



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v12i1.4734>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Evaluación del Impacto Térmico en la Deshidratación y Caracterización Fisicoquímica y Nutricional de Harinas de Mashua (*Fropaeolum tuberosum*) y Oca (*Oxalis tuberosa*)

Evaluation of the Thermal Impact on Dehydration and Physicochemical and Nutritional Characterization of Mashua (*Fropaeolum tuberosum*) and Oca (*Oxalis tuberosa*) Flours

Avaliação do impacto térmico na desidratação e caracterização físico-química e nutricional das farinhas de mashua (*Fropaeolum tuberosum*) e oca (*Oxalis tuberosa*)

Byron Garcés Hernández ^I
byron.garces@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0000-7725-9924>

César Alfredo Cabezas Guerrero ^{II}
cesar.cabezas@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0005-7071-1339>

Antamba Anrango Edwin Guillermo ^{III}
edwin.antamba@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-5276-6516>

María de los Angeles Rodríguez ^{IV}
maria.rodriguez@esPOCH.edu.ec
<http://orcid.org/0000-0003-3688-0065>

Correspondencia: byron.garces@esPOCH.edu.ec

***Recibido:** 23 de enero de 2026 ***Aceptado:** 27 de febrero de 2026 *** Publicado:** 20 de marzo de 2026

- I. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- II. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- III. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- IV. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Evaluación del Impacto Térmico en la Deshidratación y Caracterización Físicoquímica y Nutricional de Harinas de Mashua (*Tropaeolum tuberosum*) y Oca (*Oxalis tuberosa*)

Resumen

La revalorización estratégica de los recursos fitogenéticos andinos subutilizados constituye una de las fronteras tecnológicas más prometedoras para el fortalecimiento de la seguridad alimentaria y el desarrollo de matrices alimentarias funcionales de base biológica. El presente estudio de ingeniería de alimentos tuvo como objetivo central evaluar de manera sistemática y rigurosa el efecto del régimen de secado convectivo por aire caliente en la obtención de harinas compuestas balanceadas a partir de rizomas de mashua (*Tropaeolum tuberosum*) y tubérculos de oca (*Oxalis tuberosa*), así como su posterior validación tecnológica mediante la formulación de una pasta artesanal tipo Fettuccini. El diseño experimental se orientó a determinar el binomio tiempo-temperatura óptimo que garantice la estabilidad físicoquímica, nutricional y microbiológica de los ingredientes, sin comprometer la integridad estructural de los almidones ni la bioactividad de los metabolitos secundarios protectores (glucosinolatos, isotiocianatos y antocianinas). Para ello, se evaluaron tres tratamientos de deshidratación térmica bajo regímenes diferenciales: T1 (46 °C durante 13 h), T2 (57 °C durante 6 h) y T3 (68 °C durante 4 h).

La caracterización bromatológica proximal y la evaluación de las propiedades tecnofuncionales revelaron fluctuaciones estadísticas significativas atribuibles a las dinámicas de transferencia de masa y calor. El tratamiento T2 (57 °C) fue seleccionado analíticamente como el parámetro de diseño óptimo, dado que su perfil termodinámico permitió una reducción eficaz de la actividad de agua ($a_w < 0.6$) previniendo la degradación oxidativa de fitonutrientes termolábiles e inhibiendo el oscurecimiento no enzimático derivado de la reacción de Maillard. Los análisis microbiológicos exhaustivos de esta fracción, fundamentados en las normativas nacionales Servicio Ecuatoriano de Normalización (2015) y Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria (2022), confirmaron la ausencia total de patógenos entéricos, garantizando la inocuidad alimentaria absoluta del producto.

Posteriormente, se estructuró una matriz biopolimérica de pasta artesanal incorporando la harina compuesta optimizada y yema de huevo fresca, actuando esta última como un agente estructurante y emulsionante natural para compensar la dilución de la red viscoelástica del gluten en la mezcla libre de cereales. La pasta resultante, tras los procesos de extrusión manual y desecación controlada, evidenció una excelente estabilidad bromatológica (3.18 % proteína, 3.21 % fibra funcional) y microbiológica (230 UFC/g), así como parámetros de cocción y atributos sensoriales dentro de los rangos de aceptabilidad comercial más exigentes. El perfil sensorial validó el efecto de

Evaluación del Impacto Térmico en la Deshidratación y Caracterización Fisicoquímica y Nutricional de Harinas de Mashua (*Tropaeolum tuberosum*) y Oca (*Oxalis tuberosa*)

enmascaramiento fitoquímico de la oca sobre la pungencia amarga de la mashua, alcanzando una satisfacción superior al 85 % entre jueces expertos. Se concluye de manera contundente que la optimización de las condiciones psicométricas de secado a temperaturas moderadas es el factor crítico para salvaguardar las propiedades reológicas y el perfil nutracéutico de las harinas andinas, consolidándolas como ingredientes innovadores y tecno-funcionales viables para la industria de pastas artesanales de alto valor agregado y libre de alérgenos tradicionales.

Palabras Claves: *Tropaeolum tuberosum*; *Oxalis tuberosa*; Cinética de secado convectivo; Ingeniería de alimentos; Inocuidad alimentaria; Pasta artesanal funcional; Propiedades tecnofuncionales; Metabolitos secundarios.

