

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

**Efecto del secado y granulometría en las propiedades fisicoquímicas,
funcionales y sensoriales de una infusión filtrante de Ratania
(*Krameria lappacea*)**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agroindustrial

Autores:

Bach. Valverde Mondalgo, Diego Fernando

Cód. ORCID: 0000-0003-2446-4443

Bach. Zegarra Vasquez, Jose Manuel

Cód. ORCID: 0000-0002-5712-507X

Asesor:

Dr. Moreno Rojo, César

Cód. ORCID: 0000-0002-7143-4450

Coasesor:

Mg. Ascate Pasos, Manuel Eduardo

Cód. ORCID: 0000-0002-9905-2841

Nuevo Chimbote - Perú

2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



CERTIFICACIÓN DEL ASESOR

Yo, **Dr. Moreno Rojo, César**, mediante la presente certifico mi asesoramiento de la tesis titulada **“EFECTO DEL SECADO Y GRANULOMETRÍA EN LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS, FUNCIONALES Y SENSORIALES DE UNA INFUSIÓN FILTRANTE DE RATANIA (*Krameria lappacea*)”**, ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento del objeto propuesto y reúne las condiciones formales y metodológicas, estando encuadrado dentro de las áreas y líneas de investigación conforme al reglamento general para obtener el Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa de acuerdo a la denominación siguiente:

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agroindustrial

Autores:

Bach. Valverde Mondalgo, Diego Fernando

Bach. Zegarra Vasquez, Jose Manuel

Dr. César Moreno Rojo

Asesor

DNI: 20693537

Código ORCID: 0000-0002-7143-4450

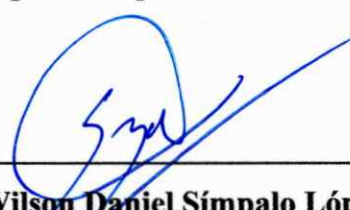
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



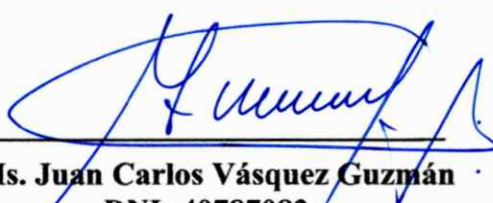
HOJA DE AVAL DEL JURADO EVALUADOR

El presente trabajo de tesis titulado **“EFECTO DEL SECADO Y GRANULOMETRÍA EN LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS, FUNCIONALES Y SENSORIALES DE UNA INFUSIÓN FILTRANTE DE RATANIA (*Krameria lappacea*)”**, para obtener el título profesional de Ingeniero Agroindustrial, presentado por los bachilleres: **Valverde Mondalgo, Diego Fernando** y **Zegarra Vasquez, Jose Manuel**, que tienen como asesor al **Dr. César Moreno Rojo** designado mediante la resolución decanal N°304 -2025-UNS-FI. Ha sido revisado y aprobado el día 15 de septiembre del 2026, por el siguiente jurado evaluador designado mediante resolución N°395-2026-UNS-CFI.

Revisado y Aprobado por el Jurado Evaluador:



Dr. Wilson Daniel Símpalo López
DNI: 40186130
Código ORCID: 0000-0002-8397-7145
Presidente



Ms. Juan Carlos Vásquez Guzmán
DNI: 40787083
Código ORCID: 0000-0002-7112-4006
Secretario



Dr. César Moreno Rojo
DNI: 20693537
Código ORCID: 0000-0002-7143-4450
Integrante

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las once horas del día quince de septiembre del año dos mil veintiséis, se instalaron en el aula AG-4 de la EPIA – 1er piso; el Jurado Evaluador, designado mediante T/Resolución N° 395-2026-UNS-CFI integrado por los docentes:

- **Dr. Wilson Daniel Símpalo López.....Presidente**
- **Ms. Juan Carlos Vásquez Guzmán.....Secretario**
- **Dr. César Moreno Rojo.....Integrante**

Para dar inicio a la Sustentación del Informe Final de Tesis titulado: **“EFECTO DEL SECADO Y GRANULOMETRÍA EN LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS, FUNCIONALES Y SENSORIALES DE UNA INFUSIÓN FILTRANTE DE RATANIA (*Krameria lappacea*)”**, elaborado por las Bachilleres en Ingeniería Agroindustrial:

VALVERDE MONDALGO DIEGO FERNANDO
ZEGARRA VASQUEZ JOSE MANUEL

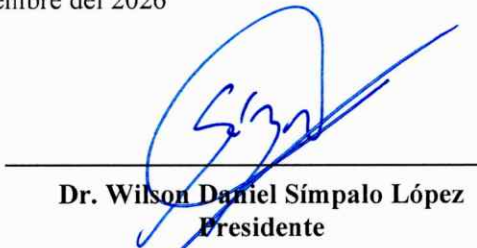
Asimismo, tienen como Asesor al docente: **Dr. César Moreno Rojo** y Co-asesor a **Mg. Manuel Eduardo Ascate Pasos**.

Finalizada la sustentación, las Tesis respondieron las preguntas formuladas por los miembros del Jurado Evaluador. Acto seguido el Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo, y con las sugerencias pertinentes en concordancia con el Artículo 107° del Reglamento de Grados y títulos de la Universidad Nacional del Santa, declaran:

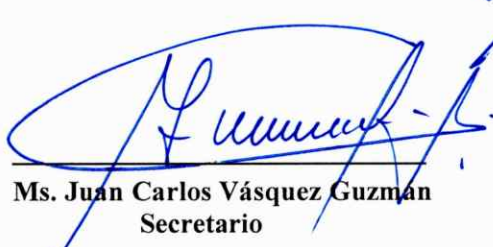
NOMBRES Y APELLIDOS	NOTA VIGESIMAL	CONDICIÓN
VALVERDE MONDALGO DIEGO FERNANDO	18	APROBADO

Siendo las 12:00 horas del mismo día, se dio por terminada dicha sustentación, firmando en señal de conformidad el Jurado Evaluador.

Nuevo Chimbote, 15 de septiembre del 2026



Dr. Wilson Daniel Símpalo López
Presidente



Ms. Juan Carlos Vásquez Guzmán
Secretario



Dr. César Moreno Rojo
Integrante

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las once horas del día quince de septiembre del año dos mil veintiséis, se instalaron en el aula AG-4 de la EPIA – 1er piso; el Jurado Evaluador, designado mediante T/Resolución N° 395-2026-UNS-CFI integrado por los docentes:

- **Dr. Wilson Daniel Símpalo López.....Presidente**
- **Ms. Juan Carlos Vásquez Guzmán.....Secretario**
- **Dr. César Moreno Rojo.....Integrante**

Para dar inicio a la Sustentación del Informe Final de Tesis titulado: **“EFECTO DEL SECADO Y GRANULOMETRÍA EN LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS, FUNCIONALES Y SENSORIALES DE UNA INFUSIÓN FILTRANTE DE RATANIA (*Krameria lappacea*)”**, elaborado por las Bachilleres en Ingeniería Agroindustrial:

VALVERDE MONDALGO DIEGO FERNANDO
ZEGARRA VASQUEZ JOSE MANUEL

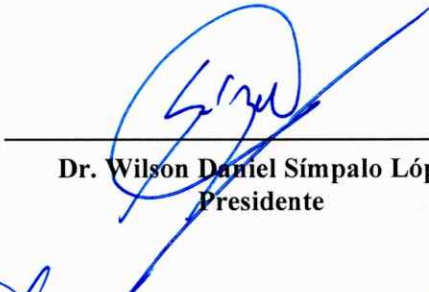
Asimismo, tienen como Asesor al docente: **Dr. César Moreno Rojo** y Co-asesor a **Mg. Manuel Eduardo Ascate Pasos**.

Finalizada la sustentación, las Tesistas respondieron las preguntas formuladas por los miembros del Jurado Evaluador. Acto seguido el Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo, y con las sugerencias pertinentes en concordancia con el Artículo 107° del Reglamento de Grados y títulos de la Universidad Nacional del Santa, declaran:

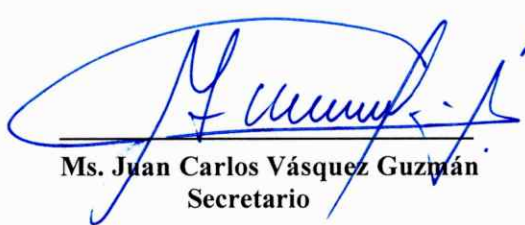
NOMBRES Y APELLIDOS	NOTA VIGESIMAL	CONDICIÓN
ZEGARRA VASQUEZ JOSE MANUEL	18	APROBADO

Siendo las 12:00 horas del mismo día, se dio por terminada dicha sustentación, firmando en señal de conformidad el Jurado Evaluador.

Nuevo Chimbote, 15 de septiembre del 2026



Dr. Wilson Daniel Símpalo López
Presidente



Ms. Juan Carlos Vásquez Guzmán
Secretario



Dr. César Moreno Rojo
Integrante



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Jose Manuel ZEGARRA VÁSQUEZ
Título del ejercicio: INFORME FINAL 2026 RATANIA
Título de la entrega: INFORME FINAL RATANIA
Nombre del archivo: TESIS_-_VALVERDE_Y_ZEGARRA_2026_-_TURNITIN.pdf
Tamaño del archivo: 2.53M
Total páginas: 196
Total de palabras: 56,264
Total de caracteres: 302,804
Fecha de entrega: 18-ago-2026 10:17p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 3014484656

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

Efecto del secado y granulometría en las propiedades fisicoquímicas,
funcionales y sensoriales de una infusión filtrante de Ratania
(*Krameria lappacea*)

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agroindustrial

Autores:

Bach. Valverde Mondalgo, Diego Fernando

Cód. ORCID: 0000-0003-2446-4443

Bach. Zegarra Vasquez, Jose Manuel

Cód. ORCID: 0000-0002-5712-507X

Asesor:

Dr. César Moreno Rojo

Cód. ORCID: 0000-0002-7143-4450

Coasesor:

Mg. Manuel Eduardo Ascate Pasos

Cód. ORCID: 0000-0002-9905-2841

Nuevo Chimbote - Perú
2026

INFORME FINAL RATANIA

INFORME DE ORIGINALIDAD

8%

INDICE DE SIMILITUD

7%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1 hdl.handle.net

Fuente de Internet

1%

2 repositorio.uns.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

3 idoc.pub

Fuente de Internet

<1%

4 repository.upb.edu.co

Fuente de Internet

<1%

5 issuu.com

Fuente de Internet

<1%

6 sedici.unlp.edu.ar

Fuente de Internet

<1%

7 repositorio.upeu.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

8 Submitted to Universidad de Guayaquil

Trabajo del estudiante

<1%

9 ddd.uab.cat

Fuente de Internet

<1%

10 Submitted to Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD, UNAD

Trabajo del estudiante

<1%

11 Submitted to Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurimac

Trabajo del estudiante

<1%

12 Submitted to Universidad de Costa Rica

Trabajo del estudiante

<1%

13 doczz.net

Fuente de Internet

<1%

14 www.coursehero.com

Fuente de Internet

<1%

15 repositorio.uladech.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

DEDICATORIA

A mis padres, Luis Valverde y Roxana Mondalgo, por su amor incondicional, su entrega y su sacrificio; por guiarme en el camino de la vida y enseñarme a levantarme y seguir adelante a pesar de todo. Tenerlos junto a mí es mi mayor fortuna. Todo lo que soy es gracias a ustedes.

A mis hermanos, Alessandro, Thiago y Arleth; a mi abuela Bertha; a mis abuelos Flavio y Florentina; a mis tíos y a toda mi familia, por formar parte de esta etapa tan importante de mi vida.

Y a todas las personas que Dios puso en mi camino y que estuvieron a mi lado para sostenerme cuando más lo necesité. Contar con cada uno de ustedes ha sido una gran bendición.

Valverde Mondalgo, Diego Fernando

A mis padres, Manuel Zegarra y Fabiola Vasquez, que me han sostenido desde el primer día y no han dejado de hacerlo ni un solo año. Todo lo que hay detrás de estas páginas empezó con ustedes.

A mis abuelos paternos, Teófilo Zegarra y Esther Alva, por acompañarme siempre con la misma constancia. Este logro también les pertenece.

A mi hermano Fabián, y al resto de mi familia, que estuvo cerca a lo largo de todo este camino.

