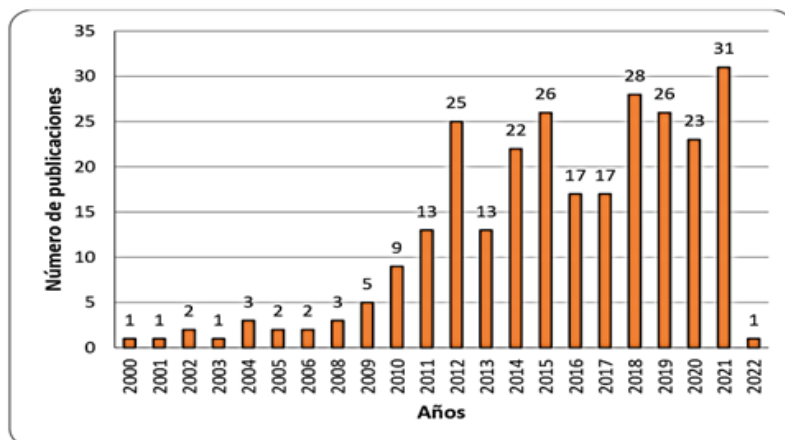
[cromatografía de gases], disminuyeron ostensiblemente.

Empleando la **Formula general** refinada, se observó que: en Scopus se encontraron 272 documentos, de los cuales 265 correspondieron a artículos científicos, 3 a revisiones y 4 a ponencias. Revisando cada uno de los artículos se encontró que sólo 154 correspondían al propósito del estudio.

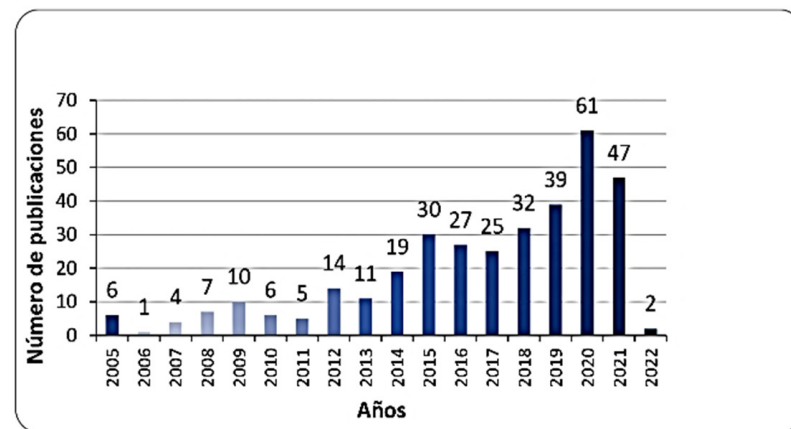
En la Web of Science se encontraron 346 documentos con la misma fórmula de búsqueda de los cuales 334 correspondieron a artículos científicos, 9 a revisiones y 3 a ponencias. Revisando cada uno de los artículos se encontró que sólo 48 se ajustaban al propósito del estudio. La **Figura 1**, muestra el número de publicaciones por año en Wos y Scopus en la temática de estudio. Las publicaciones de este período han mostrado un incremento a medida que pasan los años, donde el 76,4 % correspondió a las publicaciones generadas desde el 2015 hasta el 2021 en la Web of Science, y el 89,3 % se adjudicó a las publicaciones producidas desde el 2011 hasta el 2021 en Scopus.

Figura 1

Número de publicaciones por año a) Scopus y b) Web Of Science



a)



b)

Red bibliométrica

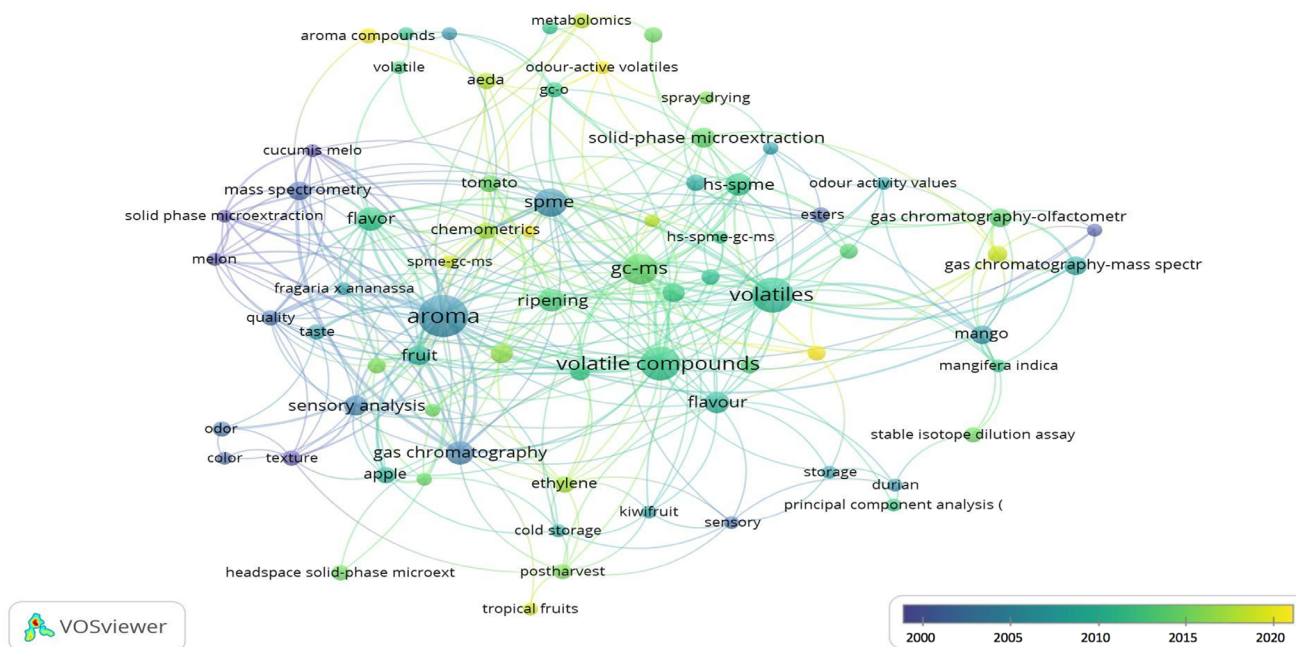
El resultado de la búsqueda analizando los 17,473 artículos en relación a la temática de COV se reflejan en el diagrama de redes bibliométricas, propuesto por Perianes-Rodríguez *et al.* (2016), sobre la comparación entre el conteo completo y fraccionado en la construcción de redes, visualizando las interacciones de acoplamiento bibliográfico y redes de co-citas, de los artículos científicos revisados. los artículos científicos. La **Figura 2** evidencia un análisis de redes de acoplamiento de la búsqueda realizada, mediante el uso del software VOSviewer según la metodología propuesta por Ávila-Toscano *et*

al. (2014) y van Eck & Waltman, (2018), siendo notoria la gran convergencia en palabras clave como: aroma, compuestos orgánicos volátiles y GC- EM, luego, en segundo orden se entrelazan las palabras clave como: análisis sensorial, MEFS, GC y compuestos volátiles activos del aroma.

Los aumentos de tamaño de las esferas en la **Figura 2**, indican mayor convergencia en la temática estudiada, por parte de los autores revisados. El color de las esferas está relacionado con el año de publicación, siendo el azul cercano al 2000 y el amarillo al 2020.

Figura 2

Visualización de palabras claves que reportan estudios en frutas de una red acoplada a citas - VOSviewer



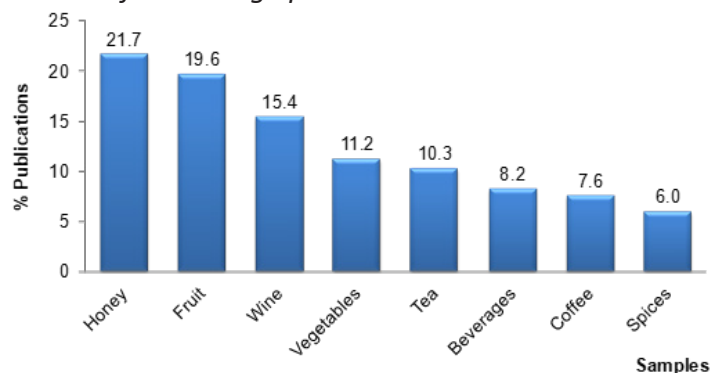
Compuestos orgánicos volátiles - COV responsables del aroma

Los compuestos volátiles exhiben diversidad de aromas relacionados con las características que definen a los alimentos. En las plantas se ha reconocido la liberación de estas moléculas en gran parte por medio de las flores y frutos (Baraldi *et al.*, 1999), lo que permite reconocer interacciones que relacionan las funciones

fisiológicas con el ambiente (Dudareva *et al.*, 2013; Muhlemann *et al.*, 2014). Analizando la **Figura 3**, se evidencia el porcentaje de publicaciones de alimentos en relación a estudios de aromas. Observándose que para el periodo comprendido entre 2000 y 2020, el 19,6 % correspondió a búsqueda de artículos relacionados con el análisis del aroma en las frutas.