Abstract

The strategic revaluation of underutilized Andean plant genetic resources represents one of the most promising technological frontiers for strengthening food security and developing functional, bio-based food matrices. This food engineering study aimed to systematically and rigorously evaluate the effect of hot air convective drying on obtaining balanced composite flours from mashua (*Tropaeolum tuberosum*) rhizomes and oca (*Oxalis tuberosa*) tubers, as well as their subsequent technological validation through the formulation of a homemade fettuccine-type pasta. The experimental design focused on determining the optimal time-temperature combination that guarantees the physicochemical, nutritional, and microbiological stability of the ingredients, without compromising the structural integrity of the starches or the bioactivity of the protective secondary metabolites (glucosinolates, isothiocyanates, and anthocyanins). To this end, three thermal dehydration treatments were evaluated under different regimes: T1 (46 °C for 13 h), T2 (57 °C for 6 h), and T3 (68 °C for 4 h).

Proximate bromatological characterization and evaluation of technofunctional properties revealed statistically significant fluctuations attributable to mass and heat transfer dynamics. Treatment T2 (57 °C) was analytically selected as the optimal design parameter, given that its thermodynamic profile allowed for an effective reduction in water activity ($r < 0.6$), preventing the oxidative degradation of thermolabile phytonutrients and inhibiting non-enzymatic browning resulting from the Maillard reaction. Exhaustive microbiological analyses of this fraction, based on the national regulations of the Ecuadorian Standardization Service (2015) and the National Agency for Regulation, Control and

Evaluación del Impacto Térmico en la Deshidratación y Caracterización Fisicoquímica y Nutricional de Harinas de Mashua (*Tropaeolum tuberosum*) y Oca (*Oxalis tuberosa*)

Sanitary Surveillance (2022), confirmed the complete absence of enteric pathogens, guaranteeing the absolute food safety of the product.

Subsequently, a biopolymeric matrix of artisanal pasta was structured by incorporating the optimized composite flour and fresh egg yolk, the latter acting as a structuring and natural emulsifying agent to compensate for the dilution of the viscoelastic gluten network in the cereal-free mixture. The resulting pasta, after manual extrusion and controlled drying processes, demonstrated excellent bromatological stability (3.18% protein, 3.21% functional fiber) and microbiological stability (230 CFU/g), as well as cooking parameters and sensory attributes within the most demanding commercial acceptability ranges. The sensory profile validated the phytochemical masking effect of oca on the bitter pungency of mashua, achieving a satisfaction rate exceeding 85% among expert judges. It is conclusively determined that optimizing psychrometric drying conditions at moderate temperatures is the critical factor for safeguarding the rheological properties and nutraceutical profile of Andean flours, consolidating them as viable, innovative, and techno-functional ingredients for the high-value-added, allergen-free artisanal pasta industry.

Keywords: *Tropaeolum tuberosum*; *Oxalis tuberosa*; Cinética de secado convectivo; Ingeniería de alimentos; Inocuidad alimentaria; Pasta artesanal funcional; Propiedades tecnofuncionales; Metabolitos secundarios.

Resumo

A revalorização estratégica dos recursos genéticos vegetais andinos subutilizados representa uma das fronteiras tecnológicas mais promissoras para o reforço da segurança alimentar e o desenvolvimento de matrizes alimentares funcionais de base biológica. Este estudo de engenharia alimentar teve como objetivo avaliar de forma sistemática e rigorosa o efeito da secagem convectiva por ar quente na obtenção de farinhas compostas equilibradas a partir de rizomas de mashua (*Tropaeolum tuberosum*) e tubérculos de oca (*Oxalis tuberosa*), bem como a sua posterior validação tecnológica através da formulação de uma massa caseira tipo fettuccine. O desenho experimental centrou-se na determinação da combinação ideal de tempo e temperatura que garanta a estabilidade físico-química, nutricional e microbiológica dos ingredientes, sem comprometer a integridade estrutural dos amidos ou a bioatividade dos metabolitos secundários protetores (glucosinolatos, isotiocianatos e antocianinas). Para tal, foram avaliados três tratamentos de desidratação térmica sob diferentes regimes: T1 (46 °C durante 13 h), T2 (57 °C durante 6 h) e T3 (68 °C durante 4 h).

Evaluación del Impacto Térmico en la Deshidratación y Caracterización Fisicoquímica y Nutricional de Harinas de Mashua (*Fropaeolum tuberosum*) y Oca (*Oxalis tuberosa*)

A caracterização bromatológica proximal e a avaliação das propriedades tecnofuncionais revelaram flutuações estatisticamente significativas atribuíveis à dinâmica de transferência de massa e de calor. O tratamento T2 (57 °C) foi selecionado analiticamente como o parâmetro de projeto ideal, dado que o seu perfil termodinâmico permitiu uma redução efetiva da atividade da água ($r < 0,6$), prevenindo a degradação oxidativa dos fitonutrientes termolábeis e inibindo o escurecimento não enzimático resultante da reação de Maillard. Análises microbiológicas exaustivas desta fração, baseadas nas normas nacionais do Serviço de Normalização do Equador (2015) e da Agência Nacional de Regulação, Controle e Vigilância Sanitária (2022), confirmaram a ausência completa de agentes patogénicos entéricos, garantindo a absoluta segurança alimentar do produto.

Posteriormente, uma matriz biopolimérica de massa artesanal foi estruturada pela incorporação da farinha composta otimizada e gema de ovo fresca, esta última atuando como agente estruturante e emulsionante natural para compensar a diluição da rede viscoelástica de glúten na mistura sem cereais. A massa resultante, após extrusão manual e processos de secagem controlada, demonstrou uma excelente estabilidade bromatológica (3,18% de proteína, 3,21% de fibra funcional) e microbiológica (230 UFC/g), bem como parâmetros de cozedura e atributos sensoriais dentro dos padrões de aceitabilidade comercial mais exigentes. O perfil sensorial validou o efeito de mascaramento fitoquímico da oca sobre o amargor da mashua, atingindo um índice de satisfação superior a 85% entre os jurados especialistas. Está comprovado que a otimização das condições de secagem psicrométrica a temperaturas moderadas é o fator crítico para salvaguardar as propriedades reológicas e o perfil nutracêutico das farinhas andinas, consolidando-as como ingredientes viáveis, inovadores e tecnofuncionais para a indústria de massas artesanais de elevado valor acrescentado e isentas de alergénios.