Y a mi novia, que me acompañó durante todos mis años de universidad, empujándome cuando me faltaban las ganas y celebrando conmigo cada vez que algo salía bien.

Zegarra Vasquez, Jose Manuel

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestro agradecimiento al Dr. César Moreno Rojo, asesor de la presente investigación, por su orientación, su exigencia y el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo, y también por su labor como docente en los distintos cursos que llevamos con él a lo largo de la carrera, cuya enseñanza forma parte de lo que hoy podemos aplicar en esta tesis. Agradecemos igualmente al Mg. Manuel Eduardo Ascate Pasos, coasesor, por su acompañamiento durante el desarrollo del estudio.

De manera especial agradecemos al Mg. Lenin Palacios Ambrocio, quien nos brindó su tiempo y su criterio siempre que se lo pedimos. Su disposición constante durante toda la carrera en apoyarnos, y especialmente en las dudas que surgieron en este trabajo, fue un respaldo que valoramos de manera particular.

A los ingenieros y técnicos que nos facilitaron los equipos y las condiciones necesarias para realizar los análisis, en el Laboratorio de Control de Calidad y en el Laboratorio de Nutrición y Toxicología, ambos pertenecientes al Instituto de Investigación Tecnológica Agroindustrial, así como en el Laboratorio de Química Orgánica y en el Laboratorio de Microbiología y Toxicología, correspondientes a la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, y en la Planta Piloto Agroindustrial de la Universidad Nacional del Santa.

Finalmente, a nuestros compañeros, a nuestros amigos y a todas las personas que de una u otra manera nos ayudaron durante este trabajo y a lo largo de nuestros años de universidad.

LOS AUTORES

ÍNDICE

RESUMEN	xxii
ABSTRACT	xxiii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Ratania (<i>Krameria lappacea</i>)	3
2.1.1. Generalidades	3
2.1.2. Descripción botánica y taxonomía	3
2.1.3. Distribución geográfica y hábitat andino.....	7
2.1.4. Usos etnobotánicos y tradicionales.....	10
2.1.5. Composición química	11
2.1.5.1. Taninos y proantocianidinas	11
2.1.5.2. Flavonoides y compuestos fenólicos	13
2.1.5.3. Lignanos y otros metabolitos secundarios.....	15
2.1.5.4. Composición mineral.....	16
2.1.6. Propiedades funcionales y bioactivas	19
2.1.6.1. Actividad antioxidante.....	19
2.1.6.2. Actividad antimicrobiana	21
2.1.6.3. Actividad antiinflamatoria y cicatrizante	24
2.1.6.4. Actividad citotóxica sobre líneas celulares tumorales.....	26
2.2. Infusión filtrante	28
2.2.1. Definición	28
2.2.2. Historia y evolución del consumo de infusiones	28
2.2.3. Clasificación y tipos de infusiones	29
2.2.4. Alimentos y bebidas funcionales	31
2.2.4.1. Estrés oxidativo y capacidad antioxidante de la dieta	33
2.2.5. Importancia de las infusiones filtrantes como alimentos funcionales	34
2.2.6. Mecanismos de extracción de compuestos bioactivos durante la infusión	35
2.2.7. Parámetros de calidad	36
2.2.7.1. Parámetros fisicoquímicos.....	36
2.2.7.2. Parámetros microbiológicos e inocuidad.....	37
2.2.7.3. Parámetros sensoriales.....	38

2.2.7.4. Parámetros funcionales: capacidad antioxidante y métodos de determinación	39
2.2.8. Normativa y requisitos técnicos aplicables	41
2.3. Procesamiento y secado de plantas medicinales.....	41
2.3.1. Procesamiento poscosecha de la ratania.....	42
2.3.2. Secado de plantas medicinales	43
2.3.3. Molienda y granulometría	45
2.4. Contexto sociocultural, económico y ambiental	47
III. MATERIALES Y MÉTODOS	48
3.1. Lugar de ejecución.....	48
3.2. Materiales, equipos y reactivos	48
3.2.1. Materia prima	48
3.2.2. Material del laboratorio	48
3.2.2.1. Material de vidrio	48
3.2.2.2. Material para determinaciones analíticas	49
3.2.2.3. Material para el procesamiento.....	49
3.2.2.4. Material para evaluación sensorial	49
3.2.2.5. Equipo de protección personal	50
3.2.3. Reactivos	50
3.2.4. Equipos	50
3.3. Metodología de procesamiento.....	52
3.3.1. Descripción del proceso de elaboración	52
3.3.2. Balance de materia y cálculo del rendimiento	55
3.4. Métodos de análisis	57
3.4.1. Caracterización fisicoquímica de la materia prima	57
3.4.1.1. Humedad.....	57
3.4.1.2. Cenizas	57
3.4.1.3. Fibra dietética total	58
3.4.2. Caracterización fisicoquímica del producto terminado	60
3.4.2.1. Preparación de la infusión	60
3.4.2.2. pH	61
3.4.2.3. Sólidos solubles totales (°Brix)	61
3.4.2.4. Acidez titulable.....	61
3.4.3. Caracterización funcional del producto terminado.....	63

3.4.3.1.	Capacidad antioxidante por el Método DPPH.....	63
3.4.3.2.	Expresión del aporte antioxidante por unidad de consumo.....	65
3.4.4.	Análisis sensorial mediante escala visual analógica (VAS).....	66
3.4.4.1.	Panel de evaluación y determinación del tamaño de muestra	67
3.4.4.2.	Preparación y presentación de las muestras	69
3.4.4.3.	Instrumento de evaluación y conversión de las respuestas	69
3.5.	Diseño experimental.....	70
3.5.1.	Variables de estudio.....	70
3.5.1.1.	Variables independientes	70
3.5.1.2.	Variables dependientes	70
3.5.2.	Diseño factorial y codificación de tratamientos	70
3.5.3.	Unidades experimentales y repeticiones.....	72
3.6.	Metodología estadística	73
3.6.1.	Modelo estadístico.....	73
3.6.1.1.	Modelo para variables fisicoquímicas y funcionales.....	73
3.6.1.2.	Modelo para variables sensoriales con bloque de panelista	74
3.6.2.	Análisis de varianza.....	75
3.6.3.	Verificación de supuestos.....	76
3.6.4.	Pruebas no paramétricas de respaldo	77
3.6.5.	Comparación múltiple de medias	77
3.6.6.	Criterio de selección del tratamiento óptimo.....	78
3.6.7.	Software estadístico	79
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	80
4.1.	Caracterización fisicoquímica de la materia prima	80
4.1.1.	Humedad.....	81
4.1.2.	Cenizas	81
4.1.3.	Fibra dietética total	82
4.1.4.	Consideraciones generales de la caracterización.....	83
4.2.	Obtención de la infusión filtrante	83
4.2.1.	Balance de materia del proceso	84
4.2.2.	Rendimiento del proceso	87
4.2.3.	Características del producto obtenido.....	88
4.3.	Caracterización fisicoquímica de las infusiones filtrantes	90
4.3.1.	pH	91

4.3.1.1. Análisis de varianza.....	91
4.3.1.2. Efecto de los factores.....	93
4.3.1.3. Comparación de tratamientos	94
4.3.1.4. Discusión	96
4.3.2. Sólidos solubles totales (°Brix)	98
4.3.2.1. Análisis de varianza.....	99
4.3.2.2. Efecto de los factores.....	100
4.3.2.3. Comparación de tratamientos	102
4.3.2.4. Discusión	104
4.3.3. Acidez titulable.....	106
4.3.3.1. Análisis de varianza.....	107
4.3.3.2. Efecto de los factores.....	109
4.3.3.3. Comparación de tratamientos	111
4.3.3.4. Discusión	112
4.4. Caracterización funcional de las infusiones filtrantes	116
4.4.1. Capacidad antioxidante.....	116
4.4.1.1. Análisis de varianza.....	117
4.4.1.2. Efecto de los factores.....	118
4.4.1.3. Comparación de tratamientos	120
4.4.1.4. Discusión	122
4.4.1.5. Proyección funcional del aporte antioxidante y estimación de consumo	126
4.5. Análisis sensorial de la infusión filtrante	133
4.5.1. Evaluación del atributo Color.....	133
4.5.1.1. Análisis de varianza.....	134
4.5.1.2. Efecto de los factores.....	137
4.5.1.3. Comparación de tratamientos	139
4.5.1.4. Discusión	140
4.5.2. Evaluación del atributo Olor.....	142
4.5.2.1. Análisis de varianza.....	143
4.5.2.2. Efecto de los factores.....	146
4.5.2.3. Comparación de tratamientos	148
4.5.2.4. Discusión	149
4.5.3. Evaluación del atributo Sabor	152

4.5.3.1. Análisis de varianza.....	153
4.5.3.2. Efecto de los factores.....	156
4.5.3.3. Comparación de tratamientos	158
4.5.3.4. Discusión	159
4.5.4. Evaluación del atributo Aceptabilidad general.....	162
4.5.4.1. Análisis de varianza.....	163
4.5.4.2. Efecto de los factores.....	166
4.5.4.3. Comparación de tratamientos	168
4.5.4.4. Discusión	169
4.6. Determinación del tratamiento óptimo	172
4.6.1. Consolidación de los resultados por variable respuesta	173
4.6.2. Verificación de la conformidad fisicoquímica	174
4.6.3. Análisis del compromiso entre funcionalidad y aceptabilidad sensorial 175	
4.6.4. Selección del tratamiento óptimo	177
V. CONCLUSIONES	181
VI. RECOMENDACIONES	183
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	185
VIII. ANEXOS.....	197

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Clasificación taxonómica de Krameria lappacea</i>	6
Tabla 2 <i>Distribución geográfica, hábitat y estado de conservación de Krameria lappacea</i>	9
Tabla 3 <i>Contenido de taninos y proantocianidinas identificados en Krameria lappacea</i>	13
Tabla 4 <i>Perfil de compuestos fenólicos y flavonoides del extracto hidroalcohólico de raíz de Krameria lappacea</i>	14
Tabla 5 <i>Composición elemental de la raíz seca de Krameria lappacea y aporte estimado por sobre filtrante</i>	17
Tabla 6 <i>Efecto del extracto de raíz de Krameria lappacea sobre marcadores de estrés oxidativo en modelo murino</i>	21
Tabla 7 <i>Actividad antimicrobiana y antifúngica reportada para extractos de Krameria lappacea</i>	23
Tabla 8 <i>Mediadores inflamatorios modulados por el extracto de raíz de Krameria lappacea</i>	26
Tabla 9 <i>Comparación de los métodos de extracción acuosa aplicados a material vegetal y su efecto sobre la recuperación de compuestos</i>	31
Tabla 10 <i>Parámetros fisicoquímicos exigidos para infusiones filtrantes</i>	37
Tabla 11 <i>Rangos de temperatura óptima de secado para la retención de compuestos bioactivos</i>	45
Tabla 12 <i>Niveles de los factores evaluados en el diseño factorial 2³</i>	71
Tabla 13 <i>Matriz experimental del diseño factorial 2³</i>	71
Tabla 14 <i>Propiedades fisicoquímicas de la materia prima deshidratada de Ratania (Krameria lappacea)</i>	80
Tabla 15 <i>Balance de materia de las operaciones de acondicionamiento de la materia prima</i>	84
Tabla 16 <i>Balance de materia y pérdida de humedad durante la operación de secado</i>	85
Tabla 17 <i>Balance de materia de las operaciones de molienda y tamizado</i>	86
Tabla 18 <i>Rendimiento del proceso y número de unidades obtenidas por tratamiento</i>	87
Tabla 19 <i>Propiedades fisicoquímicas de las infusiones filtrantes de Krameria lappacea</i>	90
Tabla 20 <i>Análisis de varianza del pH de las infusiones filtrantes</i>	92