Figura 3

Análisis aroma de diversos alimentos en la búsqueda de Web of Knowledge para los años 2000 – 2020



Métodos de extracción de COV:

De acuerdo con los artículos estudiados y sistematizados en la **Tabla 2**, se encontró que los métodos empleados para la extracción de Compuestos Orgánicos Volátiles de frutas han sido principalmente:

a. La Extracción líquido – líquido (ELL) apoyada con el uso de solventes orgánicos como el pentano, diclorometano, clorometano, ciclohexanona y mezclas de ellos, considerándose eficiente en la obtención de COV de naturaleza no polar.

b. La técnica tradicional de análisis de dilución del extracto de aroma en agua destilada (ADEA) conocida por su sigla en inglés AEDA (Aroma Extract Dilution Assay), permite el análisis de los COV por su transferencia a la fracción volátil, que a menudo se ve favorecida por la adición de sales para aumentar la polaridad y propiciar el escape de los COV de la fase líquida, a este efecto se le denomina “*salting out*”.

c. Destilación por arrastre de vapor, es una técnica viable para la obtención de esencias o aceites esenciales que agrupan compuestos responsables del aroma que co-destilan con el agua a la temperatura de ebullición de esta. La gran mayoría de estos compuestos son de naturaleza terpénica.

d. La destilación – extracción del flavor asistida con solvente (DEAS) conocida como SAFE por sus siglas en inglés (Solvent Assisted Flavour Evaporation), permite la pre-concentración de los COV, aumentando su límite de detección.

e. Extracción Destilación Simultánea - EDS (Steam Distillation Extraction - SDE en inglés), es una variación de la SAFE y está basada en la

metodología Likens y Nickerson (1964). Una alternativa metodológica reportada en esta revisión es el uso de la EDS a presión reducida, la cual, permite separar y concentrar sustancias volátiles de una muestra en una etapa y mínima manipulación, evitando pérdidas de los analitos.

f. Microextracción en fase sólida (MEFS) Esta técnica es la más usada en el análisis de COV, debido a su fácil manejo, al garantizar menor tiempo de análisis, mínima manipulación de muestra, técnica amigable con el medio ambiente y eficaz en la extracción de compuestos volátiles y semivolátiles, entre otras ventajas (Júnior & Soares, 2014; Pena-Pereira, 2014). Este método además de la reducción del uso de solvente, ha permitido, aumentar la sensibilidad y la selectividad (Borges *et al.*, 2015; Quintana *et al.*, 2014), dado que permite la concentración de muestras muy diluidas o en contenido traza, para un análisis confiable y preciso (De La Guardia, 1999; Kataoka, 2011; Winefordner, 2011). La MEFS emplea una fase sólida en forma de fibra, con adsorbentes químicos que de manera selectiva rescatan COV del espacio de cabeza EC (*head space* – HS en inglés) o del líquido por inmersión en el que están contenidos, de acuerdo con su polaridad. Los principales materiales de las fibras de MEFS reportadas en la revisión fueron; DVB: divinil benceno; CAR: carboxeno; PDMS: polidimetil siloxano; PA: poliacrilato. La fibra más usada es la fibra gris caracterizada por la presencia de tres compuestos adsorbentes (DVD, CAR y PDMS), que garantiza mayor número de COV rescatados (Soursop *et al.*, 2011; Jimenez *et al.*, 2011; Cardozo *et al.*, 2013; Corpas *et al.*, 2016).

Métodos de análisis cromatográfico de COV:

Sin lugar a dudas la técnica más empleada para el análisis de COV, es la Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas – CG/EM, frecuentemente citada por sus siglas en inglés como GC/MS ó HRCG/MS (high resolution – HR es decir, alta resolución). Diferente sucede

con los métodos de preparación de muestras volátiles y semivolátiles de frutas, realizados esencialmente por medio de la Microextracción en Fase Sólida y Cromatografía de Gases acoplado a Espectrometría de Masas –SPME-GC/MS– (Lasekan & Abbas, 2012).

Nuestra revisión muestra estudios que comparan la cromatografía de gases con sus diferentes detectores como: **a.** Cromatografía de gases de alta resolución con detector de Infrarrojo con Transformada de Fourier cuyas siglas en inglés son: HRGC-FTIR (high resolution gas chromatography with Fourier Transform Infrared detector); **b.** cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC-FID: gas chromatography with flame ionization detector); **c.** Cromatografía de gases con detector de conductividad térmica (GC-TCD: Gas chromatography with thermal conductivity detector); **d.** detector de resonancia magnética nuclear RMN o en inglés NMR (nuclear magnetic resonance detector) y **e.** Cromatografía de gases con detector de espectrometría de masas CG/EM (Werkhoff *et al.*, 1998). También se reportó el uso de Espectrometría de Masas en Tándem que se simboliza por MS/MS, indicando que se tiene más de un detector de espectrometría de masas, con el propósito de optimizar el proceso de identificación de los COV y la Cromatografía de Gases Bidimensional (GCxGC) que emplea 2 columnas en continuo, para optimizar la separación (Sinuco *et al.*, 2010).

Métodos de análisis cromatográfico acoplado a olfatometría GC-O:

En el perfil aromático generalmente se describe la presencia de compuestos como: aminoácidos y grasas, ácidos carboxílicos, alcoholes, compuestos carbonílicos, lactonas o durante la maduración de la fruta terpenos, ésteres y éteres los cuales componen al aroma característico de cada fruta (González *et al.*, 2000). La cromatografía de gases acoplada a

olfatometría (GC-O), consiste, en separar las moléculas, identificarlas (mediante el detector de masas) y describir el aroma correspondiente (mediante un catador o panel sensorial), es decir que a la columna se le adapta un divisor de flujo, para llevar una línea al detector y la otra a la nariz del catador, a esta última se le denomina puerto “sniffing” (Díaz-Maroto & Pérez-Coello, 2006). En la revisión que realizamos se observó, una apuesta alta a esta técnica que vincula no solamente la capacidad de separación del cromatógrafo de gases y su poder de identificación por el espectrómetro de masas, sino también la capacidad sensorial de un panel para identificar los umbrales y de esta manera caracterizar el aroma. En complemento, algunos autores recomiendan reportar el pH y los grados Brix de las frutas que se analizan, así como la valoración de la actividad del olor (OAV).

De esta manera, sobre la base de la literatura revisada, siempre se recomienda respecto a la caracterización de los COV y el aroma de las frutas exóticas de alto consumo en Colombia, el método de la microextracción en fase sólida del espacio de cabeza en asocio con la Cromatografía de gases y espectrometría de masas con olfatómetro EC/MEFS-CG/EM-O (mejor conocida en inglés como HS-SPME-GC-O-MS: *head space solid phase microextraction and gas chromatography - mass spectrometry with olfactometry*). Dejando claro que actualmente hay una tendencia al uso de sensores tipo nariz electrónica entrenados, que continúan en etapa de prueba para efectos de detección en campo de COV con dispositivos sencillos de fácil manejo, económicos y sensibles.

Seguidamente en la **Tabla 2** se presentan de manera específica para cada fruta exótica de un total de 17 frutas consideradas, los métodos de extracción y sus condiciones, los métodos de análisis cromatográfico y el tipo de fibra empleados.

Tabla 2

Métodos de extracción y análisis de compuestos orgánicos volátiles en frutas colombianas

Fruta	Extracción	Análisis	Tipo fibra	Referencia
Aguacate (<i>Persea americana</i> Mill., cv. Hass)	Espacio de cabeza estático (HS) – SPME a 40 °C a baño maría por 30 min	HS-SPME / GC-FID	CAR /PDMS	(Obenland <i>et al.</i> , 2012)
Arazá (<i>Eugenia stipitata</i> McVaugh)	1 kg de pulpa se diluyó en una 1L agua destilada y centrifugó a 10 000 rpm durante 20 min.	GC-FID / GC-MS		(Pino & Quijano, 2007)
Chirimoya cimarrona (<i>Annona chrysophylla</i> Boj.)	Extracción líquido-líquido (ELL) con destilación a alto vacío con pentano-diclorometano (2:1) HS-SPME: 2 g a 30 °C con agitación 800 rpm	HRGC-FTIR / GC-FID / GC-MS / GC-O	DVB/ CAR/PDMS	(Baena-Pedroza <i>et al.</i> , 2020)
Carambolo (<i>Averrhoa carambola</i> L.)	Se homogeneizó 5 g de fruta con NaCl al 30 % (p/p), en un baño de agua a 40 °C (15: 45 min)	HS-SPME / GC-MS / GC-O	DVB /CAR/PDMS	(Mahattanatawee <i>et al.</i> , 2005)
Guanabana (<i>Annona muricata</i> L. cv. Elita)	30 g de pulpa fue homogenizada por 5 min; se extrajo en un frasco de 110 mL a 20 °C.	HS-SPME / GC-MS	DVB/CAR/PDMS	(Soursop <i>et al.</i> , 2011)
Guanabana (<i>Annona muricata</i> L. cv. Elita)	30 g de pulpa se homogeneizó en un frasco de 110 mL a 20 °C con LOD 1 ppm.	HS-SPME / GC-MS / nariz electrónica (NE)	DVB/CAR/PDMS	(Cardozo <i>et al.</i> , 2013)
Guanabana (<i>Annona muricata</i> L. cv. Elita)	350 g pulpa con 100 mL de agua, por 1,5 h con 10 mL de 2-metilbutano y se concentró a 0,5 mL por destilación a baja temperatura y alto vacío.	GC-FID / GC-MS / Panel		(MacLeod & Pieris, 1981)
Gulupa (<i>Passiflora edulis</i> f. <i>edulis</i>)	10 g de pulpa en un vial de 20 mL a 40 °C	HS-SPME / GC-MS / HPLC-MS	DVB/CAR/PDMS	(Jiménez <i>et al.</i> , 2011)
Gulupa (<i>Passiflora edulis</i> f. <i>edulis</i>)	100 g de fruta homogénea con 300 mL diclorometano en un baño de hielo con agitación y Na ₂ SO ₄ , la fase orgánica se sometió a destilación SAFE y se concentró a 1 mL	HS-SPME / GC-FID / GC-MS / GC-O / OAV		(Conde-Martínez <i>et al.</i> , 2013)
Guayaba-manzana (<i>Psidium guajava</i> L., <i>Psidium cattleianum</i>)	5 g en una licuadora en un vial de 10 mL a 40 °C por 15 min	HS-SPME / GC-MS		(Paniandy <i>et al.</i> , 2000)
Guayaba rosa (<i>Psidium guajava</i> , L.)	Destilación de alto vacío: COV > 250 ug/kg a 1250 ug/kg	ELL / GC-MS		(Idstein & Schreier, 1985)
Guayaba rosa (<i>Psidium guajava</i> , L.)	Aplicación de AEDA /destilación con SAFE	AEDA / GC-FID / GC-O/GC-MS/HPLC		(Ávila-Toscano <i>et al.</i> , 2014) (Steinhaus <i>et al.</i> , 2009)
Guayaba rosa (<i>Psidium guajava</i> , L.)	120 g de muestra con ciclohexanona/cloruro de metileno agitando 1 h y centrifugando 5000 rpm, junto con destilación-rectificación con flujo de nitrógeno.	ELL / HS-SPME / GC-MS		(Dembitsky <i>et al.</i> , 2011; Jordán <i>et al.</i> , 2003)
Guayaba rosa (<i>Psidium guajava</i> , L.)	OAV: material no volátil se eliminó por destilación por SAFE.	GC-GC-MS	DVB/CAR/PDMS -CAR/PDMS - PDMS - PA	(Sinuco <i>et al.</i> , 2010)
Guayaba rosa (<i>Psidium guajava</i> , L.)		HS-SPME / GC-MS		(Carasek & Pawliszyn, 2006)
Guayaba agria (<i>Psidium friedrichsthalianum</i> Nied.)	330 g de fruta homogénea con 150 mL diclorometano en un baño de hielo con agitación y Na ₂ SO ₄ , la fase orgánica se sometió a destilación con SAFE y se concentró a 1 mL	HS-SPME / GC-FID / GC-MS / GC-O / OAV		(Cuadrado-Silva <i>et al.</i> , 2017)
Lulo o Naranjilla (<i>Solanum quitoense</i> Lam.)	HS-SPME 10 g de la pulpa a un vial de 20 mL de capacidad, baño maría a 40 o 60 °C, por 30 min.	SDE/GC-MS y HS-SPME/GC-MS	PDMS, CAR/PDMS, PDMS/DVB y DVB/ CAR/PDMS	(Corpas <i>et al.</i> , 2016)
Lulo o Naranjilla (<i>Solanum quitoense</i> Lam.)	10 g de pulpa con 1 g NaCl en un vial de 20 mL, se sometió a baño maría 60 °C y se extrajo por 30 min.	HS-SPME / GC-MS	CAR / PDMS	(Forero <i>et al.</i> , 2015)