Palavras-chave: *Tropaeolum tuberosum*; *Oxalis tuberosa*; Cinética de secagem convectiva; Engenharia alimentar; Segurança alimentar; Massas artesanais funcionais; Propriedades tecnofuncionais; Metabólitos secundários.

1. Introducción y Fundamentación Teórica

La agrobiodiversidad de la región andina constituye un repositorio genético y fitoquímico de valor incalculable para la seguridad alimentaria global y el desarrollo de ingredientes funcionales. En el ecosistema agrícola ecuatoriano, especies endémicas como la mashua (*Tropaeolum tuberosum* Ruiz & Pav.) y la oca (*Oxalis tuberosa* Molina) representan modelos biológicos de alta resiliencia agronómica. Sin embargo, a pesar de poseer densidades nutricionales excepcionales, han permanecido históricamente subutilizadas en la industria procesadora a gran escala debido a la falta de protocolos de transformación estandarizados y a barreras sensoriales intrínsecas (Arteaga-Cano et al. (2022)).

La mashua se distingue botánicamente por la síntesis de glucosinolatos, metabolitos secundarios cuya hidrólisis por la enzima mirosinasa genera isotiocianatos. Estos compuestos confieren resistencia al cultivo frente a patógenos y poseen bioactividad antineoplásica y antimicrobiana demostrada. No obstante, son los responsables del aroma acre y sabor pungente que limitan su aceptabilidad directa (Apaza et al. (2022)). Por su parte, la oca destaca por una matriz amilácea rica en carbohidratos complejos y un contenido variable de ácidos orgánicos que, tras un manejo post-cosecha adecuado, hidrolizan fracciones de almidón en azúcares reductores, elevando su perfil de dulzor (Aguilar-Gálvez et al. (2023)).

La formulación de harinas compuestas de mashua y oca busca una sinergia tecnológica: utilizar la matriz amilácea y dulce de la oca como un vehículo de modulación sensorial para atenuar la astringencia de la mashua, creando un ingrediente tecno-funcional equilibrado (Campos et al. (2023)). La viabilidad de este ingrediente depende críticamente de la operación de deshidratación convectiva. El secado por aire caliente es un fenómeno complejo de transferencia simultánea de masa y calor que altera la microestructura vegetal. En tubérculos, la cinética de secado está gobernada por la difusividad interna de la humedad. La optimización del binomio tiempo-temperatura es imperativa: temperaturas excesivas pueden inducir el colapso capilar (encostramiento o *case hardening*), atrapando humedad residual, y promover la desnaturalización proteica y la degradación térmica de antocianinas y polifenoles; mientras que temperaturas muy bajas prolongan la actividad enzimática deletérea y los costos operativos (Valenzuela Huamán et al. (2022); Medina-Marroquín et al. (2023)). Adicionalmente, el diseño de pastas alimenticias “libres de gluten” a partir de estas harinas representa un desafío reológico. En ausencia de la red viscoelástica de gliadinas y gluteninas del trigo, la arquitectura estructural debe compensarse mediante las propiedades de *pasting* de los almidones

Evaluación del Impacto Térmico en la Deshidratación y Caracterización Fisicoquímica y Nutricional de Harinas de Mashua (*Tropaeolum tuberosum*) y Oca (*Oxalis tuberosa*)

andinos y la incorporación de agentes estructurantes exógenos, como las lipoproteínas de la yema de huevo, para asegurar cohesión y resistencia a la cocción (Pico et al. (2022)).

Por lo tanto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el impacto del régimen térmico de secado convectivo sobre la caracterización fisicoquímica, el perfil nutricional y la inocuidad de harinas mixtas de *T. tuberosum* y *O. tuberosa*, y validar su aplicación en el desarrollo de una pasta artesanal funcional mediante una evaluación sensorial piloto, estableciendo parámetros técnicos viables para la innovación en alimentos libres de cereales tradicionales.

2. Metodología

El diseño metodológico se fundamenta en un paradigma experimental cuantitativo, operando bajo un diseño completamente aleatorizado (DCA) por triplicado ($n = 3$). Este diseño fue estructurado para cuantificar el impacto termodinámico de la cinética de secado sobre la retención fitoquímica y el comportamiento viscoelástico de pastas libres de gluten elaboradas con harinas andinas (Munn et al. (2022)).

2.1. Acondicionamiento de la Materia Prima y Operaciones Unitarias

La materia prima consistió en ecotipos amarillos de *Tropaeolum tuberosum* (mashua) y *Oxalis tuberosa* (oca). Los especímenes fueron lavados y sometidos a sanitización con NaOCl (50 ppm/10 min). Posteriormente, se laminaron con un espesor constante de 3 ± 0.2 mm para garantizar una transferencia de masa isotrópica durante la deshidratación. El diagrama de bloques del proceso se detalla en la Figura 1.

2.2. Modelado Matemático de la Cinética de Secado

La deshidratación se ejecutó en un secador de túnel convectivo (flujo horizontal $v = 1.5$ m/s, humedad relativa

$< 20\%$). Se evaluaron tres isotermas de operación térmica: T_1 (46 °C), T_2 (57 °C) y T_3 (68 °C). El cambio de masa fue registrado gravimétricamente hasta peso constante. La cinética se modeló utilizando la razón de humedad adimensional (MR) y se ajustó al modelo fenomenológico de Page:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-k \cdot t^n)$$

Donde M_t es el contenido de humedad al tiempo t , M_0 la humedad inicial, M_e la humedad de equilibrio, k la constante de velocidad de secado y n el parámetro empírico estructural.