Tabla 21	<i>Comparación múltiple de las combinaciones experimentales para el pH mediante la prueba de Tukey.....</i>	95
Tabla 22	<i>Análisis de varianza de los sólidos solubles totales de las infusiones filtrantes</i>	99
Tabla 23	<i>Comparación múltiple de las combinaciones experimentales para los sólidos solubles totales mediante la prueba de Tukey</i>	103
Tabla 24	<i>Análisis de varianza de la acidez titulable de las infusiones filtrantes</i>	107
Tabla 25	<i>Comparación múltiple de las combinaciones experimentales para la acidez titulable mediante la prueba de Tukey</i>	111
Tabla 26	<i>Capacidad antioxidante de las infusiones filtrantes de Krameria lappacea</i>	116
Tabla 27	<i>Análisis de varianza de la capacidad antioxidante de las infusiones filtrantes</i>	117
Tabla 28	<i>Comparación múltiple de las combinaciones experimentales para la capacidad antioxidante mediante la prueba de Tukey.....</i>	121
Tabla 29	<i>Capacidad antioxidante de la infusión filtrante de ratania y de otras infusiones de consumo habitual.....</i>	128
Tabla 30	<i>Aporte antioxidante de la infusión filtrante de ratania según base de expresión</i>	129
Tabla 31	<i>Estimación del aporte antioxidante según frecuencia de consumo de la infusión filtrante de ratania.....</i>	130
Tabla 32	<i>Puntajes del atributo color de las infusiones filtrantes de Krameria lappacea</i>	134
Tabla 33	<i>Ajuste del modelo con panelista como bloque para el atributo color.....</i>	135
Tabla 34	<i>Análisis de varianza en bloques completos al azar del atributo color.....</i>	136
Tabla 35	<i>Comparación múltiple de las combinaciones experimentales para el atributo color mediante la prueba de Tukey</i>	139
Tabla 36	<i>Puntajes del atributo olor de las infusiones filtrantes de Krameria lappacea</i>	143
Tabla 37	<i>Ajuste del modelo con panelista como bloque para el atributo olor</i>	144
Tabla 38	<i>Análisis de varianza en bloques completos al azar del atributo olor</i>	145
Tabla 39	<i>Comparación múltiple de las combinaciones experimentales para el atributo olor mediante la prueba de Tukey</i>	148
Tabla 40	<i>Puntajes del atributo sabor de las infusiones filtrantes de Krameria lappacea</i>	153

Tabla 41	<i>Ajuste del modelo con panelista como bloque para el atributo sabor</i>	154
Tabla 42	<i>Análisis de varianza en bloques completos al azar del atributo sabor</i>	155
Tabla 43	<i>Comparación múltiple de las combinaciones experimentales para el atributo sabor mediante la prueba de Tukey.....</i>	158
Tabla 44	<i>Puntajes de aceptabilidad general de las infusiones filtrantes de Krameria lappacea</i>	163
Tabla 45	<i>Ajuste del modelo con panelista como bloque para la aceptabilidad general</i>	164
Tabla 46	<i>Análisis de varianza en bloques completos al azar del atributo aceptabilidad general.....</i>	165
Tabla 47	<i>Comparación múltiple de las combinaciones experimentales para la aceptabilidad general mediante la prueba de Tukey.....</i>	168
Tabla 48	<i>Consolidación de los resultados funcionales y sensoriales de los ocho tratamientos.....</i>	173
Tabla 49	<i>Verificación de la conformidad fisicoquímica de los tratamientos candidatos</i>	175
Tabla 50	<i>Comparación directa entre los tratamientos T6 y T8 en las variables de decisión.....</i>	176
Tabla 51	<i>Valores normalizados de los tratamientos T6 y T8 respecto del máximo observado en cada variable.....</i>	180

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Ejemplar de Krameria lappacea</i>	7
Figura 2 <i>Diagrama de flujo de la elaboración de infusión filtrante de Krameria lappacea (Ratania)</i>	52
Figura 3 <i>Distribución de la masa a lo largo del proceso de elaboración de la infusión filtrante de ratania</i>	89
Figura 4 <i>Efecto de los factores sobre el pH de la infusión filtrante de ratania</i>	94
Figura 5 <i>Interacción triple de los factores sobre el pH de la infusión filtrante de ratania</i>	97
Figura 6 <i>pH de la infusión filtrante de ratania según combinación experimental</i>	98
Figura 7 <i>Efecto de los factores sobre los sólidos solubles totales de la infusión filtrante de ratania</i>	102
Figura 8 <i>Interacción triple de los factores sobre los sólidos solubles totales de la infusión filtrante de ratania</i>	105
Figura 9 <i>Sólidos solubles totales de la infusión filtrante de ratania según combinación experimental</i>	106
Figura 10 <i>Efecto de los factores sobre la acidez titulable de la infusión filtrante de ratania</i>	110
Figura 11 <i>Interacción triple de los factores sobre la acidez titulable de la infusión filtrante de ratania</i>	114
Figura 12 <i>Acidez titulable de la infusión filtrante de ratania según combinación experimental</i>	115
Figura 13 <i>Efecto de los factores sobre la capacidad antioxidante de la infusión filtrante de ratania</i>	120
Figura 14 <i>Interacción triple de los factores sobre la capacidad antioxidante de la infusión filtrante de ratania</i>	125
Figura 15 <i>Capacidad antioxidante de la infusión filtrante de ratania según combinación experimental</i>	126
Figura 16 <i>Capacidad antioxidante de la infusión filtrante de ratania en comparación con otras infusiones de consumo habitual</i>	131
Figura 17 <i>Efectos principales de la temperatura de secado, el tiempo de secado y el tamaño de partícula sobre la aceptabilidad del color de la infusión filtrante de ratania</i>	138

Figura 18 <i>Interacción de los factores sobre la aceptabilidad del color de la infusión filtrante de ratania</i>	141
Figura 19 <i>Puntaje medio de aceptabilidad del color según tratamiento</i>	142
Figura 20 <i>Efectos principales de la temperatura de secado, el tiempo de secado y el tamaño de partícula sobre la aceptabilidad del olor de la infusión filtrante de ratania</i>	147
Figura 21 <i>Interacción de los factores sobre la aceptabilidad del olor de la infusión filtrante de ratania</i>	151
Figura 22 <i>Puntaje medio de aceptabilidad del olor según tratamiento</i>	152
Figura 23 <i>Efectos principales de la temperatura de secado, el tiempo de secado y el tamaño de partícula sobre la aceptabilidad del sabor de la infusión filtrante de ratania</i>	157
Figura 24 <i>Interacción de los factores sobre la aceptabilidad del sabor de la infusión filtrante de ratania</i>	161
Figura 25 <i>Puntaje medio de aceptabilidad del sabor según tratamiento</i>	162
Figura 26 <i>Efectos principales de la temperatura de secado, el tiempo de secado y el tamaño de partícula sobre la aceptabilidad general de la infusión filtrante de ratania</i>	167
Figura 27 <i>Interacción de los factores sobre la aceptabilidad general de la infusión filtrante de ratania</i>	171
Figura 28 <i>Puntaje medio de aceptabilidad general según tratamiento</i>	172
Figura 29 <i>Perfil comparativo normalizado de los tratamientos T6 y T8 en las variables de decisión</i>	180

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 <i>Ficha de evaluación sensorial de la infusión filtrante de Ratania (Krameria lappacea)</i>	197
Anexo 2 <i>Gráfico cuantil-cuantil de los residuos del modelo del pH</i>	198
Anexo 3 <i>Residuos frente a valores ajustados del modelo del pH</i>	198
Anexo 4 <i>Efectos simples de los factores sobre el pH de la infusión filtrante</i>	199
Anexo 5 <i>Gráfico cuantil-cuantil de los residuos del modelo de sólidos solubles totales</i>	200
Anexo 6 <i>Residuos frente a valores ajustados del modelo de sólidos solubles totales</i>	200
Anexo 7 <i>Efectos simples de los factores sobre los sólidos solubles totales de la infusión filtrante</i>	201
Anexo 8 <i>Gráfico cuantil-cuantil de los residuos del modelo de acidez titulable</i>	202
Anexo 9 <i>Residuos frente a valores ajustados del modelo de acidez titulable</i>	202
Anexo 10 <i>Análisis de varianza por permutaciones de la acidez titulable</i>	203
Anexo 11 <i>Efectos simples de los factores sobre la acidez titulable de la infusión filtrante</i>	204
Anexo 12 <i>Gráfico cuantil-cuantil de los residuos del modelo de capacidad antioxidante</i>	205
Anexo 13 <i>Residuos frente a valores ajustados del modelo de capacidad antioxidante</i>	205
Anexo 14 <i>Efectos simples de los factores sobre la capacidad antioxidante de la infusión filtrante</i>	206
Anexo 15 <i>Estructura del registro de datos del atributo color. Extracto de los dos primeros panelistas</i>	207
Anexo 16 <i>Gráfico cuantil-cuantil de los residuos del modelo de aceptabilidad del color</i>	208
Anexo 17 <i>Residuos frente a valores ajustados del modelo de aceptabilidad del color</i>	208
Anexo 18 <i>Análisis de varianza por permutaciones dentro de bloque como respaldo del análisis paramétrico del atributo color</i>	209
Anexo 19 <i>Efectos simples de los factores sobre la aceptabilidad del color</i>	210
Anexo 20 <i>Gráfico cuantil-cuantil de los residuos del modelo de aceptabilidad del olor</i>	211

Anexo 21	<i>Residuos frente a valores ajustados del modelo de aceptabilidad del olor</i>	211
Anexo 22	<i>Análisis de varianza por permutaciones dentro de bloque como respaldo del análisis paramétrico del atributo olor</i>	212
Anexo 23	<i>Efectos simples de los factores sobre la aceptabilidad del olor</i>	213
Anexo 24	<i>Gráfico cuantil-cuantil de los residuos del modelo de aceptabilidad del sabor</i>	214
Anexo 25	<i>Residuos frente a valores ajustados del modelo de aceptabilidad del sabor</i>	214
Anexo 26	<i>Análisis de varianza por permutaciones dentro de bloque como respaldo del análisis paramétrico del atributo sabor</i>	215
Anexo 27	<i>Efectos simples de los factores sobre la aceptabilidad del sabor</i>	216
Anexo 28	<i>Gráfico cuantil-cuantil de los residuos del modelo de aceptabilidad general</i>	217
Anexo 29	<i>Residuos frente a valores ajustados del modelo de aceptabilidad general</i>	217
Anexo 30	<i>Análisis de varianza por permutaciones dentro de bloque como respaldo del análisis paramétrico de la aceptabilidad general</i>	218
Anexo 31	<i>Efectos simples de los factores sobre la aceptabilidad general</i>	219

RESUMEN

La ratania (*Krameria lappacea*) es un arbusto nativo de los Andes peruanos cuya raíz concentra taninos, proantocianidinas y compuestos fenólicos de reconocida actividad antioxidante. Su aprovechamiento se ha limitado tradicionalmente al ámbito farmacológico, en particular al empleo de la raíz como astringente en el tratamiento de inflamaciones leves de la mucosa orofaríngea, sin que se hayan desarrollado aplicaciones alimentarias estandarizadas. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de las condiciones de secado y de la granulometría sobre las propiedades fisicoquímicas, funcionales y sensoriales de una infusión filtrante elaborada a partir de esta especie. Se aplicó un diseño factorial 2^3 con tres repeticiones, evaluando dos temperaturas de secado (40 y 60 °C), dos tiempos de secado (3 y 6 h) y dos tamaños de partícula (850 y 2000 μm). La materia prima presentó 11,16 % de humedad, 3,85 % de cenizas y 59,95 % de fibra dietética total, y el proceso alcanzó un rendimiento global de 59,98 %. En las infusiones, el pH osciló entre 4,883 y 5,977, los sólidos solubles totales entre 1,177 y 2,207 °Brix y la acidez titulable entre 0,01275 y 0,02221 % p/v. La capacidad antioxidante, determinada por el método DPPH, varió entre 10 332,96 y 19 422,30 $\mu\text{mol ET/L}$, siendo la temperatura de secado el factor de mayor incidencia, con un aporte del 41,38 % de la variabilidad ($p < 0,05$). La evaluación sensorial se realizó con 105 panelistas mediante escala visual analógica, incorporando al panelista como factor de bloqueo, fuente que explicó entre el 53,00 % y el 70,07 % de la variabilidad; el sabor resultó el atributo de menor aceptación, con 3,98 a 5,69 puntos, y gobernó la aceptabilidad general. Se determinó que la reducción del tamaño de partícula incrementa la extracción de sólidos solubles, pero intensifica la astringencia percibida. El tratamiento óptimo correspondió a 60 °C durante 6 h con granulometría de 2000 μm , el cual alcanzó la mayor capacidad antioxidante del diseño sin detrimento sensorial demostrable.

Palabras clave: *Krameriaceae*, DPPH, proantocianidinas, escala visual analógica, alimento funcional, especie nativa peruana.