Fruta	Extracción	Análisis	Tipo fibra	Referencia
Lulo o Naranjilla (<i>Solanum quitoense</i> Lam.)	700 g de pulpa a pH = 3,45 y Brix de 8,9 %; extracción de VOCs por 1 h por destilación con arrastre de vapor de agua y extracción con solvente orgánico. Los VOCs llevados a sequedad con Na ₂ SO ₄ y concentrados a 0.2 mL	GC-FID / GC-MS / GC-O		(Silva <i>et al.</i> , 2010)
Lulo o Naranjilla (<i>Solanum quitoense</i> Lam.)	250 g pulpa con extracción con disolvente diclorometano-éter etílico (7:3) y con SAFE se concentró a 1 mL.	HS-SPME / GC-FID / GC-MS / GC-O / OAV		(Qiao <i>et al.</i> , 2008)
Lulo o Naranjilla (<i>Solanum quitoense</i> Lam.)	Fruta madura (pH= 3,5 y °Brix = 8,9). La pulpa a pH natural. La cáscara con pentano-éter etílico (1:1) y pH 7,0 por extracción L-L con pentano diclorometano (2:1) después por destilación por arrastre con vapor y por SDE con solvente orgánico.	HRGC / HRGC-MS		(Duque-Beltrán & Morales-Pérez, 2005)
Maracuyá (<i>Passiflora edulis</i> f. <i>flavicarp</i>)	ELL con SDE en el espacio de cabeza (HS); con extracción a presión atmosférica (SDE) y a presión reducida (SDEV).	GC-MS / IR / NMR		(Werkhoff <i>et al.</i> , 1998)
Maracuyá (<i>Passiflora edulis</i> f. <i>flavicarp</i>)		HS-SPME / GC-MS	DVB/CAR/PDMS -CAR/PDMS - PDMS - PA	(Carasek & Pawliszyn, 2006)
Melón cantalupo (<i>Cucumis melo</i> var. <i>reticulatus</i> cv. Sol Real)	HS-SPME.	GC-MS	PDMS	(Perianes-Rodríguez <i>et al.</i> , 2016)
Melón de olor (<i>Sicana odorifera</i>)	El extracto de la pulpa homogéneo y con 200 mL pentano-diclorometano (2:1) para ELL.	HRGC / HRGC-O / HRGC-MS		(Duque-Beltrán & Morales-Pérez, 2005)
Mango (<i>Mangifera indica</i> L.)	Dilución con agua destilada (1:1), centrifugó por 15 minutos, se filtró y se trató durante 90 min a 25 °C.	GC-MS		(Sakho <i>et al.</i> , 1997)
Mango (<i>Mangifera indica</i> L.)	HS-SPME / ELL (metanol, agua, acetona y hexano).	HPLC / GC-MS		(Jordán <i>et al.</i> , 2003)
Mango (<i>Mangifera indica</i> L.)	SDE.	GC-FID / GC-MS		(Quijano <i>et al.</i> , 2007)
Mango (<i>Mangifera indica</i> L.)	SDE-ELL / panel de cata.	OAV / GC-MS		(Pino & Mesa, 2006)
Mango (<i>Mangifera indica</i> L.)	5 g de fruta con NaCl al 30 % (p/p), en un baño de agua a 40 °C (15:45 min).	HS-SPME / GC-MS / GC-O	DVB/CAR/ PDMS	(Mahattanatawee <i>et al.</i> , 2005)
Uchuva (<i>Physalis peruviana</i>)	Una solución de MetOH/EtOH y se neutralizó con NaHCO ₃ , se extrajo con pentano/cloruro de metileno; con SDE y por cromatografía fraccionada.	ELL / HPLC / GC-FID / GC-MS		(Berger <i>et al.</i> , 1989)
Uchuva (<i>Physalis peruviana</i>)	Se homogeneizó en solución acuosa con pH 7 y centrifugó por 30 min, para la separación	HRGC / HRGC-MS / ESI-MS / MS		(Mayorga <i>et al.</i> , 2001)
Uchuva (<i>Physalis peruviana</i>)	La fruta se licuó y centrifugo a 9000 rpm, 4 °C, 30 min, el extracto por ELL con pentano: diclorometano 2:1, por 48 h.	HRGC/MS		(Duque-Beltrán & Morales-Pérez, 2005)
Uchuva (<i>Physalis peruviana</i>)	Extracción en frío, para destilar en baño de hielo, posterior se agito a 750 rpm por 30 min con atm N ₂ (g). Se centrifugo por 15 min; la fase orgánica se destilo/filtro con pre-concentración.	ELL-OAV / GC-FID / GC-MS / HRGC-MS		54,05 ± 0,01a 54,05 ± 0,01a
Uchuva (<i>Physalis peruviana</i>)	Extracción LL-SAFE para 300 g pulpa se centrifugo con 200 mL pentano-diclorometano por 24 h y con Na ₂ SO ₄ y concentrando a 0.2 mL.	LL-SAFE / HS-SPME / GC-FID / GC-MS / GC-O / OAV	DVB/CAR/ PDMS	(Gutiérrez <i>et al.</i> , 2010)
Papaya / Papayuela (<i>Carica pubescens</i>)	50 g de fruta con extracción por microdestilación con vapor por 1 h con 2 mL de CH ₂ Cl ₂ , se secó sobre Na ₂ SO ₄ y concentró a 0.1 mL	GC-FID / GC-MS		(Morales & Duque, 1987)

Fruta	Extracción	Análisis	Tipo fibra	Referencia
Papaya / Papayuela (<i>Carica pubescens</i>)	Fruta madura con pH entre 3,9 – 4,1 y 15° Brix. El extracto del aroma se obtuvo por destilación a presión reducida en atmósfera de N ₂ (g), Espacio de cabeza dinámico y adsorción sobre polímeros porosos y SDE con CH ₂ CL ₂ .	HRGC-MS en modo: Ionización electrónica y química		(Duque-Beltrán & Morales-Pérez, 2005)
Papaya / Papayuela (<i>Carica pubescens</i>)	200 g pulpa con 800 mL de agua, a pH 7,0 se destiló y se extrajo por 90 min con 25 mL de éter dietílico, se secó con Na ₂ SO ₄ y concentró a 40°C hasta 0.6 mL	GC-FID / GC-TCD / GC-MS		(Pino <i>et al.</i> , 2003)
Tomate de árbol (<i>Solanum betaceum</i> Cav.)	Fruta madura, a pH de 3,5 y 11,5° Brix. Técnicas de extracción LL: con pentano-diclorometano (2:1) y por Destilación con arrastre con vapor-SDE y extracción con CO, supercrítico (SFE) y SDEV	SDE – ELL / HRGC / HRGC/MS		(Duque Beltrán & Morales Pérez, 2005)
Tomate de árbol (<i>Solanum betaceum</i> Cav.)	492 g pulpa con 100 mL de diclorometano en baño de hielo con agitación se añadió sulfato de sodio se filtró y SAFE con sulfato anhidro y concentró a 1 mL.	HS-SPME / GC-FID / GC-MS / GC-O / OAV		(García, Prieto <i>et al.</i> , 2016)
Zapote (<i>Quararibea cordata</i> Vischer)	983 g de pulpa con 400 mL agua, se extrajo por 3 h con la metodología Likens y Nickerson (1964) con 2-metilbutano.	GC-MS		(Carvalho <i>et al.</i> , 2012; MacLeod & de Troconis, 1982)

Nota. ELL: Extracción Líquido – Líquido; LOD: Límite de Detección; OAV: Valoración de la actividad de olor; SAFE: evaporación asistida con solvente; AEDA: análisis de dilución de extracto de aroma; SDE: Extracción destilación simultánea; SDEV: Extracción destilación simultánea a presión reducida; SFE: Extracción por fluidos supercríticos; HS: Espacio de cabeza; SPME: microextracción en fase sólida; HRGC-FTIR: Cromatografía de gases de alta resolución con detector de Infrarrojo con Transformada de Fourier; GC-FID: cromatografía de gases con detector de ionización de llama; GC-MS: Cromatografía de gases con detector de espectrometría de masas; GC-TDC: Cromatografía de gases con detector de conductividad térmica; IR: detector de infrarrojo; NMR: detector de resonancia magnética nuclear; GC-O: Olfatometría acoplado a cromatografía de gases; ESI: Ionización por aspersión electrónica; MS/MS: Espectrometría de masas en tándem; GC-GC: Cromatografía de gases bidimensional (con 2 columnas); NE: nariz electrónica; HPLC: Cromatografía líquida de alta eficiencia; DVB: Fibra de divinil benceno; CAR: Fibra de Carboxeno; PDMS: fibra de polidimetil siloxano; PA: Fibra de poliacrílico.

Compuestos responsables del aroma de frutas exóticas colombianas

Esta revisión contemplo el estudio de 17 frutas catalogadas como exóticas, las cuales eran originarias de Colombia o que a su vez presentaban alta aceptación y consumo en este y otros países, destacándose a: el aguacate, el arazá, el carambolo, la chirimoya, la guanabana, la guayaba agria, la guayaba dulce, la guayaba manzana, la gulupa, el lulo, el mango, el maracuyá, el melón, la papaya, el tomate de árbol, la uchuva y el zapote.