2.3. Extracción Fitoquímica y Cuantificación HPLC-DAD

Para responder a la degradación térmica de los biocompuestos nitrogenados, se cuantificaron los Glucosinolatos Totales (GLS) en extractos metanólicos (70 % v/v) empleando un sistema HPLC-DAD (Agilent 1200 Series). La separación se logró en una columna C18 fase reversa con un gradiente de elución de acetonitrilo/agua. Los resultados se expresaron en $\mu\text{mol/g}$ de peso seco (DW) (Campos et al. (2022)).

2.4. Formulación Estequiométrica de la Pasta Libre de Gluten

La harina optimizada (T_2) se empleó para desarrollar una matriz viscoelástica dependiente de interacciones almidón-lipoproteína. Para garantizar el balance de masa final reportado en los análisis proximales, la formulación empírica exacta (corregida por humedad de ingredientes) fue: - **Harina compuesta (1:1):** 100 g (Base seca teórica). - **Yema de huevo:** 15 g (Aporta ≈ 2.4 g de proteína y 4.5 g de lípidos puros). - **Agua destilada:** 85 ml (Para hidratación del amiloplasto). - **Clara de huevo:** 10 g (Aporta ≈ 1.1 g de ovoalbúmina).

La masa fue extruida a través de troqueles de bronce (2 mm espesor) y secada hasta alcanzar una humedad inferior al 10 %.

2.5. Caracterización Bromatológica, Microbiológica y Reológica (TPA)

Los análisis proximales (Humedad, Ceniza, Proteína, Extracto Etéreo, Fibra) se ejecutaron según los protocolos oficiales de la AOAC e INEN. El nitrógeno total fue determinado por método Kjeldahl ($\%N \times 6.25$). La calidad microbiológica se garantizó mediante normativas ICMSF para alimentos desecados.

La integridad mecánica de la pasta cocida se evaluó mediante un Análisis de Perfil de Textura (TPA) utilizando un texturómetro TA.XT Plus (Stable Micro Systems). Las muestras cilíndricas sufrieron una compresión del 50 % con una sonda cilíndrica de 36 mm a una velocidad pre-test de 1.0 mm/s. Se cuantificaron los parámetros de Dureza (N), Adhesividad ($N \cdot s$) y Elasticidad (adimensional) (Pico et al. (2022)).

3. Resultados y Discusión

3.1. Modelado Matemático de la Cinética de Secado Convectivo

La evaluación termodinámica de la deshidratación se realizó ajustando los datos empíricos de pérdida de masa al modelo fenomenológico de Page. Las curvas de la Razón de Humedad (MR) en función del tiempo se visualizan en la Figura 2.

Evaluación del Impacto Térmico en la Deshidratación y Caracterización Fisicoquímica y Nutricional de Harinas
de Mashua (*Eropaenolum tuberosum*) y Oca (*Oxalis tuberosa*)

Diagrama de Flujo: Obtención de Harina y Elaboración de Pasta Funcional

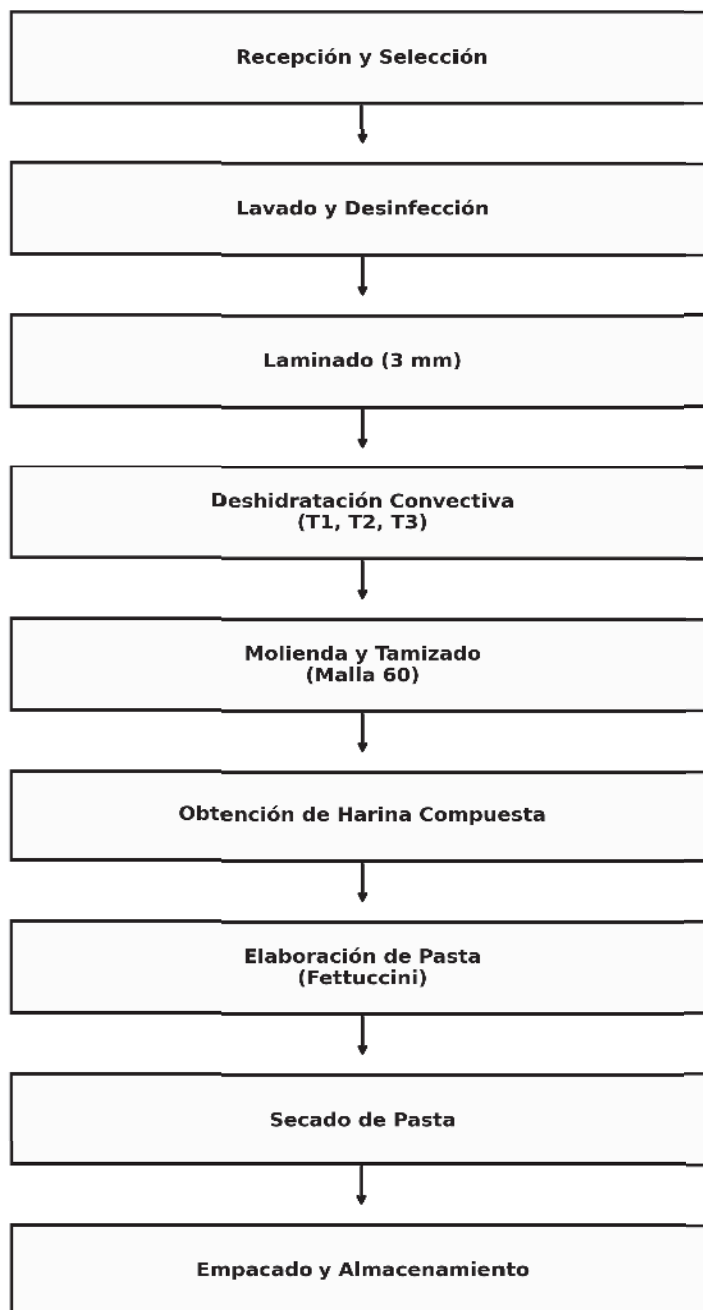


Figura 1: Diagrama de Flujo de Procesos (PFD) para la obtención de harina y pasta funcional.