ABSTRACT

Rhatany (*Krameria lappacea*) is a shrub native to the Peruvian Andes whose root concentrates tannins, proanthocyanidins and phenolic compounds of recognised antioxidant activity. Its use has traditionally been confined to the pharmacological field, particularly as an astringent for the treatment of mild inflammation of the oropharyngeal mucosa, with no standardised food applications having been developed. The aim of this research was to evaluate the effect of drying conditions and particle size on the physicochemical, functional and sensory properties of a tea bag infusion made from this species. A 2³ factorial design with three replicates was applied, evaluating two drying temperatures (40 and 60 °C), two drying times (3 and 6 h) and two particle sizes (850 and 2000 µm). The raw material showed 11.16 % moisture, 3.85 % ash and 59.95 % total dietary fibre, and the process reached an overall yield of 59.98 %. In the infusions, pH ranged from 4.883 to 5.977, total soluble solids from 1.177 to 2.207 °Brix and titratable acidity from 0.01275 to 0.02221 % w/v. Antioxidant capacity, determined by the DPPH method, ranged from 10,332.96 to 19,422.30 µmol TE/L, with drying temperature as the most influential factor, accounting for 41.38 % of the variability ($p < 0.05$). Sensory evaluation was carried out with 105 panellists using a visual analogue scale, with the panellist included as a blocking factor, a source that explained between 53.00 % and 70.07 % of the variability; flavour was the least accepted attribute, ranging from 3.98 to 5.69 points, and governed overall acceptability. Reducing particle size was found to increase the extraction of soluble solids while intensifying perceived astringency. The optimum treatment corresponded to 60 °C for 6 h with a particle size of 2000 µm, which achieved the highest antioxidant capacity of the design with no demonstrable sensory detriment.

Keywords: *Krameriaceae*, DPPH, proanthocyanidins, visual analogue scale, functional food, Peruvian native species.

I. INTRODUCCIÓN

El sector agroalimentario enfrenta la creciente demanda de productos funcionales que, además de su valor nutricional, aporten beneficios para la salud (Granato et al., 2023), y las infusiones representan una alternativa accesible, culturalmente aceptada y de bajo costo (Shaik et al., 2023). Este interés ha consolidado a especies como la manzanilla y el té verde en el mercado global de infusiones herbales (Carbone et al., 2025), mientras que otras plantas con potencial comparable permanecen ausentes de la oferta estandarizada. Entre ellas destaca la ratania (*Krameria lappacea*, familia Krameriaceae), arbusto propio de las zonas áridas de los Andes de Perú, Bolivia y Chile (Brokamp et al., 2012), cuyas raíces concentran taninos, lignanos y proantocianidinas (Safta et al., 2023), han sido empleadas ancestralmente por las comunidades andinas (Kor et al., 2021) y presentan actividades antioxidantes, antimicrobianas y antiinflamatorias documentadas (Abdel-Gaber et al., 2024).

La producción científica sobre la especie evidencia, sin embargo, una orientación unilateral. La revisión del Registro Nacional de Trabajos de Investigación (RENATI), del Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación (ALICIA) y de bases indexadas, empleando los términos *Krameria lappacea* y ratania, identificó un número reducido de investigaciones peruanas, concentradas en la evaluación farmacológica de extractos y en la caracterización ecológica y de propagación de la especie. Entre las primeras, Zegarra (2022) determinó mediante el método DPPH la capacidad antioxidante del extracto de ratania, que alcanzó un 35,79 % de inhibición del radical y ocupó el segundo lugar entre cinco especies vegetales nativas evaluadas. Ninguna de las investigaciones identificadas aborda la ratania como materia prima alimentaria, ni evalúa el efecto de las condiciones de proceso, ni determina su capacidad antioxidante sobre la infusión acuosa, que constituye la forma real de consumo del producto propuesto.

Este vacío resulta significativo dada la relevancia sanitaria del aporte antioxidante de la dieta. El estrés oxidativo, entendido como el desequilibrio entre la producción de especies reactivas de oxígeno y las defensas del organismo, se vincula con el incremento de mutaciones del ADN, la inestabilidad genómica y la proliferación celular asociada al desarrollo de enfermedades crónicas (Mileo y Miccadei, 2016). En el plano epidemiológico, Parohan et al. (2019), sobre cinco cohortes prospectivas que reunieron 226 297 individuos, determinaron una asociación inversa significativa entre la capacidad

antioxidante total de la dieta y la mortalidad por todas las causas, por cáncer y por enfermedades cardiovasculares, y establecieron que un incremento de 5 mmol por día en dicho indicador reduce el riesgo de mortalidad entre un 7 % y un 15 % según el método de estimación empleado. Los compuestos bioactivos de las infusiones han sido, en consecuencia, objeto de ensayos clínicos orientados a evaluar su efecto sobre la salud humana (Cavanah et al., 2025).

La calidad final de una infusión funcional depende tanto de su composición química como de la percepción sensorial del consumidor. En la ratania, los taninos que sustentan su capacidad antioxidante son también los responsables de la astringencia y el amargor, atributos que pueden comprometer la aceptación del producto (Soares et al., 2020). Entre los factores que gobiernan ese equilibrio destacan el secado y la granulometría: un secado excesivo degrada compuestos antioxidantes y uno insuficiente compromete la inocuidad, mientras que una granulometría muy fina intensifica la extracción y la astringencia y una demasiado gruesa reduce la liberación de compuestos solubles (Silva-Ramírez et al., 2020; Li et al., 2023). Su estandarización resulta indispensable para garantizar la reproducibilidad tecnológica del producto (Wang et al., 2023; Brendler et al., 2022).

El aprovechamiento de *Krameria lappacea* incorpora, además, una dimensión de sostenibilidad ineludible. La especie ha sido catalogada como planta medicinal en peligro de los desiertos andinos, condición agravada por su naturaleza hemiparásita obligada, que restringe severamente su propagación y su cultivo controlado (Brokamp et al., 2012). Estandarizar un producto de mayor valor agregado a partir de una recolección silvestre limitada permite incrementar el retorno económico por unidad de materia prima recolectada y reducir la presión de extracción sobre la población silvestre, en línea con la tendencia de aprovechamiento responsable de los recursos vegetales y de revalorización de los saberes locales (Calcina et al., 2022; Liu et al., 2023).

En este marco, la presente investigación tiene como objetivo general evaluar el efecto de las condiciones de secado y granulometría en las propiedades fisicoquímicas, funcionales y sensoriales de una infusión filtrante de ratania (*Krameria lappacea*). Como objetivos específicos se plantea: determinar las propiedades fisicoquímicas y funcionales de la ratania; elaborar una infusión filtrante a base de ratania; y determinar el tratamiento óptimo en función de las características fisicoquímicas, funcionales y sensoriales de la infusión, considerando los efectos de diferentes condiciones de secado y granulometría.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Ratania (*Krameria lappacea*)

2.1.1. Generalidades

La ratania (*Krameria lappacea*) es un arbusto perenne nativo de las zonas áridas y semiáridas de los Andes de Sudamérica, cuya raíz ha sido empleada con fines medicinales desde épocas precolombinas y constituye, en la actualidad, la única especie del género con importancia económica reconocida (Brokamp et al., 2012). Su valor radica en la corteza radicular, excepcionalmente rica en taninos y neolignanós, compuestos a los que se atribuye la actividad astringente, antioxidante y antimicrobiana que sustenta tanto su uso tradicional como su comercialización internacional bajo los nombres de rhatany o ratanhia.

Desde una perspectiva agroindustrial, la ratania presenta una condición particular que condiciona toda su cadena de suministro, se trata de una planta hemiparásita de raíz, cuya biología dificulta el cultivo convencional y determina que su abastecimiento dependa casi exclusivamente de la recolección silvestre (Brokamp et al., 2012). Esta situación, sumada a la ausencia de investigaciones orientadas a su aprovechamiento alimentario, define el escenario en el que se inscribe la presente investigación. En los apartados siguientes se describen su posición taxonómica y morfología, su distribución y hábitat, y los usos tradicionales que respaldan su empleo como materia prima para el desarrollo de una infusión filtrante funcional.

2.1.2. Descripción botánica y taxonomía

Krameria lappacea, conocida comúnmente como ratania, es un arbusto perenne perteneciente a la familia Krameriaceae Dumort. Su clasificación taxonómica corresponde al reino Plantae, división Magnoliophyta, clase Magnoliopsida, orden Zygophyllales, género *Krameria* y especie *K. lappacea*. Krameriaceae es una familia monogénica exclusiva del Nuevo Mundo, integrada por arbustos y hierbas perennes hemiparásitos propios de los desiertos y semidesiertos de América. El número de especies reconocidas varía según la fuente: Simpson (1989) y Brokamp et al. (2012) admiten 18 especies, mientras que revisiones más recientes elevan la cifra a aproximadamente 23

(Nickrent, 2020). De todas ellas, *K. lappacea* es la única que posee importancia económica reconocida y la de mayor relevancia etnobotánica y farmacológica (Brokamp et al., 2012).

Las clasificaciones previas a la era molecular ubicaban a Krameriaceae en las Polygalales o Vochysiales. Sin embargo, los análisis filogenéticos basados en secuencias de ADN establecieron de manera consistente su relación hermana con Zygophyllaceae, dentro del orden Zygophyllales, posición mantenida desde la clasificación APG II (2003) hasta la vigente APG IV (Nickrent, 2020). La divergencia entre ambas familias se ha estimado en aproximadamente 60,9 millones de años (Nickrent, 2020). La familia se reconoce por sus flores bilaterales, frecuentemente rosadas a purpúreas, y por sus frutos espinosos (Nickrent, 2020).

En cuanto a la nomenclatura, resulta necesario precisar que buena parte de la literatura científica y farmacológica emplea el nombre *Krameria triandra* Ruiz & Pav., el cual corresponde al mismo taxón, actualmente aceptado como *Krameria lappacea* (Dombey) Burdet & B.B. Simpson. Por esta razón, los estudios que mencionan a *K. triandra* se consideran plenamente válidos y aplicables a la presente investigación.

En cuanto a su morfología, la ratania es un arbusto que alcanza entre 30 cm y 2 m de altura, con un diámetro de copa de hasta 1,5 m, siendo el mayor parásito de raíz de su hábitat natural (Brokamp et al., 2012). Sus ramas son erectas, de corteza grisácea a pardo oscura y con tricomas densos en la superficie. Las hojas son simples, alternas, lineares a lanceoladas y coriáceas, con pubescencia que les otorga un aspecto plateado. Presenta flores solitarias y zigomorfas, con sépalos petaloides rojizos a purpúreos y una corola heteromorfa; a diferencia de la mayoría de las especies vegetales, sus flores carecen de néctar y ofrecen como recompensa floral aceites secretados por pétalos modificados en glándulas especializadas, recurso aprovechado por abejas colectoras de aceite del género *Centris* (Simpson, 1989; Brokamp et al., 2012). El fruto es una nuececilla seca, indehiscente y monosperma, cubierta de tricomas ganchudos (fruto gloquidiado) que favorecen la dispersión zoócora. La raíz, por su parte, es leñosa y constituye la parte de mayor interés medicinal e industrial por su concentración de taninos y otros metabolitos bioactivos (Simpson, 1989; Brokamp et al., 2012).

El rasgo biológico de mayor relevancia para el aprovechamiento agroindustrial de la especie es su condición hemiparásita. Las plantas hemiparásitas, a diferencia de las holoparásitas, conservan clorofila y mantienen la fotosíntesis, pero extraen agua y nutrientes minerales de plantas hospederas mediante órganos especializados denominados haustorios (Nickrent, 2020). *Krameria* constituye, junto con *Cassytha* (Lauraceae), uno de los dos únicos linajes de angiospermas parásitas compuestos exclusivamente por hemiparásitos (Nickrent, 2020). Brokamp et al. (2012) confirmaron experimentalmente el hemiparasitismo en *K. lappacea* al documentar 106 conexiones haustoriales con 18 especies hospederas pertenecientes a 17 géneros y 12 familias botánicas, evidenciando que se trata de un hemiparásito altamente generalista. La ausencia de raíces finas y de pelos radiculares en plantas jóvenes llevó a estos autores a concluir que el hemiparasitismo en la especie es de carácter obligado.