El perfil aromático es un indicador de la calidad de las frutas y actualmente los análisis y metodologías químicas además de medir propiedades como la textura, el olor y el sabor, destacan numerosos COV, cuya mezcla compleja

define sus atributos sensoriales.(Moya & Angulo, 2001). Dicha mezcla incluye compuestos como: alcoholes, ésteres, aldehídos, cetonas, ácidos, furanos y terpenos que contribuyen al aroma (Gómez *et al.*, 2016). De acuerdo con esto, en la presente revisión se encontró además de las familias de compuestos volátiles ya mencionados y otros como: las lactonas y compuestos azufrados.

Con la presente revisión se generó una matriz que recopiló los diferentes compuestos orgánicos volátiles presentes en las 17 frutas exóticas de interés, indicando, su familia química y los descriptores de aroma reportados por los diferentes referentes y complementados por la base de datos Flavornet. Esta matriz forma parte del material suplementario (Apéndice) del presente manuscrito.

Análisis global de los resultados obtenidos en la compilación de COV presentes en frutas exóticas y sus correspondientes aromas

De las 17 frutas consideradas en esta revisión, se registraron 194 compuestos, de los cuales, los aldehídos, los alcoholes y los ésteres fueron los más abundantes con porcentajes iguales a 24,2 %, 16,5 % y 34,0 % respectivamente, lo que correspondió a un 74,5 % del total de compuestos orgánicos volátiles presentes en los frutos del estudio. El 25,3 % se relacionó principalmente a terpenos, cetonas, furanos, lactonas y compuestos azufrados. Las frutas que presentaron mayor número de COV (cercano a 20 compuestos) incluyeron a: la guayaba dulce, el lulo, la papaya y la uchuva, seguidas de la gulupa y el mango con aproximadamente 15 compuestos. Con 10 COV reportados, se encontró el aguacate, el arazá, la guanábana, la guayaba agria, el maracuyá, el tomate de árbol y el zapote. Finalmente, las frutas que presentaron menos compuestos volátiles (por debajo de 7 compuestos), fueron: el carambolo, la guayaba manzana, la chirimoya y el melón.

Con relación al tipo de familia de compuestos que predominó, se encontró que el aguacate, la guayaba dulce, el lulo y la uchuva tienen alto contenido de aldehídos (6, 7, 5 y 5 respectivamente), los demás frutos presentaban menos de tres aldehídos. Cabe resaltar que el

arazá, el carambolo, la chirimoya y el melón no presentaron aldehídos. Por su parte la guayaba dulce, el lulo, la papaya y la uchuva presentaron mayor contenido de ésteres (alrededor de 7 compuestos), los frutos restantes, presentaron menos de 5 compuestos. Las frutas que mostraron mayor contenido de alcoholes incluyeron a la papaya y la uchuva con 6 y 4 compuestos respectivamente, las demás frutas presentaron menos de 3 compuestos, excepto el carambolo y la gulupa que carecían de alcoholes.

La **Tabla 3**, muestra la relación de familias de compuestos orgánicos volátiles presentes en frutas exóticas. En la **Figura 4** se observa la correlación entre las 17 frutas y los COV reportados por los autores asociados a los artículos de esta revisión, resaltando 4 categorías representadas por círculos de 4 colores diferentes, donde se agruparon los compuestos volátiles y las frutas afines. Se ve una fuerte correlación entre el aguacate, la uchuva, la papaya, el maracuyá y el zapote, con los alcoholes y ésteres (categoría verde); la guayaba agria, la guayaba manzana, la guayaba dulce, el tomate de árbol, la chirimoya y la guanábana se correlacionaron principalmente con aldehídos y ésteres (categoría violeta). Por último, el arazá, el melón y el mango se correlacionaron con menor intensidad con las lactonas y los ésteres (categoría naranja); finalmente el carambolo y la gulupa arrojaron baja correlación (categoría azul).

Tabla 3

Métodos de extracción y análisis de compuestos orgánicos volátiles en frutas colombianas

Fruta	Aldehídos	Alcoholes	Ésteres	Cetonas	Terpenos	Lactonas	Azufrados	Ácidos	Furanos	Total	Porcentaje
1 Aguacate	6	1	1		1					9	4,6
2 Arazá		2	5			1				8	4,1
3 Carambolo			3	1	2	1				7	3,6
4 Chirimoya		1	2		1					4	2,1
5 Guanábana	3	2	5		1			1		12	6,2
6 Guayaba agria	2	1	2		1		3			9	4,6
7 Guayaba dulce	7	3	6		1		1		2	20	10,3
8 Guayaba manzana	3	1	2							6	3,1
9 Gulupa	2		4	2	2		2	2	1	15	7,7
10 Lulo	5	2	7		1		1	2	1	19	9,8
11 Mango	3	2	3	1	2	2			1	14	7,2
12 Maracuyá	2	2	4		2					10	5,2
13 Melón		1	1							2	1,0
14 Papaya	3	6	7	1	2			1		20	10,3
15 Tomate de árbol	3	2	4							9	4,6
16 Uchuva	5	4	7	1	1	1			2	21	10,8
17 Zapote	3	2	3				1			9	4,6
total	47	32	66	6	17	5	8	6	7	194	100,0
Porcentaje	24,2	16,5	34,0	3,1	8,8	2,6	4,1	3,1	3,6	100,0	

Los principales alcoholes producto de la revisión asociados a las frutas exóticas y sus descriptores de aroma fueron: el 1-hexanol (resina, flor, herbal), el (Z)-3-hexenol (herbal), el 3-metil-1-butanol (afrutado), el 1-butanol (alcohol), el 2-fenil etanol (rosa, miel) y el alcohol bencílico (dulce, floral, afrutado). El hexanol resultó ser un compuesto muy frecuente en las 14 frutas analizadas (de un total de 17) excepto en la gulupa, el carambolo y el melón. Por su parte, el (Z)-3-hexenol fue reportado únicamente en: el arazá, la guanábana, la guayaba dulce, el lulo, el mango, el maracuyá, la papaya y el tomate de árbol. El 3-metil-1-butanol fue encontrado en la guayaba dulce y en la papaya. Por último, el 1-butanol, el 2-fenil-etanol, el alcohol bencílico estuvieron presentes en la papaya y la uchuva.

Los aldehídos presentes en las frutas reportadas con sus descriptores fueron: el acetaldehído (solvente, acre), el benzaldehído (almendra, cereza), el furfural (dulce, amaderado), el hexanal (verde, fresco), el nonanal (graso, cítrico, floral), el (E)-2-hexenal (verde, afrutado), el (Z)-3-hexenal (verde) y (E)-2-pentenal (fresa). Siendo el aguacate, la guayaba dulce y la uchuva, las frutas que presentaron mayor número de aldehídos. Los ésteres encontrados en las frutas estudiadas con sus descriptores correspondieron a: el acetato de hexilo (afrutado), el butanoato de metilo (afrutado), el butanoato de etilo (afrutado), el 3-hidroxibutanoato de etilo (verde, floral), el hexanoato de metilo (afrutado, piña y dulce), el hexanoato de etilo (afrutado, piña), el octanoato de etilo (coco), el benzoato de metilo (caramelo, dulce), el benzoato de etilo (caramelo, floral, miel) y el cinamato de etilo (floral). La distribución de los aldehídos y ésteres en las diferentes frutas es variable, lo que contribuye a consolidar la identidad del aroma de cada fruta.

Respecto a los compuestos orgánicos volátiles minoritarios encontramos: las

cetonas, las lactonas, los ácidos, los furanos, los compuestos azufrados y los terpenos, los cuales pueden contribuir significativamente con el aroma de las frutas por estar presentes de manera diferencial en algunas de ellas. La cetona representativa del carambolo, la gulupa, el mango, la papaya y la uchuva, fue la 1-octen-3-ona, que confiere aroma a hongo. Por otra parte, las lactonas, incluyeron la δ -decalactona (en el arazá, carambolo y el mango) y la γ -octalactona (en el mango y la uchuva), que le confieren descriptores de aroma a coco, dulce y afrutado.

En cuanto a los ácidos carboxílicos con mayor reporte se destacan: el ácido acético y el ácido butírico, que se relacionan con descriptores de olor a rancio, vinagre y ácido y fueron encontrados en la guanabana, la gulupa, el lulo y la papaya. En cuanto a los furanos, responsables de los aromas a caramelo y dulce se destacaron: la 4-hidroxi-2,5-dimetil-3 (2H)-furanona (en guayaba dulce, gulupa y lulo) y la 4-metoxi-2,5-dimetil-3 (2H)-furanona (en la guayaba dulce, el mango y la uchuva). Los compuestos azufrados encontrados correspondieron a: el acetato de 3-sulfanil hexilo (en la guayaba agria, la gulupa y el lulo), que describe olor a sulfuro y a sudor; el disulfuro de dimetilo (en la guayaba agria y el zapote), que describe olor a cebolla y el metional (en la guayaba agria, la guayaba dulce y la gulupa) que describe olor a papa cocida.

Finalmente, los principales terpenos reportados fueron: el limoneno (en el aguacate, el lulo, la papaya y el maracuya), que describe aroma cítrico; el edulan 1 (en el mango y el carambolo), que propicia el aroma a menta y a verde; la β -ionona (en el carambolo, la gulupa y la uchuva), característico del aroma dulce floral; no menos importante se reportó la presencia del linalool el cual incide en el aroma floral y cítrico de frutos como: (la chirimoya, la guanabana, la guayaba agria, la guayaba dulce, la gulupa, el mango, el maracuya y la papaya).

Análisis de Correspondencias Múltiples (ACM)

El análisis de correspondencias múltiples realizado a los datos recopilados en la matriz dispuesta en el **Apéndice** de la presente investigación, incluyó los diferentes compuestos orgánicos volátiles presentes en las 17 frutas exóticas, así como la familia química y los descriptores de su aroma. Este análisis, se enfocó en encontrar relaciones entre múltiples variables y datos nominales, es decir, datos de escalas no numéricas.

La correlación de las características: (moléculas, grupos funcionales, frutas exóticas en Colombia y aromas), estableció

asociación para 39 moléculas, que van desde alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres, lactonas, compuestos azufrados, furanos, y terpenos; para 17 frutas exóticas del estudio y el respectivo aroma reportado para cada molécula. La relación entre estas variables con el AMC explicó una correlación estadísticamente significativa ($p < 0,05$), evidencia como las características de molécula/aromas tienen una fuerte correlación, como se explica en los componentes para las tres primeras dimensiones (**Tabla 4**). Se evidencia, que la correlación establecida entre frutas es independiente, y por ende es necesario emplear un mayor número de datos para establecer mejor el comportamiento y sus correlaciones. Para explicar el comportamiento de las características estudiadas se obtuvo la dimensionalidad del modelo, explicado en la **Tabla 5**.