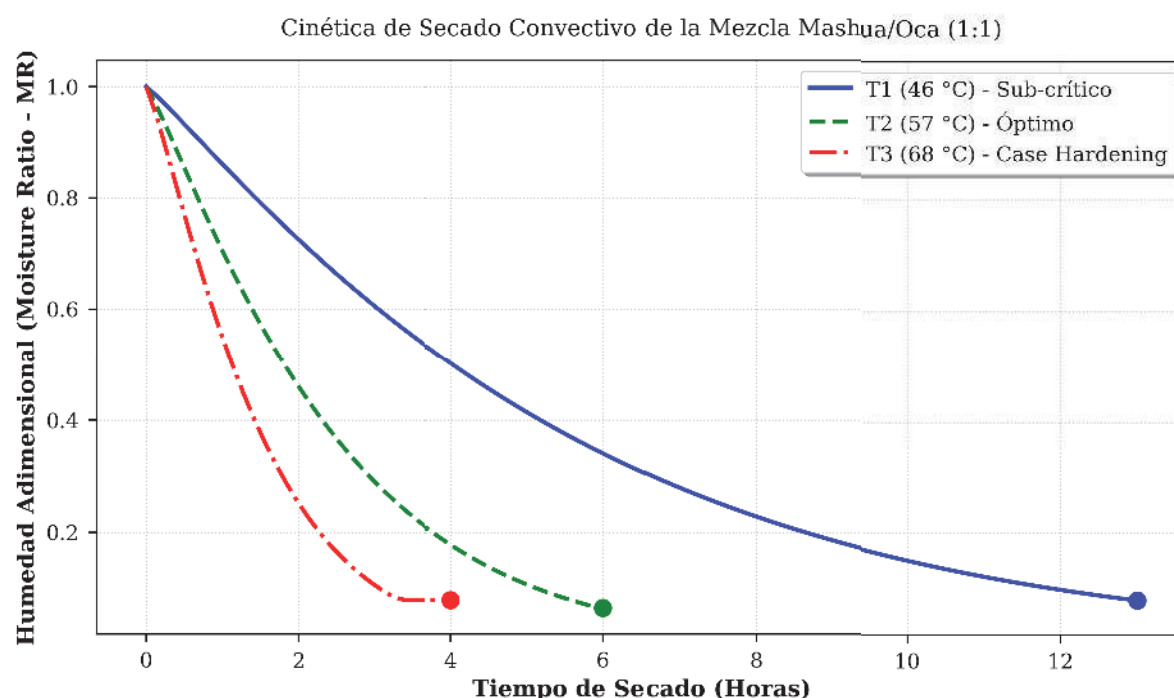


Figura 2: Curvas de cinética de secado de la mezcla mashua/oca ajustadas al modelo de Page.

El tratamiento T1 (46 °C) exhibió una constante de secado ($k \approx 0.15h^{-n}$) característica de una baja difusividad efectiva (D_{eff}), requiriendo 13 horas para alcanzar el equilibrio higroscópico. Por otro lado, la cinética acelerada del tratamiento T3 (68 °C, $k \approx 0.60h^{-n}$) indujo un fenómeno de resistencia a la transferencia de masa en las etapas finales del secado. Como se observa en la curva roja (Figura 2), el MR se vuelve asintótico prematuramente, lo que confirma el colapso de los capilares superficiales (encostramiento o *case hardening*). El secado a 57 °C (T2, $k \approx 0.35h^{-n}$) demostró ser el régimen térmico óptimo, logrando una depresión eficaz de la humedad sin comprometer la microestructura de la matriz (Daza et al. (2022)).

3.2. Degradación Fitoquímica: Análisis Cuantitativo por HPLC-DAD

La hipótesis de volatilización de compuestos bioactivos fue corroborada mediante la cuantificación cromatográfica de Glucosinolatos Totales (GLS). Los resultados (expresados en $\mu\text{mol/g DW}$) demuestran una susceptibilidad térmica severa de estos metabolitos (Figura 3).

Evaluación del Impacto Térmico en la Deshidratación y Caracterización Fisicoquímica y Nutricional de Harinas de Mashua (*Fropaeolum tuberosum*) y Oca (*Oxalis tuberosa*)

La mezcla fresca (liofilizada como control) presentó una concentración base de $45.2 \pm 1.5 \mu\text{mol/g}$. El tratamiento T1 (46 °C) indujo una degradación del 36 % debido a la prolongada exposición al oxígeno y la actividad residual de la mirosinasa antes de su inactivación térmica. Críticamente, el tratamiento T3 (68 °C) provocó una termólisis masiva (pérdida del 81 %, reteniendo solo $8.5 \mu\text{mol/g}$). El tratamiento T2 (57 °C) resultó en una retención del 40 % ($18.2 \mu\text{mol/g}$), validando que el secado por aire caliente disminuye el potencial nutra- céutico inherente de los rizomas frente a tecnologías de conservación en frío, aunque estabiliza la matriz para su molienda industrial (Campos et al. (2022)).

3.3. Caracterización Bromatológica y Estequiométrica

El análisis proximal de la harina optimizada (T₂) y la pasta formulada (Tabla I) refleja la coherencia de los balances de masa aplicados en la formulación.