El sistema radicular está conformado por una raíz principal corta y raíces laterales poco ramificadas que se extienden cerca de la superficie del suelo, cubiertas por una corteza gruesa y blanda. Un aspecto de particular interés tecnológico es que la corteza radicular externa es de color rojo oscuro y posee un peridermis con abundante material taninífero; en las raíces más viejas, las células externas del peridermis se suberizan y se llenan de taninos y otras sustancias (Brokamp et al., 2012). Esta localización preferencial de los compuestos fenólicos en la corteza radicular explica que sea precisamente la raíz, y no las partes aéreas, la fracción utilizada como materia prima, y constituye el fundamento anatómico de la selección de dicho órgano para la elaboración de la infusión filtrante objeto de este estudio.

Tabla 1*Clasificación taxonómica de Krameria lappacea*

Categoría	Denominación
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Zygophyllales
Familia	Krameriaceae Dumort.
Género	<i>Krameria</i> Loeft.
Especie	<i>Krameria lappacea</i> (Dombey) Burdet & B.B. Simpson
Sinónimo aceptado	<i>Krameria triandra</i> Ruiz & Pav.
Nombres comunes	Ratania, rhatany, ratanhia
Modo nutricional	Hemiparásita de raíz, obligada
Familia hermana	Zygophyllaceae

Nota. Elaborado con base en Simpson (1989), Brokamp et al. (2012) y Nickrent (2020).

Figura 1

Ejemplar de Krameria lappacea



Nota. Field Museum of Natural History (1957)

2.1.3. Distribución geográfica y hábitat andino

En su ecología y distribución, *Krameria lappacea* se desarrolla en ambientes áridos y semiáridos de los Andes, en suelos pobres y laderas pedregosas de escasa retención hídrica. Se encuentra principalmente en Perú, Bolivia, Chile, norte de Argentina y sur de Ecuador, ocupando un amplio gradiente altitudinal que se extiende desde el nivel del mar hasta los 3600 m s. n. m., aunque las poblaciones más representativas se concentran en el rango comprendido entre los 1500 y 3500 m s. n. m. (Simpson, 1989; Brokamp et al., 2012). La especie muestra adaptaciones características a la sequía, como la pubescencia foliar, que reduce la transpiración, y un sistema radical profundo que le permite sobrevivir en condiciones de marcada estacionalidad hídrica y elevada radiación solar. A estas adaptaciones se suma su condición hemiparásita, pues las conexiones haustoriales con plantas hospederas le facilitan el acceso a agua y nutrientes minerales en ambientes donde otras especies presentan limitaciones severas de establecimiento (Brokamp et al., 2012).

En su hábitat natural, la ratania no solo es el mayor parásito de raíz, sino también el más frecuente en la mayoría de las áreas semidesérticas del Perú (Brokamp et al., 2012). Los estudios de campo realizados por estos autores en el departamento de Arequipa, en las

localidades de Mollebaya (2457 m s. n. m.) y San Antonio de Yarabamba (2545 m s. n. m.) registraron densidades poblacionales de 1 a 24 individuos maduros, confirmando la presencia de poblaciones relativamente abundantes en dicho rango altitudinal.

Dado su amplio espectro de hospederos, *K. lappacea* ejerce influencia sobre el desempeño de la mayor parte de las especies perennes de su hábitat, por lo que ha sido señalada como una probable especie clave del ecosistema (Brokamp et al., 2012). Además de su rol como hemiparásita, brinda cobertura a diversos vertebrados, constituye forraje apetecible para mamíferos silvestres y domésticos, y funciona como planta alimenticia de abejas altamente especializadas colectoras de aceite floral. En consecuencia, la extracción selectiva de la ratania no afecta únicamente a la especie, sino que repercute sobre la vegetación y la fauna asociadas.

Este último punto adquiere especial relevancia por cuanto la totalidad de la materia prima comercializada procede de la recolección destructiva de poblaciones silvestres. Brokamp et al. (2012) reportan que el Perú, principal país exportador, moviliza alrededor de 30 toneladas métricas anuales, lo que equivale a la destrucción de aproximadamente 140 000 a 395 000 plantas por año solo para atender la demanda de exportación. Como resultado, la especie se encuentra catalogada como amenazada y, en varias porciones de su área de distribución, ya se considera comercialmente extinta.

El cultivo se ha planteado como una alternativa para abastecer los mercados nacional e internacional sin comprometer las poblaciones naturales; no obstante, su condición de hemiparásita obligada impone requerimientos particulares, pues exige la disponibilidad de plantas hospederas compatibles, lo que dificulta su domesticación bajo esquemas agronómicos convencionales (Brokamp et al., 2012). En este contexto, se han explorado estrategias de propagación en otras especies del género con potencial extrapolable: McCaughey Espinoza et al. (2023) desarrollaron un protocolo de propagación *in vitro* para *Krameria erecta* a partir de explantes de yema axilar y hoja, alcanzando porcentajes de supervivencia superiores al 97 % en trasplante y de hasta 97 % en vivero, con lo que se demostró la viabilidad de producir plántulas sanas destinadas a la conservación y al establecimiento de plantaciones con fines medicinales. En la misma línea, la evaluación de poblaciones silvestres de *K. erecta* evidenció densidades bajas y una elevada mortalidad asociada a factores bióticos y a la escasa precipitación, lo que refuerza la

necesidad de implementar estrategias de manejo y propagación controlada para las especies del género (Mc Caughey Espinoza et al., 2022).

La estandarización tecnológica del procesamiento de la ratania, objeto de la presente investigación, cobra sentido precisamente en este escenario: la optimización de las condiciones de secado y granulometría permite maximizar el aprovechamiento de cada unidad de materia prima recolectada, reduciendo pérdidas y contribuyendo, indirectamente, a disminuir la presión de extracción sobre las poblaciones naturales.

Tabla 2

Distribución geográfica, hábitat y estado de conservación de Krameria lappacea

Característica	Descripción
Países de distribución	Perú, Bolivia, Chile, norte de Argentina y sur de Ecuador
Rango altitudinal	Desde el nivel del mar hasta 3600 m s. n. m.
Tipo de hábitat	Semidesiertos andinos, suelos pobres y laderas pedregosas
Densidad poblacional registrada	1 a 24 individuos maduros (Arequipa, Perú)
Sitios de estudio de referencia	Mollebaya (2457 m s. n. m.) y San Antonio de Yarabamba (2545 m s. n. m.)
Especies hospederas documentadas	18 especies, 17 géneros, 12 familias botánicas
Conexiones haustoriales excavadas	106
Exportación anual (Perú)	Aproximadamente 30 toneladas métricas
Plantas destruidas por año	140 000 a 395 000 (solo para exportación)
Estado de conservación	Amenazada; comercialmente extinta en parte de su rango

Nota. Elaborado con base en Brokamp et al. (2012).

2.1.4. Usos etnobotánicos y tradicionales

El uso medicinal de la raíz de ratania se remonta a la época precolombina, siendo empleada ancestralmente por las comunidades andinas del Perú y países vecinos (Brokamp et al., 2012). El conocimiento tradicional asociado a esta especie comprende su recolección, preparación y aplicación terapéutica, y ha sido transmitido de generación en generación en el marco de los sistemas de medicina indígena.

Las aplicaciones tradicionales más recurrentes se vinculan directamente con la propiedad astringente conferida por su alto contenido de taninos. Entre ellas destacan el tratamiento de afecciones bucales, inflamación de encías, sangrado gingival y fortalecimiento dental, el manejo de trastornos gastrointestinales, particularmente cuadros diarreicos, y su empleo como cicatrizante natural en heridas y lesiones cutáneas. Aldakheel et al. (2021) confirman que la raíz de ratania ha sido utilizada en los sistemas indígenas de medicina para tratar diversas dolencias comunes, atribuyendo dichos efectos a la presencia de constituyentes bioquímicos astringentes y antivirales de elevada actividad. Estos mismos autores señalan, además, que la raíz aporta una diversidad de elementos nutricionales de relevancia para la salud humana, junto con niveles traza de algunos elementos potencialmente tóxicos, cuya presencia debe ser considerada al establecer los parámetros de inocuidad de cualquier producto destinado al consumo.

La validez del uso tradicional bucal de la ratania ha trascendido el ámbito etnobotánico y cuenta hoy con respaldo clínico. Shirakawa et al. (2021) evaluaron, mediante un ensayo clínico aleatorizado en 74 pacientes con periodontitis, un dentífrico formulado con tintura de ratania al 1,25 %, tintura de manzanilla al 1,25 % y tintura de mirra al 0,62 %. Tras cuatro semanas de aplicación, el grupo tratado mostró mejoras significativas en la profundidad de sondaje, el índice gingival y el sangrado al sondaje ($p < 0,01$), así como una reducción significativa del recuento bacteriano total en saliva, incluyendo bacterias periodontopatógenas. Estos resultados constituyen evidencia clínica de que las propiedades antiinflamatorias, astringentes y antibacterianas atribuidas tradicionalmente a la ratania poseen fundamento científico, y respaldan su seguridad de uso en contacto con la mucosa oral.

Desde el punto de vista comercial, la raíz de ratania se comercializa bajo las denominaciones de *rhatany* o *ratanhia*, y se transa tanto en los mercados locales y nacionales como en el mercado internacional, siendo el Perú el principal país exportador (Brokamp et al., 2012). Su incorporación en formulaciones de higiene oral, tinturas y preparados fitoterapéuticos evidencia una demanda sostenida que, sin embargo, no se ha traducido en el desarrollo de aplicaciones alimentarias estandarizadas.

En efecto, pese a la solidez de su respaldo etnobotánico y clínico, la investigación sobre *K. lappacea* se ha concentrado casi exclusivamente en extractos con fines farmacológicos y cosméticos, permaneciendo prácticamente inexplorada su valorización como materia prima para productos alimentarios listos para el consumo. Esta brecha constituye la oportunidad que aborda la presente investigación: transformar un recurso de reconocido valor terapéutico y cultural en una infusión filtrante estandarizada, tecnológicamente reproducible y sensorialmente aceptable, capaz de revalorizar el conocimiento etnobotánico andino en el marco de la industria de bebidas funcionales.

2.1.5. Composición química

2.1.5.1. Taninos y proantocianidinas

Los taninos constituyen el grupo de metabolitos secundarios más abundante y característico de la raíz de *Krameria lappacea*, y son los principales responsables tanto de su capacidad antioxidante como de su marcada astringencia. En la raíz se ha determinado una concentración de taninos que oscila entre el 8 % y el 18 %, mientras que en la corteza radicular los niveles alcanzan valores cercanos al 40 % (Scholz y Rimpler, 1989; Carini et al., 2002). Esta concentración diferencial confirma que la corteza radicular constituye la fracción de mayor valor tecnológico de la planta.

Los taninos se clasifican en dos grandes grupos: los taninos hidrolizables, derivados del ácido gálico o del ácido elágico esterificados a un núcleo de glucosa, y los taninos condensados o proantocianidinas, formados por la polimerización de unidades flavan-3-ol (Khanbabaee y van Ree, 2001). En el caso de la ratania, la evidencia disponible apunta a un predominio de los taninos condensados. Genovese et al. (2021), mediante cromatografía líquida de ultra alta resolución acoplada a espectrometría de masas de alta

resolución, identificaron en el extracto de raíz la presencia de proantocianidinas de tipo A y de tipo B, además de diversos compuestos flavonoides.

La distinción entre ambos tipos de proantocianidinas es relevante desde el punto de vista funcional. Las proantocianidinas de tipo B se unen mediante un único enlace interflavánico, mientras que las de tipo A presentan un enlace adicional de tipo éter, lo que confiere a la molécula una estructura más rígida. Esta configuración se asocia a una capacidad antiadhesiva superior, propiedad que Genovese et al. (2021) invocan para explicar la inhibición de la adhesión y la formación de biofilm observada frente a cepas de *Staphylococcus aureus* resistentes a la meticilina.

La presencia de las unidades monoméricas constituyentes de estos polímeros ha sido igualmente verificada. Abdel-Gaber, Albeshr, et al. (2025) identificaron epicatequina en el extracto metanólico de raíz mediante cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas con ionización por electrospray, confirmando así la coexistencia de flavan-3-oles libres y de sus formas polimerizadas en la matriz vegetal.