Tabla 4

Relación de las categorías con cada una de las dimensiones

	Variables categóricas		
	Dim. 1	Dim. 2	Dim. 3
Moléculas	0,939	0,959	0,958
Familias	0,890	0,944	0,927
Frutas	0,521	0,375	0,230
Aromas	0,929	0,973	0,930

Tabla 5

Porcentaje de la dimensionalidad explicada por medio de la varianza de los datos

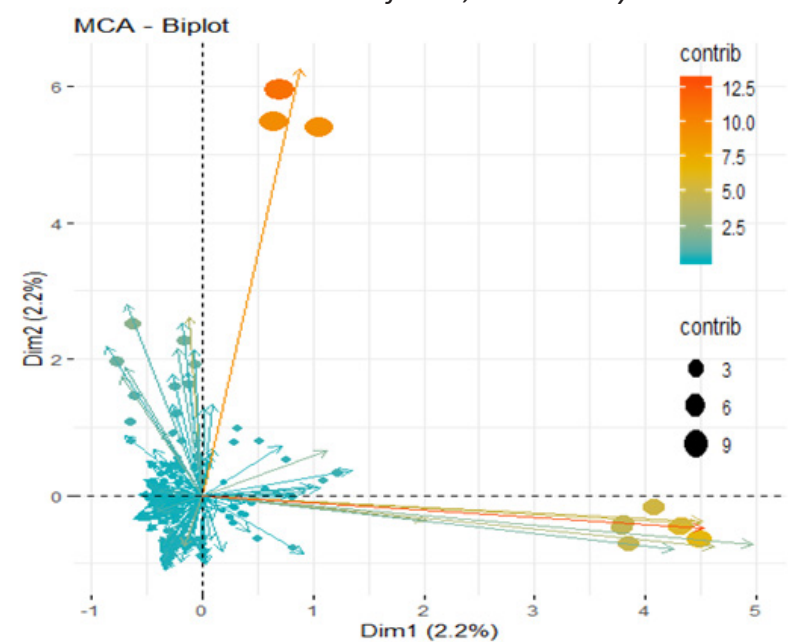
Valores propios	Dim. 1	Dim. 2	Dim. 3	Dim. 4
Varianza	0,939	0,939	0,939	0,939
% de var.	0,939	0,939	0,939	0,939
% acumulado de var.	0,939	0,939	0,939	0,939

En la tabla anterior (Tabla 5), se explica la varianza de los datos, y en esta se pueden interpretar las dimensiones uno y dos, cada una de ellas con un porcentaje de variabilidad

superior al 80 % y su relación entre sí con un porcentaje de la dimensionalidad explicada del 4,2 %, lo que nos permite observar un biplot de correlación en dos dimensiones (Figura 6).

Figura 6

Biplot de análisis de correspondencias múltiples para el análisis correlacionado entre frutas, moléculas y aroma



El segundo grupo se evidencio como el más representativo, realizando una mayor contribución para las frutas de la carambola, la gulupa, el lulo, el mango, la papaya y la uchuva; con las moléculas: 1-octen-3-one, 1-hexanol y el 1-butanol. Para este grupo es notorio que la correlación organoléptica se estableció porque parte de su estadio es de color amarillo y con aromas descritos asociados al olor a hongo, dulce, floral y afrutado. Por último, el linalol y 1-hexanol con aromas relacionados a frutas, floral, cítrico, herbal, dulce.

Tendencias futuras de la investigación de COV del aroma en frutas

Las perspectivas futuras de los compuestos orgánicos volátiles activos del aroma en

frutas son prometedoras y están relacionadas con el desarrollo de técnicas analíticas más sensibles y específicas, que permitirán aislar, detectar y cuantificar COV a niveles aún más bajos de concentración, lo que es crucial para comprender completamente el aroma de las frutas. Esta comprensión desempeñara un papel clave en la calidad sensorial de los alimentos. La técnica más empleada para el análisis de COV, es y posiblemente continúe siendo la microextracción en fase solida del espacio de cabeza y la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (HS-SPME-GC/MS), con los nuevos desarrollos tecnológicos en materia de: fibras con adsorbentes para MEFS con mayor alcance en términos de polaridad, columnas cromatográficas con mayor eficiencia, y sistemas de detección más sensibles (Guillot, et al., 2006).

Para garantizar la captura más eficiente de los compuestos volátiles se requiere de la mejora en las técnicas de extracción y por lo tanto, el desarrollo de nuevas fases adsorbentes que incrementen el espectro de compuestos volátiles a capturar, así como la miniaturización de los métodos, como la microextracción en fase sólida (MEFS) y la microextracción líquido-líquido (MELL), que permitan el análisis de muestras pequeñas y de escaso contenido de COV, por otro lado, se apunta al diseño de metodologías para la toma de muestras en campo (Kataoka, H. 2011). Para una óptima separación de COV, se apuesta a la cromatografía de gases bidimensional (CGxCG), es decir el uso de al menos dos columnas con fases estacionarias diferentes para aumentar la resolución en la separación y facilitar su identificación y cuantificación.

La espectrometría de masas en tiempo real (PTR-MS y SIFT-MS) permite la detección y cuantificación en línea de olores y aromas en tiempo real de compuestos volátiles a niveles muy bajos (Esteban-Fernández *et al.*, 2015). Igualmente, la Espectrometría de movilidad iónica (EMI) puede separar y cuantificar compuestos volátiles basándose en su movilidad iónica en un campo eléctrico, optimizando y depurando el proceso de detección de compuestos a nivel de trazas (Borsdorf *et al.*, 2011).

Otra tendencia es la aplicación de la nanotecnología, enfocada en el desarrollo de sensores altamente sensibles y específicos para el análisis de COV, que se orienten al análisis sensorial avanzado en apoyo de una nariz y una lengua electrónica, permitiendo, obtener resultados más asertivos y rápidos en los análisis del aroma. Estos sensores pueden ser utilizados en dispositivos portátiles y sistemas de control de calidad. (Delgado-Rodríguez *et al.*, 2012).

Otro enfoque de la investigación apunta hacia la química del aroma, en especial al descubrimiento de nuevos COV y a la búsqueda

de aromas personalizados y exclusivos en la industria alimentaria, así como hacia la sostenibilidad y conservación de los compuestos responsables del aroma que es fundamental para mantener la calidad y autenticidad de los productos alimentarios (Carpenter *et al.*, 2002).

La Inteligencia artificial y el aprendizaje automático mediante el diseño y uso de algoritmos basados en las señales de cromatografía de gases y de espectrometría de masas, para analizar patrones en datos de compuestos volátiles puede ayudar en la identificación de perfiles aromáticos y la evaluación de la calidad del aroma de manera más precisa y eficiente (Cardozo *et al.*, 2013).

La metabolómica del aroma es una asignatura pendiente, que parte de la aplicación de herramientas analíticas, quimiométricas y bioinformáticas para la comprensión de los flujos metabólicos y rutas bioquímicas, que explican la producción de sustancias volátiles activas del aroma en frutos (Baena-Pedroza *et al.*, 2020). Finalmente, la combinación de técnicas analíticas tradicionales y las tecnologías emergentes, junto con la aplicación de la inteligencia artificial y la metabolómica, nos conducirán a los avances significativos en el campo del análisis de compuestos volátiles responsables del aroma.

Conclusiones

La presente revisión ha permitido visualizar la evolución de las metodologías para el análisis de los compuestos orgánicos volátiles presentes en las principales frutas estudiadas en los últimos 20 años y reportadas en las bases de datos Web Of Science y Scopus. La cromatografía de gases asociada al análisis olfatométrico GC-O-MS como la metodología de análisis más empleada junto con la técnica de microextracción en fase sólida (MEFS), ha permitido discriminar los COV que contribuyen a la comprensión del aroma total de las frutas.

Se encontraron 194 compuestos orgánicos volátiles reportados para las 17 frutas de la revisión, pertenecientes a las siguientes familias de compuestos así: ésteres (34 %), aldehídos (24,2 %) y alcoholes (16,5 %), lo que correspondió al 74,5 % del total de compuestos orgánicos volátiles presentes en los frutos del estudio. El 25,3 % correspondió principalmente a terpenos, cetonas, furanos, lactonas y compuestos azufrados. Dado que cada compuesto puede repetirse en varias frutas, el listado final presentó 39 tipos de compuestos diferentes, a lo cual se le realizó un análisis de correspondencias múltiples (ACM).

Los resultados arrojaron un porcentaje de variabilidad superior al 80 %; las características distintivas se relacionan con aromas agradables y aromas desagradables (*off flavor*), reportando aromas como: afrutado, verde, menta, dulce y floral a diferencia de aromas desagradables como azufrado, sudoroso, graso, mohoso, patata cocida, rancio, cebolla o aroma a hongos; y las moléculas más representativas como el 1-octen-3-ona, 1-hexanol, 1-butanol disulfuro de dimetilo, metional, acetato de 3-sulfanil hexilo y el grupo que consta de linalool y 1-hexanol; correlacionadas con el carambolo, la gulupa, el lulo, el mango, la papaya y la uchuva. Este trabajo puede considerarse un referente de estudios con énfasis en las frutas exóticas en Colombia a nivel de sus aromas.