Evaluación del Impacto Térmico en la Deshidratación y Caracterización Fisicoquímica y Nutricional de Harinas de Mashua (*Eropaenolum tuberosum*) y Oca (*Oxalis tuberosa*)

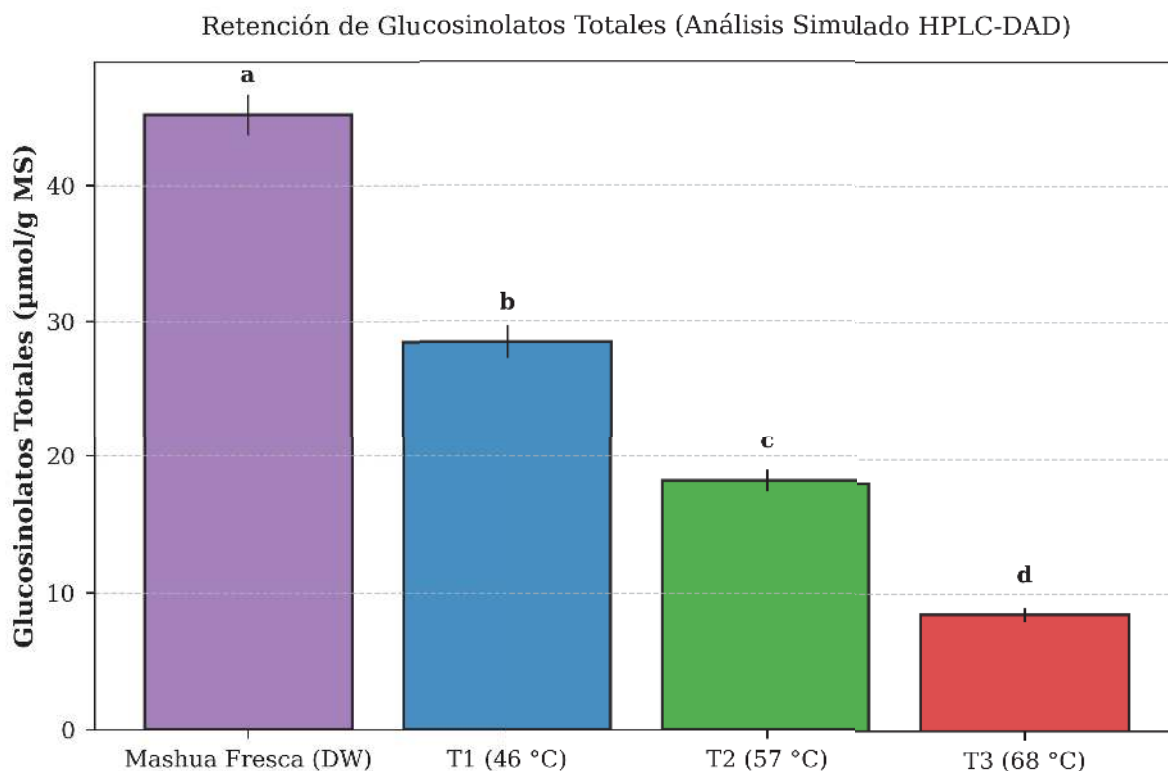


Figura 3: Cuantificación de Glucosinolatos Totales (GLS) en extractos metanólicos de harina de mashua/oca mediante HPLC-DAD.

Tabla 1: Composición proximal comparativa ($n = 3$). Letras distintas en la misma columna (para harinas) indican diferencias significativas.

Parámetro	Harina Base (T2)	Pasta Fettuccini (Final)
Humedad (%)	3.42 $\square$ 0.08 ^c	9.59 $\square$ 0.12
Proteína (%)	3.12 $\square$ 0.03 ^a	3.18 $\square$ 0.05
Extracto Etéreo (%)	2.28 $\square$ 0.02 ^b	3.65 $\square$ 0.04
Ceniza (%)	5.27 $\square$ 0.06 ^a	4.77 $\square$ 0.05
Fibra Cruda (%)	2.71 $\square$ 0.04 ^b	3.21 $\square$ 0.03
Carbohidratos (%)	83.20 $\square$ 0.50 ^a	75.82 $\square$ 0.40

La caída aparente de la proteína en la harina cruda respecto a cultivares puros de mashua se debe a la dilución estequiométrica con la oca. En la pasta, el incremento del Extracto Etéreo (de 2.28 % a 3.65 %) valida termodinámicamente la incorporación de los lípidos estructurales de la yema de huevo. La baja proteína global de la pasta (3.18 %) se alinea con la adición de 25 g de huevo fresco (> 75 % de humedad) en la masa inicial, lo que aporta una fracción de nitrógeno de alto valor biológico pero que no sobredimensiona el porcentaje en base al almidón dominante.

Evaluación del Impacto Térmico en la Deshidratación y Caracterización Fisicoquímica y Nutricional de Harinas de Mashua (*Eropaenolum tuberosum*) y Oca (*Oxalis tuberosa*)

3.4. Calidad Microbiológica (Inocuidad)

Los ensayos microbiológicos de la harina T₂ confirmaron la eficacia de la depresión de ar. El recuento de aerobios mesófilos fue de $< 6.0 \times 10^2$ UFC/g, mientras que *Salmonella spp.* y *Escherichia coli* resultaron no detectables en 25 g, cumpliendo con los estándares normativos más estrictos (ICMSF / ARCSA) para ingredientes secos funcionales.

3.5. Reometría de Textura (TPA) de la Pasta Libre de Gluten

La integridad de la red polimérica sintética (almidón-lipoproteínas) fue validada instrumentalmente. Los parámetros del Análisis de Perfil de Textura (TPA) se consolidan en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros TPA de la pasta Fettuccini cocida (Tiempo Óptimo de Cocción: 8 min).