Evidencia adicional procede de estudios realizados sobre otras especies del género. Heredia-Castro et al. (2023), al evaluar el perfil fitoquímico de 17 extractos etanólicos de plantas nativas de Sonora, México, determinaron que el extracto de *Krameria sonora* se encontraba entre los que presentaron las mayores concentraciones de taninos, flavonas y flavonoles, flavanonas y dihidroflavonoles, y ácido clorogénico total, y que dicha riqueza fitoquímica se correspondía con una actividad antimicrobiana efectiva frente a *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* y *Salmonella enterica*. Este hallazgo sugiere que la elevada acumulación de taninos constituye un rasgo compartido dentro del género *Krameria*.

Desde la perspectiva del presente estudio, el elevado contenido de taninos plantea una tensión tecnológica central. Por un lado, los taninos aportan la capacidad antioxidante que sustenta el carácter funcional del producto. Por otro, su interacción con las proteínas ricas en prolina de la saliva genera la sensación de astringencia, atributo sensorial que, en exceso, compromete la aceptabilidad de la infusión (Soares et al., 2020). Dado que la granulometría determina la superficie específica disponible para la extracción, una reducción excesiva del tamaño de partícula incrementaría la liberación de taninos y, con

ella, la astringencia percibida. La búsqueda del equilibrio entre eficacia funcional y aceptación sensorial constituye, por tanto, el problema central que aborda esta investigación.

Tabla 3

Contenido de taninos y proantocianidinas identificados en Krameria lappacea

Componente	Fracción anatómica	Valor o condición reportada
Taninos totales	Raíz (conjunto)	8 % a 18 % ^a
Taninos totales	Corteza radicular	Cercano al 40 % ^a
Proantocianidinas tipo A	Raíz	Presencia confirmada ^b
Proantocianidinas tipo B	Raíz	Presencia confirmada ^b
Epicatequina (unidad monomérica)	Raíz	Presencia confirmada ^c

Nota. La epicatequina constituye la unidad monomérica a partir de la cual se polimerizan las proantocianidinas. ^a Scholz y Rimpler (1989); Carini et al. (2002). ^b Genovese et al. (2021). ^c Abdel-Gaber, Albeshr, et al. (2025).

2.1.5.2. Flavonoides y compuestos fenólicos

Junto a los taninos condensados descritos en el apartado precedente, la raíz de *Krameria lappacea* acumula una fracción de flavonoides y ácidos fenólicos de menor peso molecular, cuya identificación resulta particularmente relevante para el presente estudio por tratarse de compuestos hidrosolubles con mayor aptitud para ser extraídos durante la preparación de una infusión acuosa. Safta et al. (2023) caracterizaron el perfil fenólico del extracto hidroalcohólico de raíz, cuyos resultados se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 4

Perfil de compuestos fenólicos y flavonoides del extracto hidroalcohólico de raíz de Krameria lappacea

Compuesto	Cantidad (mg/ml)
Ácido cafeico	2,31 ± 0.0488
Ácido clorogénico	17,145 ± 0.2864
Ácido gálico	0,88 ± 0.0005
Apigenina	0,04 ± 0.0001
Crisina	0,059 ± 0.0002
Hiperósido	0,3 ± 0.0042
Kaempferol	0,053 ± 0.0004
Luteolina	0,005 ± 0.0001
Luteolina-7-O-glucósido	0,055 ± 0.0001
Miricetina	6,366 ± 0.0579
Naringenina	0,42 ± 0.0012
Pirocatecol	0,09 ± 0.0001
Quercetina	0,04 ± 0.0001
Rutósido	0,345 ± 0.0045
Vitexina	0,055 ± 0.0001

Nota. Adaptado de Safta et al. (2023).

Del perfil presentado se desprenden tres observaciones de interés tecnológico. En primer lugar, el ácido clorogénico constituye el compuesto fenólico mayoritario, con 17,145 mg/ml, seguido por la miricetina (6,366 mg/ml) y el ácido cafeico (2,310 mg/ml). Los ácidos hidroxycinámicos, grupo al que pertenecen tanto el ácido clorogénico como el cafeico, son reconocidos por su elevada capacidad de captación de radicales libres, atribuida a la presencia de grupos hidroxilo en posición orto sobre el anillo aromático. En segundo lugar, la miricetina destaca entre los flavonoles por poseer tres grupos hidroxilo en el anillo B, configuración asociada a una actividad antioxidante superior a la de la quercetina y el kaempferol, presentes en concentraciones considerablemente menores. En tercer lugar, la presencia simultánea de flavonoides en forma libre (quercetina, kaempferol, luteolina, apigenina) y de sus correspondientes glicósidos (rutósido, hiperósido, luteolina-7-O-glucósido, vitexina) resulta relevante para la elaboración de infusiones, dado que las formas glicosiladas presentan mayor solubilidad en agua y, por tanto, una extracción más eficiente durante el proceso de infusión.

Este perfil ha sido corroborado y ampliado mediante análisis por cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas con ionización por electrospray (LC-ESI-MS).

Abdel-Gaber, Albeshr, et al. (2025) reportaron, en el extracto metanólico de raíz de *K. lappacea*, la presencia de alcaloides, compuestos fenólicos (entre ellos antraquinonas y ácidos clorogénicos) y flavonoides, identificando específicamente dihidrokaempferol, epicatequina y fisetina. La detección de epicatequina resulta particularmente significativa, pues se trata de la unidad monomérica constituyente de las proantocianidinas, lo que confirma la coexistencia en la raíz de flavonoides libres y de sus formas polimerizadas.

La presencia de ácido gálico en la raíz ha sido igualmente verificada mediante técnicas independientes. Abdallah et al. (2024) desarrollaron electrodos potenciométricos de pasta de carbono para la cuantificación de ácido gálico y validaron su desempeño en extractos alcohólicos de raíz de *K. lappacea*, junto con té negro y té verde, confirmando la viabilidad de la determinación de este compuesto en matrices vegetales de esta naturaleza sin necesidad de pretratamientos complejos.

Desde la perspectiva del presente estudio, la naturaleza termolábil de buena parte de estos compuestos, en particular los flavonoides y los ácidos hidroxycinámicos, justifica la necesidad de evaluar el efecto de las condiciones de secado sobre su retención. Asimismo, su distribución preferencial en la corteza radicular fundamenta la relevancia del tamaño de partícula como variable de proceso, ya que la reducción granulométrica incrementa la superficie específica disponible para la transferencia de masa durante la infusión.

2.1.5.3. Lignanos y otros metabolitos secundarios

Junto a los taninos y flavonoides, la raíz de *Krameria lappacea* acumula lignanos y neolignanos, compuestos derivados del acoplamiento oxidativo de unidades fenilpropanoides que han sido señalados como responsables de una parte sustancial de la actividad farmacológica atribuida a la especie.

Zabka (2022) llevó a cabo un cribado de 69 especies vegetales con potencial antifúngico y seleccionó 13 de interés, entre las cuales *K. lappacea* resultó la más ventajosa. El análisis de la fracción de extracto más activa, realizado mediante cromatografía de gases y cromatografía líquida acopladas a espectrometría de masas, permitió detectar dos sustancias principales pertenecientes al grupo de los neolignanos, identificadas como análogos de la kramerixina, cuya estructura molecular fue determinada por el autor.

Zabka atribuye a estos neolignanós el modo de acción antifúngico de la especie, destacando además su baja volatilidad como propiedad favorable para el desarrollo de preparados estables.

La presencia de lignanos estructuralmente definidos en el género se encuentra igualmente documentada. Chatpreecha et al. (2020) desarrollaron una síntesis estereoselectiva bioinspirada de tetrahidrofuranos 2,5-diarilo-3,4-dimetilo, tomando como referencia los compuestos naturales de esta clase aislados de *Krameria cystisoides*. Este núcleo de tetrahidrofurano 2,5-diarilo constituye un esqueleto característico de los lignanos del género y refuerza la evidencia de que la biosíntesis de estos metabolitos es un rasgo compartido dentro de Krameriaceae.

Adicionalmente, la caracterización fitoquímica de la raíz ha revelado la presencia de otras clases de metabolitos secundarios. Abdel-Gaber, Albeshr, et al. (2025) identificaron alcaloides y antraquinonas, junto con los compuestos fenólicos y flavonoides ya descritos, ampliando así el espectro de metabolitos reconocidos en la especie.

Cabe señalar, no obstante, una consideración de orden tecnológico relevante para el presente trabajo: los lignanos y neolignanós son compuestos de carácter marcadamente lipofílico, por lo que su extracción se ve favorecida en solventes orgánicos y resulta comparativamente limitada en agua. En consecuencia, en una infusión filtrante preparada con agua caliente cabe esperar que la fracción bioactiva extraída esté dominada por los compuestos hidrosolubles, esto es, taninos, flavonoides glicosilados y ácidos fenólicos, mientras que los lignanos permanecerían mayoritariamente retenidos en el residuo sólido. Esta consideración refuerza la pertinencia de evaluar la capacidad antioxidante directamente sobre la infusión, y no sobre el extracto de la materia prima, tal como se plantea en los objetivos de esta investigación.

2.1.5.4. Composición mineral

Además de su fracción orgánica, la raíz de *Krameria lappacea* presenta un contenido mineral que resulta relevante tanto desde la perspectiva nutricional como desde la de la inocuidad del producto terminado, por cuanto la materia mineral constituye la fracción que se cuantifica como cenizas totales en el análisis proximal. Aldakheel et al. (2021) caracterizaron la composición elemental de la raíz seca mediante espectroscopía de

plasma inducido por láser sin calibración, validando los resultados con espectroscopía de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente y con espectroscopía fotoelectrónica de rayos X. Los valores obtenidos por la técnica de referencia se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 5

Composición elemental de la raíz seca de Krameria lappacea y aporte estimado por sobre filtrante

Elemento	Concentración (mg/kg)	Aporte por sobre de 2 g (mg)	Clasificación
Calcio (Ca)	24 168	48,34	Nutricional
Potasio (K)	2 281	4,56	Nutricional
Magnesio (Mg)	1 150	2,30	Nutricional
Azufre (S)	716	1,43	Nutricional
Silicio (Si)	661	1,32	Nutricional
Aluminio (Al)	609	1,22	Sin función biológica
Hierro (Fe)	573	1,15	Nutricional
Fósforo (P)	258	0,52	Nutricional
Sodio (Na)	136	0,27	Nutricional
Bario (Ba)	93	0,19	Sin función biológica
Titanio (Ti)	26	0,05	Sin función biológica
Manganeso (Mn)	20	0,04	Nutricional
Selenio (Se)	13	0,03	Nutricional
Boro (B)	8	0,02	Nutricional
Cobre (Cu)	7	0,01	Nutricional
Cadmio (Cd)	7	0,01	Potencialmente tóxico
Plomo (Pb)	6	0,01	Potencialmente tóxico
Zinc (Zn)	5	0,01	Nutricional

Nota. Valores determinados mediante espectroscopía de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente sobre raíz seca, tomados de Aldakheel et al. (2021). El aporte por sobre se calculó a partir de la dosificación de 2 g de material seco por unidad, asumiendo transferencia completa del elemento a la infusión, supuesto conservador que sobrestima el aporte real. El cromo no fue detectado por ninguna de las técnicas empleadas. Elaboración propia a partir de los datos de la fuente citada.

El calcio constituye, con amplia diferencia, el elemento mayoritario de la raíz, con una concentración un orden de magnitud superior a la del potasio y el magnesio, que le siguen en abundancia. Aldakheel et al. (2021) atribuyen a esta predominancia del ion calcio una participación directa en las propiedades astringentes características de la especie, por su intervención en los mecanismos de coagulación, lo que ofrece una explicación complementaria a la habitualmente atribuida en exclusiva al contenido de taninos. El perfil se completa con la presencia de fósforo, hierro, manganeso, selenio, cobre, zinc y boro en concentraciones propias de elementos traza, coherentes con la naturaleza radicular del material y con su desarrollo en suelos áridos y pedregosos.

Los mismos autores identificaron, junto a los elementos nutricionales, la presencia de aluminio, bario, titanio, cadmio y plomo, para los cuales no se reconoce una función biológica en el organismo humano, y advierten que las concentraciones de aluminio y de bario en la raíz superan los límites de ingesta tolerable establecidos para dichos elementos, por lo que recomiendan que el uso terapéutico tradicional de la especie se restrinja a dosis bajas y a periodos breves de exposición. Corresponde precisar que dichas concentraciones fueron determinadas sobre la raíz seca y no sobre la infusión acuosa, y que la fracción de estos elementos efectivamente transferida a la bebida durante los cinco minutos de contacto a temperatura de ebullición no ha sido cuantificada, ni en la fuente citada ni en el presente trabajo. La determinación de la transferencia de metales pesados desde la materia prima hacia la infusión constituye, en consecuencia, una línea de investigación necesaria y previa a cualquier propuesta de consumo habitual del producto, y se recoge como tal en el apartado de recomendaciones.