Referencias

- Arthur, C. L., & Pawliszyn, J. (1990). Solid phase microextraction with thermal desorption using fused silica optical fibers. *Anal. Chem.*, 62(19), 2145–2148. <https://doi.org/10.1021/ac00218a019>
- Augusto, F., Valente, a. L. P., Dos Santos Tada, E., & Rivellino, S. R. (2000). Screening of brazilian fruit aromas using solid-phase microextraction- gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 873(1), 117–127. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(99\)01282-0](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(99)01282-0)
- Ávila-Toscano, J. H., Marengo-Escuderos, A., & Orozco, C. M. (2014). Indicadores bibliométricos, redes de coautorías y colaboración institucional en revistas Colombianas de psicología. *Avances en psicología latinoamericana*, 32(1), 167–182. <https://doi.org/10.12804/apl32.1.2014.12>
- Ayala-Jara, C. I., Castillo-Saavedra, E. F., Alfaro-Avalos, K. Y., Aspiros-Freyre, E., & Seclén-Ayala, L. E. (2018). Development of a cosmetic dye based on the seed of *Bixa orellana* L. (*Bixaceae*) and evaluation of its *in vitro* effect. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 133–141. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.01.14>
- Baena-Pedroza, A., Londoño-Giraldo, L. M., & Taborda-Ocampo, G. (2020). Volatilome study of the feijoa fruit [*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret.] with headspace solid phase microextraction and gas chromatography coupled with mass spectrometry. *Food Chemistry*, 328, 127109. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127109>
- Bagheri, H., Piri-Moghadam, H., Naderi, M., Es'haghi, A., & Roostaie, A. (2014). Solid-phase microextraction and related techniques. *Miniaturization in Sample Preparation*, (3).
- Baraldi, R., Rapparini, F., Rossi, F., Latella, A., & Ciccioni, P. (1999). Volatile organic compound emissions from flowers of the most occurring and economically important species of fruit trees. *Physics and chemistry of the earth, Part B: Hydrology, oceans and atmosphere*, 24(6), 729–732. [https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(99\)00073-8](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(99)00073-8)
- Beaulieu, J. C., & Grimm, C. C. (2001). Identification of volatile compounds in cantaloupe at various developmental stages using solid phase microextraction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49, 1345–1352. <https://doi.org/10.1021/jf0005768>
- Berger, R. G., Drawert, F., & Kollmannsberger, H. (1989). The flavour of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). *Zeitschrift Für Lebensmittel-Untersuchung Und -Forschung*, 188(2), 122–126. <https://doi.org/10.1007/BF01042735>
- Berrocal, D. I. I. (2012). *Captura y caracterización de compuestos aromáticos volátiles en alimentos cocinados*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Borsdorf, H., Mayer, T., Zarejousheghani, M., & Eiceman, G. A. (2011). Recent developments in ion mobility spectrometry. *Applied spectroscopy reviews*, 46(6), 472–521.
- Borges, K. B., Figueiredo, E. C., & Queiroz, M. E. C. (2015). Preparo de amostras para análise de compostos orgânicos. *Editora LTC, Rio de Janeiro*.
- Cannon, R. J., & Ho, C. T. (2018). Volatile sulfur compounds in tropical fruits. *Journal of Food and Drug Analysis*, 26(2), 445–468. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2018.01.014>
- Carasek, E., & Pawliszyn, J. (2006). Screening of

- tropical fruit volatile compounds using solid-phase microextraction (SPME) fibers and internally cooled SPME fiber. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(23), 8688–8696. <https://doi.org/10.1021/jf0613942>
- Cardozo, C. J. M., Valenzuela, J. R. C., & Londono, G. A. C. (2013). Determination of Soursop (*Annona muricata* L. cv. Elita) Fruit Volatiles during Ripening by Electronic Nose and Gas Chromatography Coupled to Mass Spectroscopy. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*, 66(2), 7117–7128. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0304-28472013000200012&script=sci_arttext&tlng=es
- Carpenter, R. P., Lyon, D. H., Aguilera, M. A., & Hasdell, T. A. (2002). *Análisis sensorial en el desarrollo y control de la calidad de alimentos*. Acribia. Retrieved from https://books.google.com.co/books?id=Rm_cPQAACAAJ
- Carvalho, V. S., Damiani, C., Asquiere, E. R., Orsi, D. C., & Nishi, A. C. F. (2012). Development and antioxidant capacity of sapota pulp jelly (*Quararibea cordata* Vischer). *Ciencia e Agrotecnologia*, 36(3), 341–347. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542012000300010>
- Clark, S. (2017). *Sensory evaluation of food: principles and practices*. New York: Springer.
- Conde-Martínez, N., Jiménez, A., Steinhaus, M., Schieberle, P., Sinuco, D., & Osorio, C. (2013). Key aroma volatile compounds of gulupa (*Passiflora edulis* Sims fo *edulis*) fruit. *European Food Research and Technology*, 236(6), 1085–1091. <https://doi.org/10.1007/s00217-013-1979-9>
- Corpas, E. J., Taborda, G., Tapasco, O. A., & Ortíz, A. (2016). Comparison between extraction methods to obtain volatiles from lulo (*Solanum quitoense*) pulp. *Revista Colombiana de Química*, 45(3). <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v45n3.61359>
- Corpas Iguarán, E., Taborda Ocampo, G., & Tapasco Alzate, O. (2018). Identification of volatile compound markers during the ripening and senescence of lulo (*Solanum quitoense* Lam.). *Journal of Food Science and Technology*, 55(1), 437–442. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2924-x>
- Cuadrado-Silva, C. T., Pozo-Bayón, M. Á., & Osorio, C. (2017). Identification of aroma compounds and precursors of sour guava (*Psidium friedrichsthalianum* Nied.) following a sensomics approach. *European Food Research and Technology*, 243(1). <https://doi.org/10.1007/s00217-016-2716-y>
- Delgado-Rodríguez, M., Ruiz-Montoya, M., Giraldez, I., López, R., Madejón, E., & Díaz, M. J. (2012). Use of electronic nose and GC-MS in detection and monitoring some VOC. *Atmospheric Environment*, 51, 278–285.
- De La Guardia, M. (1999). An Integrated Approach of Analytical Chemistry. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 10(6), 429–437. <https://doi.org/10.1590/S0103-50531999000600002>
- Dembitsky, V. M., Poovarodom, S., Leontowicz, H., Leontowicz, M., Vearasilp, S., Trakhtenberg, S., & Gorinstein, S. (2011). The multiple nutrition properties of some exotic fruits: Biological activity and active metabolites. *Food Research International*, 44(7), 1671–1701. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.03.003>
- Díaz-Maroto, M. C., & Pérez-Coello, M. S. (2006). Análisis de los compuestos responsables del aroma de las especias. *Análisis Químicos*, 102(3), 31–35.
- Dudareva, N., Klempien, A., Muhlemann, J. K., & Kaplan, I. (2013). Biosynthesis, function and metabolic engineering of plant volatile organic compounds. *New Phytologist*, 198(1), 16–32. <https://doi.org/10.1111/nph.12145>
- Duque-Beltrán, B., & Morales Pérez, P. (2005). *El aroma frutal de Colombia*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Química. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=RvyKoN3j4RCc>
- Echeverría, G., Graell, J., López, M. L., & Lara, I. (2004). Volatile production, quality and aroma-related enzyme activities during maturation of “Fuji” apples. *Postharvest Biology and Technology*, 31(3), 217–227. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2003.09.003>
- Esteban-Fernández, A., Muñoz-González, C., Moreno-Arribas, M., & Pozo-Bayón, M. (2015). Aproximaciones analíticas—in vitro e—in vivo para evaluar la liberación del aroma en condiciones de consumo de vino.
- Forero, D. P., Orrego, C. E., Peterson, D. G., & Osorio, C. (2015). Chemical and sensory comparison of fresh and dried lulo (*Solanum quitoense* Lam.) fruit aroma. *Food Chemistry*, 169, 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.111>
- García, J. M., Prieto, L. J., Guevara, A., Malagon, D., & Osorio, C. (2016). Chemical studies of yellow tamarillo (*Solanum betaceum* Cav.) fruit flavor by using a molecular sensory approach. *Molecules*, 21(12), 1–11. <https://doi.org/10.3390/molecules21121729>
- Goff, S. A., & Klee, H. J. (2006). Plant volatile compounds: Sensory cues for health and nutritional value? *Science*, 311(5762), 815–819. <https://doi.org/10.1126/science.1112614>
- Gómez, Z., Jesús, F., Peñafiel, L., & Tovar, H. (2016). Perfil químico y organoléptico de los compuestos volátiles del mezcal, 1(1), 916–923.

- González, M., Pérez-Pavón, J. L., González-Pérez, C., Hernández-Méndez, J., & Álvarez-García, N. (2000). Differentiation of products derived from Iberian breed swine by electronic olfactometry (electronic nose). *Analytica Chimica Acta*, 424(2), 279–287. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)01106-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)01106-5)
- Guillot, S., Peytavi, L., Bureau, S., Boulanger, R., Lepoutre, J. P., Crouzet, J., & Schorr-Galindo, S. (2006). Aroma characterization of various apricot varieties using headspace-solid phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-olfactometry. *Food Chemistry*, 96(1), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.04.016>
- Gutiérrez, D., Sinuco, D. C., & Osorio, C. (2010). Characterization of odor-active volatiles in uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Revista Colombiana de Química*, 39(August 2014), 389–399.
- Idstein, H., & Schreier, P. (1985). Volatile constituents from guava. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 33(1), 138–143. <https://doi.org/10.1021/jf00061a039>
- Jalili, V., Barkhordari, A., & Ghiasvand, A. (2020). A comprehensive look at solid-phase microextraction technique: A review of reviews. *Microchemical Journal*, 152, 104319. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104319>
- Japan, E. of. (2002). Standard guidelines for the environmental monitoring of chemicals. In *Water* (pp. 41–130). Japon. Retrieved from <https://www.env.go.jp/en/chemi/pops/Appendix/04-GuideLine/04Chapter3.pdf>
- Jeleń, H. H., Majcher, M., & Dziadas, M. (2012). Microextraction techniques in the analysis of food flavor compounds: A review. *Analytica Chimica Acta*, 738, 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2012.06.006>
- Jiménez, A. M., Sierra, C. A., Rodríguez-Pulido, F. J., González-Miret, M. L., Heredia, F. J., & Osorio, C. (2011). Physicochemical characterisation of gulupa (*Passiflora edulis* Sims. *fo edulis*) fruit from Colombia during the ripening. *Food Research International*, 44(7), 1912–1918. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.11.007>
- Jordán, M. J., Margaría, C. A., Shaw, P. E., & Goodner, K. L. (2003). Volatile components and aroma active compounds in aqueous essence and fresh pink guava fruit puree (*Psidium guajava* L.) by GC-MS and multidimensional GC/GC-O. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(5), 1421–1426. <https://doi.org/10.1021/jf020765l>
- Júnior, S. V., & Soares, I. P. (2014). Análise Química Da Biomassa – Uma Revisão Das Técnicas E Aplicações. *Química Nova*, 37(4), 709–715. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20140111>
- Kassambara, A., & Mundt, F. (2017). Extract and visualize the results of multivariate data analyses package “factoextra,” 1.0.5. <https://doi.org/https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>
- Kataoka, H. (2011). Current developments and future trends in solid-phase microextraction Techniques for Pharmaceutical and Biomedical Analyses. *Analytical Sciences: The International Journal of the Japan Society for Analytical Chemistry*, 27(9), 893. <https://doi.org/10.2116/analsci.27.893>
- Kataoka, H., Lord, H. L., & Pawliszyn, J. (2000). Applications of solid - phase microextraction in food analysis. *Journal of Chromatography A*, 880, 35–62. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(00\)00309-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(00)00309-5)
- Lasekan, O., & Abbas, K. A. (2012). Distinctive exotic flavor and aroma compounds of some exotic tropical fruits and berries: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 52(8), 726–735. <https://doi.org/10.1080/10408398.2010.507910>
- Le, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1), 177–214. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.06.007>
- MacLeod, A. J., & de Troconis, N. G. (1982). Volatile flavor components of sapodilla fruit (*Achras sapota* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 30(3), 515–517. <https://doi.org/10.1021/jf00111a026>
- MacLeod, A. J., & Pieris, N. M. (1981). Volatile flavor components of soursop (*Annona muricata*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 29(3), 488–490. <https://doi.org/10.1021/jf00105a012>
- Mahattanatawee, K., Goodner, K. L., & Baldwin, E. a. (2005). Volatile constituents and character impact compounds of selected Florida's tropical fruit. *Proc. Fla. State Hort. Soc.*, 118, 414–418.
- Mayorga, H., Knapp, H., Winterhalter, P., & Duque, C. (2001). Glycosidically bound flavor compounds of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(4), 1904–1908. <https://doi.org/10.1021/jf0011743>
- Morales, A. L., & Duque, C. (1987). Aroma constituents of the fruit of the mountain papaya (*Carica pubescens*) from Colombia. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 35(4), 538–540. <https://doi.org/10.1021/jf00076a024>
- Moya, F. I., & Angulo, Y. B. (2001). Análisis sensorial de alimentos: métodos y aplicaciones. Springer Iberica. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=wiSulMouZ-UC>