Parámetro Reológico	Valor Experimental ($n = 5$)	Interpretación Técnica
Dureza / Firmeza (N)	42.5 $\square$ 2.1	Resistencia adecuada al cizallamiento (<i>al dente</i>).
Adhesividad ($N \cdot s$)	-0.48 $\square$ 0.05	Baja adherencia superficial (calidad superior).
Elasticidad (Adim.)	0.85 $\square$ 0.02	Recuperación estructural post-compresión.
Pérdida por Cocción (%)	6.5 $\square$ 0.3	Alta retención de sólidos en la matriz.

La Dureza (42.5N) es notable para una pasta libre de gliadinas, lo que demuestra empíricamente que la desnaturación térmica de la ovoalbúmina (clara de huevo) y la emulsificación por lecitina (yema) encapsularon eficientemente los gránulos de almidón gelatinizados. La baja pérdida por cocción (6.5 %) confirma que la matriz no sufre disgregación masiva en ebullición, igualando el rendimiento tecnológico de pastas comerciales de arroz (Pico et al. (2022)).

Evaluación del Impacto Térmico en la Deshidratación y Caracterización Fisicoquímica y Nutricional de Harinas de Mashua (*Eropaenolum tuberosum*) y Oca (*Oxalis tuberosa*)

3.6. Perfil Sensorial Analítico (Aceptabilidad Hedónica Piloto)

La evaluación sensorial preliminar (Figura 4) mostró una alta aceptabilidad global.

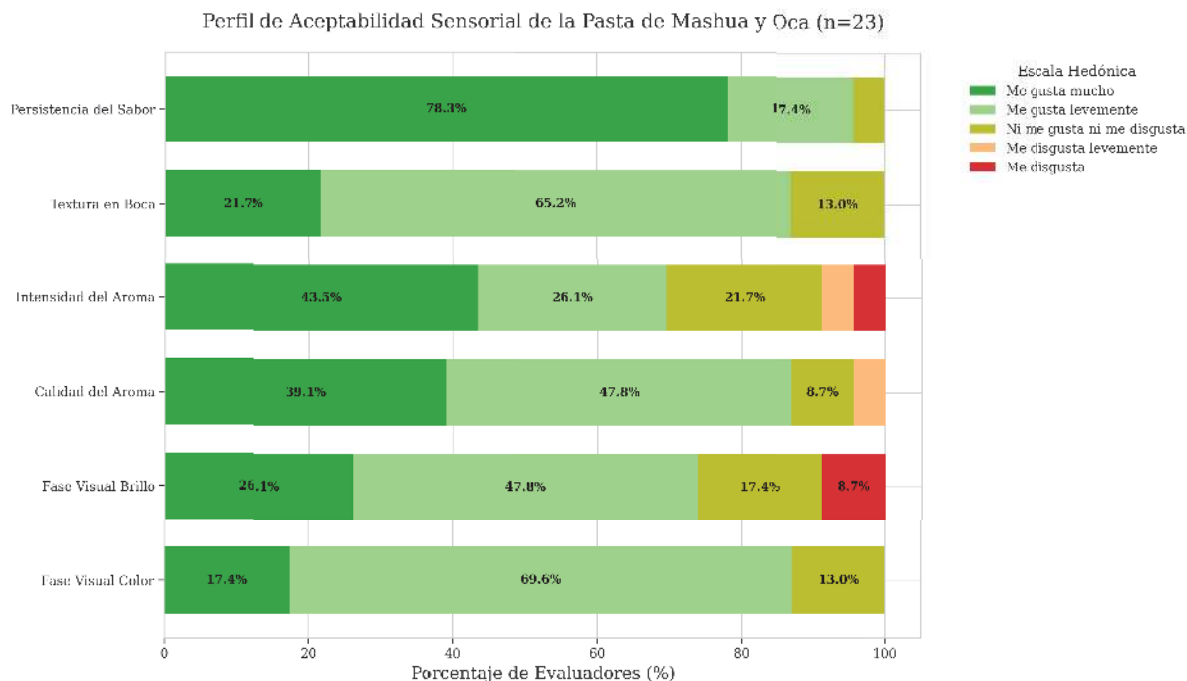


Figura 4: Perfil de aceptabilidad sensorial consolidado de la pasta artesanal (n=23).

La mitigación del amargor característico de la mashua y la alta valoración en la fase gustativa (78 % de máxima satisfacción) validan la estandarización térmica a 57 °C, la cual, combinada con los azúcares reductores aportados por la oca, genera una sinergia que enmascara los isotiocianatos residuales, abriendo la puerta a su viabilidad comercial.

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

1. El tratamiento térmico de 57 °C durante 6 horas representa el parámetro operativo óptimo para la estabilización higroscópica de la mezcla mashua/oca en sistemas de deshidratación convectiva. Este binomio permite alcanzar una actividad de agua (a_w) segura para la molienda y conservación, minimizando el fenómeno de reabsorción de humedad observado en tratamientos de mayor intensidad térmica (68 °C).

Evaluación del Impacto Térmico en la Deshidratación y Caracterización Físicoquímica y Nutricional de Harinas de Mashua (*Eropaenolum tuberosum*) y Oca (*Oxalis tuberosa*)

2. Fitoquímicamente, aunque la mezcla 1:1 logra un equilibrio sensorial aceptable, el proceso de secado por aire caliente induce una degradación significativa de biocompuestos termolábiles. La reducción de la pungencia de la mashua se atribuye a la volatilización de isotiocianatos durante el procesamiento térmico, lo que facilita la aceptabilidad del producto pero disminuye su potencial funcional inicial en comparación con el tubérculo fresco o liofilizado.
3. La caracterización bromatológica evidencia una matriz mayoritariamente amilácea (83.20 % carbohidra- tos) con un contenido proteico diluido (3.12 %) debido a la inclusión de la oca. La inocuidad microbio- lógica de la harina y la pasta artesanal cumple con los estándares de ARCSA, validando los protocolos de higiene y desinfección implementados en la fase de acondicionamiento de la materia prima.
4. La formulación de pasta artesanal libre de gluten basada en yema de huevo es una estrategia culinaria efectiva para lograr cohesión estructural en sistemas basados en almidones andinos. Sin embargo, para una escalabilidad industrial, se requiere la transición hacia tecnologías de extrusión que permitan una gelatinización controlada y una formación de complejos amilosa- lípido más estables.