2.1.6. Propiedades funcionales y bioactivas

2.1.6.1. Actividad antioxidante

La capacidad antioxidante de *Krameria lappacea* constituye la propiedad funcional de mayor relevancia para el presente estudio, por cuanto se corresponde directamente con una de sus variables dependientes. Dicha capacidad tiene su fundamento químico en el perfil polifenólico descrito en los apartados precedentes: los taninos condensados, las proantocianidinas, los flavonoides y los ácidos fenólicos actúan como donadores de átomos de hidrógeno y de electrones, neutralizando radicales libres y estabilizando las especies reactivas de oxígeno mediante la deslocalización electrónica del radical fenoxilo resultante en el anillo aromático.

La evidencia experimental disponible sobre la actividad antioxidante de la especie procede fundamentalmente de modelos *in vivo*. Abdel-Gaber et al. (2024) evaluaron el extracto acuoso-metanólico de raíz de *K. lappacea* en un modelo murino de estrés oxidativo inducido por infección con *Eimeria papillata*, y determinaron que el tratamiento incrementó significativamente la actividad de las enzimas antioxidantes catalasa y superóxido dismutasa, al tiempo que redujo los niveles de malondialdehído, marcador de peroxidación lipídica, y de óxido nítrico. Los autores atribuyen expresamente estos efectos a la presencia de compuestos fenólicos y flavonoides en el extracto.

De manera concordante, Alamari et al. (2024) reportaron que un extracto equivalente de la raíz contrarrestó de forma significativa la pérdida de glutatión reducido y de la capacidad antioxidante total inducida por la infección en el tejido yeyunal, y destacaron en sus conclusiones que *K. lappacea* exhibe una actividad antioxidante significativa. En la misma línea, Abdel-Gaber, Alamari, et al. (2025) confirmaron que el tratamiento con el extracto de raíz redujo de manera significativa el daño oxidativo e histológico en el tejido intestinal.

Corresponde señalar, sin embargo, una limitación relevante del estado del arte. Los estudios que documentan la actividad antioxidante de *Krameria lappacea* han sido realizados sobre extractos obtenidos con solventes orgánicos, principalmente metanol y mezclas hidroalcohólicas. Las determinaciones mediante ensayos espectrofotométricos

de uso estandarizado en ciencia de los alimentos existen, aunque son escasas, y se han efectuado igualmente sobre dichos extractos. Abdel-Gaber et al. (2024) cuantificaron, sobre ese mismo extracto acuoso-metanólico, preparado con metanol al 70 %, un contenido de fenoles totales de $214,30 \pm 5,19$ mg de ácido gálico por gramo de peso seco mediante el método de Folin-Ciocalteu, y un contenido de flavonoides totales de $47,40 \pm 3,20$ mg de quercetina por gramo, además de evaluar su capacidad de captación del radical DPPH. Por su parte, Zegarra (2022) determinó mediante el mismo método DPPH la capacidad antioxidante del extracto de raíz de ratania junto con la de otras cuatro especies vegetales nativas, obteniendo un 35,79 % de inhibición del radical, valor que situó a la especie en el segundo lugar del conjunto evaluado, por detrás de la uña de gato (*Uncaria tomentosa*, 65,04 %) y muy por encima del camu camu (*Myrciaria dubia*, 6,05 %), el maíz morado (*Zea mays*, 4,92 %) y la cúrcuma (*Curcuma longa*, 3,12 %).

No se han identificado, en cambio, determinaciones realizadas sobre infusiones acuosas de la especie, que constituyen la forma real de consumo del producto propuesto, ni estudios que evalúen el efecto de las condiciones de secado y de la granulometría sobre dicha capacidad. Esta ausencia reviste importancia práctica, dado que el rendimiento de extracción de compuestos antioxidantes depende críticamente del solvente empleado: los extractos metanólicos e hidroalcohólicos recuperan tanto compuestos polares como moderadamente apolares, mientras que la infusión acuosa, preparada a temperatura de ebullición y en tiempos breves de contacto, moviliza selectivamente la fracción hidrosoluble. En consecuencia, los valores de actividad antioxidante reportados para extractos orgánicos no son directamente extrapolables a una infusión filtrante.

El presente trabajo aborda precisamente este vacío, al determinar la capacidad antioxidante de la infusión filtrante de ratania en función de las condiciones de secado y de la granulometría de la materia prima, generando así datos de referencia inexistentes hasta la fecha para esta matriz alimentaria.

Tabla 6

Efecto del extracto de raíz de Krameria lappacea sobre marcadores de estrés oxidativo en modelo murino

Marcador	Efecto del tratamiento
Catalasa (CAT)	Incremento significativo ^a
Superóxido dismutasa (SOD)	Incremento significativo ^a
Malondialdehído (MDA)	Reducción significativa ^a
Óxido nítrico (NO)	Reducción significativa ^a
Óxido nítrico sintasa inducible (iNOS)	Reducción de 3,63 a 1,46 veces ^a
Glutación reducido (GSH)	Pérdida contrarrestada significativamente ^b
Capacidad antioxidante total	Pérdida contrarrestada significativamente ^b

Nota. Resultados obtenidos con extracto acuoso-metanólico de raíz administrado a 200 mg/kg en un modelo murino de estrés oxidativo inducido por *Eimeria papillata*.

^a Abdel-Gaber et al. (2024). ^b Alamari et al. (2024).

2.1.6.2. Actividad antimicrobiana

La actividad antimicrobiana constituye una de las propiedades bioactivas mejor documentadas de *Krameria lappacea*, y encuentra su fundamento químico en el elevado contenido de taninos, proantocianidinas y flavonoides descrito en los apartados precedentes. El mecanismo de acción propuesto para estos compuestos comprende la interacción con proteínas de la pared y la membrana bacteriana, la quelación de iones metálicos esenciales para el metabolismo microbiano y la interferencia con los procesos de adhesión celular.

Genovese et al. (2021) evaluaron el extracto de raíz de *K. lappacea* frente a cepas de *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina (MRSA), un patógeno de relevancia clínica por su multirresistencia. Mediante el método de microdilución en caldo, los autores determinaron la concentración mínima inhibitoria del biofilm y la concentración mínima de erradicación del biofilm, y evaluaron adicionalmente el efecto del extracto sobre la adhesión e invasión de la línea celular de carcinoma pulmonar humano A549. Los resultados evidenciaron que el extracto inhibió eficazmente el crecimiento bacteriano, la formación de biofilm y los procesos de adhesión e invasión de las cepas

MRSA. El análisis químico realizado por los mismos autores mediante cromatografía líquida de ultra alta resolución acoplada a espectrometría de masas de alta resolución reveló la presencia de diversos flavonoides y de proantocianidinas de tipo A y de tipo B, compuestos reconocidos por sus efectos antiadhesivos, lo que aporta una explicación mecanística a la actividad observada.

En una línea concordante, Abdel-Gaber, Albeshr, et al. (2025) evaluaron el extracto metanólico de raíz frente a bacterias grampositivas y gramnegativas mediante los métodos de difusión en pozo de agar y microdilución en caldo. Los microorganismos más susceptibles fueron *Staphylococcus aureus* y *Listeria monocytogenes*, ambos grampositivos, mientras que *Escherichia coli* y *Salmonella enterica*, de naturaleza gramnegativa, mostraron mayor resistencia, con actividad únicamente moderada del extracto. Esta selectividad hacia bacterias grampositivas constituye un patrón recurrente en extractos ricos en polifenoles y se atribuye a la estructura de la envoltura celular: la membrana externa lipopolisacáridica de las bacterias gramnegativas actúa como barrera de permeabilidad que restringe el acceso de los compuestos fenólicos a sus dianas intracelulares. Cabe destacar que tanto *S. aureus* como *L. monocytogenes* son patógenos de importancia en inocuidad alimentaria, lo que confiere a esta propiedad un valor añadido en el contexto del desarrollo de productos alimentarios.

La actividad antimicrobiana de la especie se extiende también al ámbito fúngico. Zabka (2022), tras evaluar 69 especies vegetales y seleccionar 13 de interés potencial, identificó a *K. lappacea* como la más ventajosa del conjunto, con un rendimiento de extracción del 17,6 % y concentraciones mínimas inhibitorias (MIC₅₀) comprendidas entre 0,11 y 1,24 mg/ml frente a hongos filamentosos patógenos y toxigénicos. El autor destaca que dicha eficacia resulta comparable a la de aceites esenciales de alto costo o a la de compuestos fenólicos activos aislados, y subraya el amplio espectro antifúngico, la inocuidad y la baja volatilidad de los compuestos responsables. Esta propiedad reviste interés directo para la conservación de infusiones filtrantes, dado que los hongos filamentosos y las micotoxinas asociadas constituyen uno de los principales riesgos de inocuidad en productos vegetales deshidratados.

Finalmente, Safta et al. (2023) confirmaron la actividad antimicrobiana del extracto hidroalcohólico de raíz de *K. lappacea*, tanto de manera individual como en combinación

sinérgica con extractos de *Hamamelis virginiana* y *Salix alba*, mediante los ensayos de difusión en pozo de agar y microdilución en caldo, observando una eficacia significativamente superior de la mezcla frente a *S. aureus*. De particular relevancia para el consumo humano resulta el hecho de que ninguno de los extractos evaluados, incluido el de ratania, presentó citotoxicidad *in vitro* frente a queratinocitos humanos en el rango de concentraciones ensayado, lo que respalda su perfil de seguridad.

En síntesis, la evidencia disponible permite afirmar que la ratania posee una actividad antimicrobiana de amplio espectro, con eficacia demostrada frente a bacterias grampositivas de relevancia alimentaria y frente a hongos filamentosos, sin manifestar citotoxicidad en las concentraciones evaluadas. Esta propiedad, sustentada en su perfil polifenólico, aporta un atributo funcional adicional a la infusión filtrante y contribuye potencialmente a la estabilidad microbiológica del producto durante su almacenamiento.

Tabla 7

Actividad antimicrobiana y antifúngica reportada para extractos de Krameria lappacea

Microorganismo o ensayo	Resultado
<i>Staphylococcus aureus</i>	Alta susceptibilidad ^a
<i>Listeria monocytogenes</i>	Alta susceptibilidad ^a
<i>Escherichia coli</i>	Actividad moderada ^a
<i>Salmonella enterica</i>	Actividad moderada ^a
<i>S. aureus</i> resistente a meticilina (MRSA)	Inhibición del crecimiento, de la formación de biofilm y de la adhesión ^b
Hongos filamentosos patógenos y toxigénicos	MIC ₅₀ de 0,11 a 1,24 mg/mL ^c
Rendimiento de extracción	17,6 % ^c
Citotoxicidad en queratinocitos humanos	Ausente en el rango de concentraciones evaluado ^d
Sinergia con <i>Hamamelis virginiana</i> y <i>Salix alba</i>	Eficacia superior frente a <i>S. aureus</i> ^d

Nota. MIC₅₀ = concentración mínima inhibitoria del 50 % de las cepas evaluadas.

^a Abdel-Gaber, Albeshr, et al. (2025). ^b Genovese et al. (2021). ^c Zabka (2022). ^d Safta et al. (2023).

2.1.6.3. Actividad antiinflamatoria y cicatrizante

La actividad antiinflamatoria de *Krameria lappacea* ha sido documentada mediante la cuantificación de mediadores moleculares específicos de la respuesta inflamatoria, lo que aporta fundamento mecanístico a su uso tradicional en el tratamiento de afecciones bucales, gastrointestinales y cutáneas.