- Muhlemann, J. K., Klempien, A., & Dudareva, N. (2014). Floral volatiles: From biosynthesis to function. *Plant, Cell and Environment*, 37(8), 1936–1949. <https://doi.org/10.1111/pce.12314>
- Obenland, D., Collin, S., Sievert, J., Negm, F., & Arpaia, M. L. (2012). Influence of maturity and ripening on aroma volatiles and flavor in “Hass” avocado. *Postharvest Biology and Technology*, 71, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2012.03.006>
- Paniandy, J.-C., Chane-Ming, J., & Pieribattesti, J.-C. (2000). Chemical composition of the essential oil and headspace solid-phase microextraction of the guava fruit (*Psidium guajava* L.). *Journal of Essential Oil Research*, 12(2), 153–158. <https://doi.org/10.1080/10412905.2000.9699486>
- Pawliszyn, J. (2011). *Handbook of Solid Phase Microextraction*. Elsevier. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=V4RsOL4TkUYC>
- Pena-pereira, F. (2014). From conventional to miniaturized analytical systems. *Analytical and Food Chemistry Department*, 1–28.
- Perianes-Rodríguez, A., Waltman, L., & van Eck, N. J. (2016). Constructing bibliometric networks: A comparison between full and fractional counting. *Journal of Informetrics*, 10(4), 1178–1195. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2016.10.006>
- Pino, J. A. (2012). Odour-active compounds in mango (*Mangifera indica* L. cv. Corazón). *International Journal of Food Science and Technology*, 47(9), 1944–1950. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.03054.x>
- Pino, J. A. (2018). Conocimientos actuales sobre los compuestos del aroma de la chirimoya. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 28(1), 1–6.
- Pino, J. A., Almora, K., & Marbot, R. (2003). Volatile components of papaya (*Carica papaya* L., Maradol variety) fruit. *Flavour and Fragrance Journal*, 18(6), 492–496. <https://doi.org/10.1002/ffj.1248>
- Pino, J. A., & Mesa, J. (2006). Contribution of volatile compounds to mango (*Mangifera indica* L.) aroma. *Flavour and Fragrance Journal*, 21(2), 207–213. <https://doi.org/10.1002/ffj.1703>
- Pino, J. A., & Quijano, C. E. (2007). Volatile compounds of araza fruit (*Eugenia stipitata* McVaught). *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 38(3), 363–366.
- Plutowska, B., & Wardencki, W. (2007). Aromagrams - Aromatic profiles in the appreciation of food quality. *Food Chemistry*, 101(2), 845–872. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.12.028>
- Qiao, Y., Bi, J. X., Zhang, Y., Zhang, Y., Fan, G., Xiao, L. Y., & Si, Y. P. (2008). Characterization of aroma active compounds in fruit juice and peel oil of Jincheng sweet orange fruit (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) by GC-MS and GC-O. *Molecules*, 13(6), 1333–1344. <https://doi.org/10.3390/molecules13061333>
- Quijano, C. E., Salamanca, G., & Pino, J. A. (2007). Aroma volatile constituents of Colombian varieties of mango (*Mangifera indica* L.). *Flavour and Fragrance Journal*, 22(November), 401–406. <https://doi.org/10.1002/ffj>
- Quintana, J. B., Ramil, M., Rodil, R., Rodríguez, I., & Cela, R. (2014). *New Sample Preparation Strategies for Analytical Determinations. Encyclopedia of Analytical Chemistry*. <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a9392>
- Rivera, R. C. P. y J. M. (2014). ¿Qué es el olor y cómo lo percibimos?, 2014. Retrieved from <https://www.uv.mx/cienciauv/blog/quimicadelolor/>
- Sakho, M., Chassagne, D., & Crouzet, J. (1997). African Mango Glycosidically Bound Volatile Compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45(3), 883–888. <https://doi.org/10.1021/jf960277b>
- Silva, J., Suárez, M., & Duque, C. (2010). Preparación de una esencia de lulo (*solanum vestissimum* d.) a partir del estudio de la contribución de los componentes volátiles al aroma de la fruta. *Revista Colombiana de Química*; Vol. 19, Nm. 2 (1990); 47–54. 0120–2804. Retrieved from <http://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/15328>
- Sinuco, D. C., Steinhaus, M., Schieberle, P., & Osorio, C. (2010). Changes in odour-active compounds of two varieties of Colombian guava (*Psidium guajava* L.) during ripening. *European Food Research and Technology*, 230(6), 859–864. <https://doi.org/10.1007/s00217-010-1232-8>
- Soursop, C., Elita, L., Durante, E., & Maduración, S. U. (2011). Volatile compounds during the ripening of colombian soursop (*Annona muricata* L. cv. Elita). *Fruits*, 245–250.
- Souza-Silva, É. A., Gionfriddo, E., & Pawliszyn, J. (2015). A critical review of the state of the art of solid-phase microextraction of complex matrices II. Food analysis. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 71, 236–248. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2015.04.018>
- Steinhaus, M., Sinuco, D., Polster, J., Osorio, C., & Schieberle, P. (2008). Characterization of the aroma-active compounds in pink guava (*Psidium guajava*, L.) by application of the aroma extract dilution analysis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(11), 4120–4127. <https://doi.org/10.1021/jf8005245>
- Steinhaus, M., Sinuco, D., Polster, J., Osorio, C., & Schieberle, P. (2009). Characterization of the key aroma compounds in pink guava (*Psidium guajava* L.) by means of aroma re-engineering experiments and omission tests. *Journal of*

- Agricultural and Food Chemistry*, 1, 2882–2888. <https://doi.org/10.1021/jf803728n>
- Team, R. D. C., & R Development core team, R. (2016). *R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing*. Vienna, Austria. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74686-7>
- Valls, J. S., Prieto, E. B., & de Castro Mart\in, J. J. (1999). *Introducción al análisis sensorial de los alimentos*. Universitat de Barcelona. Retrieved from https://books.google.com.co/books?id=-cw1_dn02I8C
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2018). VOSviewer version 1.6.7. *Leiden: Univeristeit Leiden*. Retrieved from: http://www.vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.6.1.pdf
- Werkhoff, P., Güntert, M., Krammer, G., Sommer, H., & Kaulen, J. (1998). Vacuum headspace method in aroma research: flavor chemistry of yellow passion fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(3), 1076–1093. <https://doi.org/10.1021/jf970655s>
- Winefordner, J. D. (2011). *Sample Preparation Techniques in Analytical Chemistry*. (Somenath Mitra, Ed.), John Wiley & Sons, Inc. (Department, Vol. 162). <https://doi.org/10.1016/j.epl.2011.09.024>
- Yang, C., Wang, J., & Li, D. (2013). Microextraction techniques for the determination of volatile and semivolatile organic compounds from plants: A review. *Analytica Chimica Acta*, 799, 8–22. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2013.07.069>
- Yilmaztekin, M. (2014). Characterization of potent aroma compounds of cape gooseberry (*Physalis Peruviana L.*) fruits grown in antalya through the determination of odor activity values. *International Journal of Food Properties*, 17(3), 469–480. <https://doi.org/10.1080/10942912.2011.642446>

Apéndice

Compuestos orgánicos volátiles presentes en frutas exóticas en colombianas y sus correspondientes aromas

Moléculas	Familias químicas	Frutas	Aromas
(E)–2–hexenal	aldehído	aguacate (<i>Persea americana</i> Mill., cv. Hass)	verde, afrutado
1–hexanol	alcohol		resina, flor, herbal
acetaldehído	aldehído		solvente, acre
benzaldehído	aldehído		almendra, cereza
furfural	aldehído		dulce, amaderado
hexanal	aldehído		verde, fresco
hexanoato de metilo	éster		afrutado
limoneno	terpeno		cítrico
nonanal	aldehído		graso, cítrico, floral
(Z)–3–hexenol	alcohol	arazá (<i>Eugenia stipitata</i> McVaugh)	herbal
1–hexanol	alcohol		resina, flor, herbal
3–hidroxibutanoato de etilo	éster		verde, floral, graso, dulce
acetato de hexilo	éster		afrutado
butanoato de etilo	éster		afrutado
hexanoato de etilo	éster		dulce
octanoato de etilo	éster		afrutado
δ–decalactona	lactona		coco, dulce, afrutado