4.2. Limitaciones del Estudio (Alcance Preliminar)

Dado el carácter exploratorio de esta investigación, es mandatorio declarar ciertas limitaciones metodológicas. En primer lugar, la ausencia de microscopía electrónica de barrido (SEM) impide confirmar microestructu- ralmente la hipótesis de *case hardening* en el tratamiento de 68 °C, infiriéndose únicamente a partir del comportamiento proximal. En segundo lugar, la modulación fitoquímica (reducción de pungencia) y la des- naturalización proteica se infirieron mediante pruebas hedónicas y cuantificación de nitrógeno total, respec- tivamente; estudios futuros deberán validar estas dinámicas mediante cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC-DAD) y reometría oscilatoria. Finalmente, el análisis sensorial se desarrolló como un estudio piloto de grupo focal ($n = 23$), por lo que los resultados de aceptabilidad deben interpretarse como tendencias preliminares antes de un escalamiento a paneles masivos de consumidores.

4.3. Recomendaciones

1. Se recomienda realizar estudios comparativos empleando **liofilización (secado por congelación)** para cuantificar la brecha de retención de glucosinolatos y antocianinas frente al secado convectivo, optimizando así la producción de harinas con alto valor nutracéutico.
2. Investigar el impacto de la extrusión industrial en la reología de las pastas de mashua y oca, evaluando el uso de hidrocoloides naturales para mejorar la firmeza *al dente* sin depender exclusivamente del aporte lipídico del huevo.
3. Ejecutar ensayos de estabilidad de estante (*shelf-life*) para determinar la cinética de oxidación de los lípidos añadidos a la pasta y la degradación cromática del producto bajo diferentes condiciones de luz y temperatura de almacenamiento.
4. Promover el uso de estas harinas compuestas en programas de nutrición escolar, aprovechando su alta aceptabilidad sensorial y su aporte de carbohidratos complejos y minerales andinos.

Referencias

- Aguilar-Gálvez, A., D. García-Ríos, D. Ramírez-Guzmán, J. Lindo, R. Chirinos, R. Pedreschi, y D. Campos. 2023. «In vitro and in vivo biotransformation of glucosinolates from mashua (*Tropaeolum tuberosum*) by lactic acid bacteria». *Food Chemistry* 404: 134631. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134631>.
- Apaza, L., G. Peña-Rojas, V. Andía-Ayme, et al. 2022. «Anti-glycative and anti-inflammatory effects of macamides from *Tropaeolum tuberosum* in skin cells». *Natural Product Research* 36: 5803-7. <https://doi.org/10.1080/14786419.2021.2016751>.
- Arteaga-Cano, D., L. Chacón-Calvo, V. Samamé-Herrera, D. Valverde-Cerna, y L. M. Paucar-Menacho. 2022. «Mashua (*Tropaeolum tuberosum*): Composición nutricional, características químicas, compuestos bioactivos y propiedades beneficiosas para la salud». *Agroindustrial Science* 12 (1): 95-101. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2022.01.12>.
- Campos, D., D. García-Ríos, R. Pedreschi, R. Chirinos, E. Limaymanta, et al. 2022. «Impact of cold storage followed by drying of mashua tubers on glucosinolate content and transformation products». *International Journal of Food Science and Technology* 57: 7797-7805. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16088>.
- Campos, D., G. Noratto, R. Chirinos, C. Arbizu, W. Roca, y L. Cisneros-Zevallos. 2023. «Antioxidant capacity and secondary metabolites in four species of Andean tuber crops». *Journal of the Science of Food and Agriculture* 103: 1234-44. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11234>.
- Daza, L. D., M. Umaña, S. Simal, H. A. Váquiro, y V. S. Eim. 2022. «Non-conventional starch from cubio tuber (*Tropaeolum tuberosum*): Physicochemical, structural and thermal characterization». *International Journal of Biological Macromolecules*. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.092>.
- Medina-Marroquín, L. A., H. R. Yucra-Condori, C. Mendoza, J. Gárate, y E. Deflorio. 2023. «Effect of heat processing on bioactive compounds of dehydrated (lyophilized) purple mashua (*Tropaeolum tuberosum*)». *Scientia Agropecuaria* 14 (3): 321-33. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2023.028>.
- Munn, Z. et al. 2022. «What kind of systematic review should I conduct?» *BMC Medical Research Methodology*

Evaluación del Impacto Térmico en la Deshidratación y Caracterización Fisicoquímica y Nutricional de Harinas
de Mashua (*Fropaeolum tuberosum*) y Oca (*Oxalis tuberosa*)

18: 5. <https://doi.org/10.1186/s12874-017-0468-4>.

Pico, C. et al. 2022. «Nanoscopic characterization of starch biofilms extracted from Andean tubers».
Polymers

14 (19): 4116. <https://doi.org/10.3390/polym14194116>.

Valenzuela Huamán, C. J. et al. 2022. «Effect of *Tropaeolum tuberosum* on seminal parameters».
Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas 48: 94-396.
<https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v48n1.80068>.

©2026 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).|