Moléculas	Familias químicas	Frutas	Aromas
1-octen-3-ona	cetona	carambolo (<i>Averrhoa carambola</i>)	hongo
benzoato de etilo	éster		sulfuro, tropical, floral
cinamato de etilo	éster		verde, mentol, dulce
edulan1	terpeno		menta, verde
hexanoato de etilo	éster		verde, afrutado
β -ionona	terpeno		dulce, floral, frambuesa
δ -decalactona	lactona		coco, dulce, afrutado
1-hexanol	alcohol	chirimoya cimarrona (<i>Annona chrysophylla</i> Boj.)	frutos secos, crudos
butanoato de metilo	éster		afrutado
hexanoato de etilo	éster		afrutado, piña, dulce
linalool	terpeno		floral, cítrico
(E)-2-hexenal	aldehído	guanábana (<i>Annona muricata</i> L. cv. Elita)	verde, afrutado
(Z)-3-hexenal	aldehído		verde
(Z)-3-hexenol	alcohol		herbal
1-hexanol	alcohol		frutos secos, crudos
ácido butanoico	ácido		rancio
butanoato de etilo	éster		afrutado, manzanas
butanoato de metilo	éster		afrutado
hexanoato de etilo	éster		afrutado, piña, dulce
hexanoato de metilo	éster		afrutado, pera, dulce
linalool	terpeno		floral, cítrico
nonanal	aldehído		graso, cítrico, floral
octanoato de etilo	éster		dulce, afrutado, coco
(E)-2-pentenal	aldehído	guayaba agria (<i>Psidium friedrichsthalianum</i> Nied.)	fresa
(Z)-3-hexenal	aldehído		verde
1-hexanol	alcohol		herbal, afrutado
acetato de 3-sulfanil hexilo	azufrado		sulfuro, sudor
butanoato de etilo	éster		afrutado
disulfuro de dimetilo	azufrado		cebolla
hexanoato de etilo	éster		afrutado, piña, dulce
linalool	terpeno		floral, cítrico
metional	azufrado		patata cocida
(E)-2-hexenal	aldehído	guayaba manzana (<i>Psidium guajava</i> L. <i>Psidium cattleianum</i>)	herbal, verde, afrutado
(Z)-3-hexenal	aldehído		verde, herbal
1-hexanol	alcohol		herbal, afrutado
hexanal	aldehído		verde, fresco
hexanoato de etilo	éster		afrutado, piña, dulce
hexanoato de metilo	éster		afrutado, pera, dulce
(E)-2-hexenal	aldehído	guayaba rosa (<i>Psidium guajava</i> , L.)	herbal, verde, afrutado
(E)-2-pentenal	aldehído		fresa
(Z)-3-hexenal	aldehído		verde, herbal
(Z)-3-hexenol	alcohol		herbal
1-hexanol	alcohol		herbal, afrutado
3-metil-1-butanol	alcohol		solvente, pies sucios, almendra

Moléculas	Familias químicas	Frutas	Aromas
4-hidroxi-2,5-dimetil-3 (2h) -furanona	furano	guayaba rosa (<i>Psidium guajava</i> , L.)	caramelo, dulce
4-metoxi-2,5-dimetil-3 (2h) -furanona	furano		caramelo, dulce
acetaldehído	aldehído		picante, fresco
acetato de hexilo	éster		afrutado, melocotón
benzoato de etilo	éster		caramelo, floral, miel
benzoato de metilo	éster		caramelo, dulce, mentol, verde
butanoato de etilo	éster		afrutado
hexanal	aldehído		herbal
hexanal	aldehído		verde, herbal
hexanoato de etilo	éster		floral, afrutado, anís
linalool	terpeno		limón, perejil
metional	azufrado		patata cocida
nonanal	aldehído		graso, cítrico, floral
octanoato de etilo	éster		verde, mentol, floral, anís
(Z) -3-hexenal	aldehído	gulupa (<i>Passiflora edulis</i> f. <i>edulis</i>)	herbal
(Z) -3-hexenal	aldehído		verde, herbal
1-octen-3-ona	cetona		hongo
1-octen-3-ona	cetona		hongo
acetato de 3-sulfanil hexilo	azufrado		sulfuro, sudor
4-hidroxi-2,5-dimetil-3 (2H) -furanona	furano		caramelo, dulce
ácido acético	ácido		ácido
ácido butanoico	ácido		rancio
butanoato de etilo	éster		afrutado
cinamato de etilo	éster		floral
hexanoato de etilo	éster		afrutado
linalool	terpeno		floral, cítrico
metional	azufrado		patata cocida
octanoato de etilo	éster		coco
β-ionona	terpeno		floral, dulce
(E) -2-hexenal	aldehído	lulo (<i>Solanum quitoense</i> Lam.)	verde, herbal
(E) -2-pentenal	aldehído		dulce, afrutado
(Z) -3-hexenal	aldehído		verde, herbal
(Z)-3-hexenol	alcohol		herbal
1-hexanol	alcohol		herbal, afrutado
acetato de 3-sulfanil hexilo	azufrado		sulfuro, sudor
4-hidroxi-2,5-dimetil-3 (2H) -furanona	furano		dulce, caramelo
acetato de hexilo	éster		afrutado, melocotón
ácido acético	ácido		vinagre
ácido butanoico	ácido		rancio
benzoato de etilo	éster		floral, afrutado
benzoato de metilo	éster		herbal, afrutado
butanoato de etilo	éster		afrutado, dulce
butanoato de metilo	éster		afrutado, dulce, éter, lulo
hexanal	aldehído		verde, metálico

Moléculas	Familias químicas	Frutas	Aromas
hexanoato de etilo	éster	lulo (<i>Solanum quitoense</i> Lam.)	afrutado, piña
hexanoato de metilo	éster		afrutado, dulce, piña
limoneno	terpeno		limón
nonanal	aldehído		graso, cítrico, floral
(E)-2-hexenal	aldehído	mango (<i>Mangifera indica</i> L.)	herbal, verde, afrutado
(Z)-3-hexenol	alcohol		verde, herbal
1-hexanol	alcohol		verde, nuez mohosa
1-octen-3-ona	cetona		hongo
2,5-dimetil-4-metoxi-3 (2H) -furanona	furano		caramelo, dulce
3-hidroxi-butanoato de etilo	éster		verde, floral, graso, dulce
benzoato de metilo	éster		dulce, floral
edulan1	terpeno		menta, verde
hexanal	aldehído		verde, afrutado
linalool	terpeno		cítrico
nonanal	aldehído		graso, cítrico, floral
octanoato de etilo	éster		dulce, afrutado
γ -octalactona	lactona		coco, dulce, herbal
δ -decalactona	lactona		afrutado, dulce
(Z)-3-hexenol	alcohol	maracuyá (<i>Passiflora edulis</i> f. <i>flavicarp</i>)	verde
1-hexanol	alcohol		afrutado
3-hidroxi-butanoato de etilo	éster		verde floral, graso, dulce
acetato de hexilo	éster		afrutado, melocotón
benzaldehído	aldehído		almendra, cereza
butanoato de etilo	éster		herbal afrutado
hexanoato de etilo	éster		afrutado - piña
limoneno	terpeno		cítrico
linalool	terpeno		floral
nonanal	aldehído		graso, cítrico, floral
(Z)-3-hexenol	alcohol	melón de olor (<i>Sicana odorífera</i>)	verde
3-hidroxi-butanoato de etilo	éster		verde, floral, graso, dulce
(Z)-3-hexenol	alcohol	papaya (<i>Carica pubescens</i>)	herbal
1-butanol	alcohol		alcohol
1-hexanol	alcohol		afrutado
1-octen-3-ona	cetona		hongo
2-fenil etanol	alcohol		rosa-miel
3-hidroxi-butanoato de etilo	éster		verde, floral, graso, dulce
3-metil-1-butanol	alcohol		afrutado
acetaldehído	aldehído		vino
ácido acético	ácido		vinagre
alcohol bencílico	alcohol		dulce, floral, afrutado
benzoato de etilo	éster		floral, afrutado
benzoato de metilo	éster		afrutado, dulce
butanoato de etilo	éster		sabroso
butanoato de metilo	éster		herbal, afrutado

Moléculas	Familias químicas	Frutas	Aromas
furfural	aldehído	papaya (<i>Carica pubescens</i>)	quemado
hexanoato de etilo	éster		afrutado, piña
hexanoato de metilo	éster		sabroso
limoneno	terpeno		cítrico
linalool	terpeno		floral
nonanal	aldehído		graso, floral
(E) -2-hexenal	aldehído	tomate de árbol (<i>Solanum betaceum</i> Cav.)	herbal, verde, afrutado, manzana
(Z) -3-hexenal	aldehído		verde
(Z)-3-hexenol	alcohol		verde
1-hexanol	alcohol		afrutado
3-hidroxi-butanoato de etilo	éster		verde, floral, graso, dulce
butanoato de etilo	éster		afrutado, cítrico
butanoato de metilo	éster		dulce, afrutado
hexanal	aldehído		verde, herbal
hexanoato de metilo	éster		eter, piña
(E) -2-hexenal	aldehído	uchuva (<i>Physalis peruviana</i>)	herbal, verde, afrutado, manzana
(E) -2-pentenal	aldehído		dulce, afrutado
1-butanol	alcohol		dulce, floral, afrutado
1-hexanol	alcohol		floral, afrutado
1-octen-3-ona	cetona		hongo
2,5-dimetil-4-metoxi-3 (2H) -furanona	furano		dulce
2-fenil etanol	alcohol		dulce, floral, rosa
3-hidroxi-butanoato de etilo	éster		verde, floral, graso, dulce
4-metoxi-2,5-dimetil-3 (2H) -furanona	furano		caramelo
acetato de hexilo	éster		afrutado
alcohol bencílico	alcohol		dulce, floral, afrutado
benzaldehído	aldehído		cereza
benzoato de metilo	éster		floral
butanoato de etilo	éster		afrutado
butanoato de metilo	éster		dulce afrutado, eter
hexanal	aldehído		verde, graso
hexanoato de etilo	éster		dulce
nonanal	aldehído		graso, cítrico, floral
octanoato de etilo	éster		dulce, afrutado
β -ionona	terpeno		floral, dulce
γ -octalactona	lactona		afrutado, melocotón
1-hexanol	alcohol	zapote (<i>Quararibea cordata</i> Vischer)	afrutado
acetato de hexilo	éster		afrutado, melocotón
alcohol bencílico	alcohol		afrutado, heno, cereal
benzaldehído	aldehído		almendras
benzoato de etilo	éster		medicinal, afrutado
benzoato de metilo	éster		medicinal, fenólico
disulfuro de dimetilo	azufrado		herbal, verde
furfural	aldehído		cocinado, carne asada
hexanal	aldehído		mohoso