Abdel-Gaber, Alamari, et al. (2025) evaluaron el efecto del extracto acuoso-metanólico de raíz sobre la inflamación yeyunal en un modelo murino. La infección con *Eimeria papillata* indujo un incremento marcado de las citoquinas proinflamatorias interleucina-1 β , interleucina-6 y factor de necrosis tumoral alfa, cuyos niveles proteicos alcanzaron aproximadamente $13,67 \pm 2,07$; $78,98 \pm 4,17$ y $222,28 \pm 10,18$ pg/ml, respectivamente, acompañado de una elevación del puntaje histológico inflamatorio y de una mayor infiltración de neutrófilos y linfocitos. El tratamiento con el extracto de raíz modificó significativamente todos los parámetros asociados a la infección, reduciendo de manera sustancial la inflamación y el daño histológico del tejido.

Los mecanismos moleculares subyacentes fueron precisados por Abdel-Gaber et al. (2024), quienes demostraron que el extracto disminuyó la infiltración de macrófagos en el tejido yeyunal, así como la presencia de linfocitos T CD4 y la activación del factor nuclear kappa B, regulador maestro de la respuesta inflamatoria. Asimismo, el tratamiento redujo la expresión del óxido nítrico sintasa inducible de 3,63 a 1,46 veces respecto del control, y disminuyó la expresión de las citoquinas proinflamatorias interferón gamma, factor nuclear kappa B e interleucina-10 en 1,63; 1,64 y 1,38 veces, respectivamente. La inhibición de la vía del factor nuclear kappa B constituye un mecanismo antiinflamatorio ampliamente reconocido para los compuestos polifenólicos, lo que resulta coherente con el perfil químico de la especie.

En cuanto a la actividad cicatrizante, esta se explica principalmente por la acción astringente de los taninos. Al interactuar con las proteínas de los tejidos expuestos, los taninos inducen su precipitación y forman una capa protectora sobre la superficie

lesionada, lo que reduce la exudación, limita la colonización microbiana y favorece la reparación tisular (de Jesus et al., 2012). Esta propiedad, sumada a la actividad antimicrobiana, fundamenta el empleo ancestral de la raíz de ratania como cicatrizante natural.

La validez clínica de estas propiedades quedó demostrada por Shirakawa et al. (2021) en un ensayo aleatorizado con pacientes con periodontitis, en el que un dentífrico formulado con tintura de ratania al 1,25 % produjo mejoras significativas en el índice gingival y en el sangrado al sondaje tras cuatro semanas de aplicación, evidenciando así el efecto antiinflamatorio de la especie sobre la mucosa oral humana.

Es preciso señalar, no obstante, que la evidencia antiinflamatoria disponible se sustenta en modelos animales y en aplicaciones tópicas, empleando extractos concentrados administrados en dosis del orden de 200 mg/kg. La extrapolación directa de estos efectos al consumo de una infusión filtrante, en la que la dosis de compuestos bioactivos es considerablemente menor y la matriz es acuosa, excede el alcance de la presente investigación. En este trabajo, dichas propiedades se consideran como respaldo del potencial funcional de la materia prima y como fundamento de su seguridad de consumo, evaluándose de manera directa únicamente la capacidad antioxidante de la infusión, conforme a los objetivos planteados.

Tabla 8

Mediadores inflamatorios modulados por el extracto de raíz de Krameria lappacea

Mediador	Nivel en el grupo infectado	Efecto del tratamiento
Interleucina-1β	13,67 $\pm$ 2,07 pg/mL	Reducción significativa ^a
Interleucina-6	78,98 $\pm$ 4,17 pg/mL	Reducción significativa ^a
Factor de necrosis tumoral alfa	222,28 $\pm$ 10,18 pg/mL	Reducción significativa ^a
CXCL10 (ARNm)	Aumento de 2,83 veces	Reducción significativa ^a
IFi202b (ARNm)	Aumento de 3,55 veces	Reducción significativa ^a
SPP-1 (ARNm)	Aumento de 3,07 veces	Reducción significativa ^a
Interferón gamma	No reportado	Reducción de 1,63 veces ^b
Factor nuclear kappa B	No reportado	Reducción de 1,64 veces ^b

Nota. Valores correspondientes a tejido yeyunal de ratones C57BL/6 infectados con *Eimeria papillata* y tratados con extracto de raíz a 200 mg/kg.

^a Abdel-Gaber, Alamari, et al. (2025). ^b Abdel-Gaber et al. (2024).

2.1.6.4. Actividad citotóxica sobre líneas celulares tumorales

Una línea de investigación reciente ha evaluado el efecto de los extractos de *Krameria lappacea* sobre líneas celulares tumorales humanas. Al-Oqail (2021) ensayó cuatro extractos de la especie, obtenidos con éter de petróleo, cloroformo, acetato de etilo y etanol, sobre la línea celular de cáncer de mama humano MCF-7, expuesta a concentraciones comprendidas entre 10 y 1 000 μ g/mL durante 24 horas. En el intervalo de 250 a 1 000 μ g/mL, la viabilidad celular descendió entre un 44 % y un 90 % con el extracto de éter de petróleo, el más activo de los cuatro evaluados.

El mismo autor caracterizó el mecanismo subyacente. El extracto de éter de petróleo, a la concentración de 1 000 μ g/mL, incrementó la peroxidación lipídica en un 91 % y la generación de especies reactivas de oxígeno en 2,2 veces, al tiempo que redujo el glutatión reducido en un 59 % y el potencial de membrana mitocondrial en un 68 %, con activación de las caspasas 3 y 9. De manera concordante, Abdel-Gaber, Albeshr, et al. (2025) determinaron para el extracto metanólico de raíz, mediante ensayo de reducción de bromuro de metiltiazolildifeniltetrazolio, concentraciones inhibitorias medias de 64,81

$\pm 0,26 \mu\text{g/mL}$ sobre la línea MCF-7 de cáncer de mama y de $142,27 \pm 1,02 \mu\text{g/mL}$ sobre la línea A549 de cáncer pulmonar, lo que indica una mayor sensibilidad de la línea mamaria.

Estos hallazgos requieren una precisión conceptual indispensable para su correcta interpretación. El mecanismo de muerte celular descrito es de naturaleza prooxidante y no antioxidante, dado que el extracto indujo la muerte de las células tumorales precisamente mediante la elevación de las especies reactivas de oxígeno, comportamiento aparentemente opuesto al descrito en el apartado sobre actividad antioxidante. Esta aparente contradicción encuentra explicación en el comportamiento dual de los compuestos fenólicos. Mileo y Miccadei (2016) documentan que numerosos polifenoles anticancerígenos provocan la detención del crecimiento celular mediante la inducción de una senescencia prematura dependiente de especies reactivas de oxígeno, de modo que el nivel intracelular de estas determina el sentido del efecto: concentraciones elevadas inducen daño al ADN y muerte celular, mientras que concentraciones bajas se asocian a alteraciones epigenéticas y a detención del crecimiento de tipo senescente. La actividad antioxidante en tejido normal y la actividad citotóxica prooxidante en tejido tumoral constituyen, por tanto, manifestaciones de un mismo perfil químico bajo condiciones redox distintas, y no resultados contradictorios.

Corresponde señalar, con igual claridad, que la totalidad de esta evidencia se obtuvo con extractos preparados en solventes orgánicos y ensayados a concentraciones del orden de los cientos de microgramos por mililitro, condiciones que no son reproducibles mediante una infusión acuosa. Los resultados descritos sustentan el interés farmacológico de la especie y respaldan la pertinencia de evaluar su potencial funcional, pero no autorizan extrapolación alguna de dosis desde el cultivo celular hacia el consumo humano de la bebida.

2.2. Infusión filtrante

2.2.1. Definición

Una infusión filtrante es un producto constituido por material vegetal seco, preferiblemente triturado o molido, contenido en bolsas o sobres filtrantes de papel u otro material adecuado, que al ser sumergido o puesto en contacto con agua caliente libera los compuestos solubles del vegetal (Benzie y Wachtel, 2011; Corilla et al., 2021). Este formato surge como una evolución de las tisanas y tés tradicionales, y ofrece ventajas de practicidad, dosificación uniforme e inocuidad, al tiempo que facilita la conservación y la estandarización de los compuestos presentes en la materia prima (Vuong et al., 2022).

A diferencia de las infusiones sueltas, el formato filtrante garantiza un control más preciso de la cantidad de producto empleada en cada preparación, lo que lo convierte en la presentación más difundida en la industria moderna de infusiones funcionales (Bassi et al., 2020). Esta característica reviste particular importancia en el desarrollo de productos con propiedades funcionales, dado que la reproducibilidad de la dosis de compuestos bioactivos aportada por cada unidad de consumo constituye un requisito indispensable para sustentar cualquier declaración de propiedad saludable. En el presente estudio, esta consideración fundamenta la elección de un sobre filtrante de 2 g como unidad de dosificación, según se detalla en el flujo de elaboración propuesto.

2.2.2. Historia y evolución del consumo de infusiones

El consumo de infusiones tiene raíces milenarias y se encuentra estrechamente vinculado a la salud y a la cultura de diversas sociedades. En China, los registros más antiguos evidencian que el té fue utilizado inicialmente como un recurso terapéutico destinado a la prevención y al tratamiento de enfermedades. Originario de China, el té y su cultivo se difundieron por el mundo a partir de mediados de la dinastía Tang. Durante los aproximadamente 300 años que abarcó la dinastía Tang (618 a 907 d. C.), la industria del té experimentó un desarrollo acelerado, estrechamente relacionado con los efectos promotores de la salud atribuidos a la bebida; en ese periodo se publicó el Clásico del Té, escrito por Lu Yu, considerado el libro más antiguo del mundo sobre la materia. Posteriormente, durante la dinastía Song (960 a 1279 d. C.), el cultivo del té alcanzó tal difusión en el sur de China que hacia el siglo XII se extendía por cerca de tres cuartas

partes del territorio chino (Chen y Lin, 2015). De este modo, el té dejó de ser un producto exclusivamente medicinal y se incorporó a la vida cotidiana, consolidándose como una práctica social y ritual que posteriormente se expandió hacia Japón, Corea y otras regiones del este asiático bajo la influencia cultural y religiosa de la época.

En siglos posteriores, el consumo de té se extendió a Europa a través de las rutas comerciales establecidas por las potencias coloniales. A partir del siglo XVII, esta bebida adquirió un estatus de prestigio entre las élites europeas, antes de consolidarse como un producto de consumo masivo en la sociedad moderna. Con esta expansión, las infusiones se diversificaron y el concepto trascendió al de las tisanas y bebidas herbales, integrando una amplia gama de especies vegetales con fines medicinales, culturales y gastronómicos. En la actualidad, el consumo de infusiones abarca tanto el té tradicional como una variedad de preparaciones herbales que forman parte de la industria moderna de bebidas, las cuales han evolucionado hacia presentaciones estandarizadas, más prácticas y seguras, en respuesta a las demandas de un mercado global que busca productos naturales, funcionales y culturalmente significativos (Alkatib et al., 2024).

Esta trayectoria histórica resulta especialmente pertinente para el presente trabajo, por cuanto la ratania comparte con el té un origen medicinal y un arraigo cultural profundo, si bien su recorrido se ha detenido en la etapa de uso tradicional sin haber transitado hacia formatos alimentarios estandarizados. La presente investigación se orienta precisamente a completar ese tránsito.

2.2.3. Clasificación y tipos de infusiones

Las bebidas obtenidas por extracción acuosa de material vegetal admiten diversos criterios de clasificación, cuya comprensión resulta indispensable para situar correctamente el producto desarrollado en la presente investigación.

Según el origen botánico. La distinción fundamental separa al té verdadero de las tisanas o infusiones herbales. El té propiamente dicho procede de manera exclusiva de las hojas de *Camellia sinensis*, especie originaria de China cuyo cultivo se ha difundido a nivel mundial (Chen y Lin, 2015). Las variedades comerciales del té verdadero (verde, negro, oolong y blanco) no corresponden a especies distintas, sino a diferentes grados de oxidación enzimática aplicados durante el procesamiento poscosecha de la hoja. Por el

contrario, las tisanas o infusiones herbales se elaboran a partir de cualquier otra especie vegetal, y su denominación como té constituye, en rigor técnico, una imprecisión de uso extendido. La infusión de ratania objeto de este estudio pertenece, por tanto, a la categoría de las infusiones herbales.

Según la parte de la planta empleada. Las infusiones pueden formularse a partir de hojas, flores, frutos, semillas, cortezas o raíces. Este criterio no es meramente descriptivo, sino que condiciona de manera directa la técnica de extracción requerida, dado que la estructura anatómica del tejido determina la resistencia a la transferencia de masa. Los tejidos foliares y florales, de estructura laxa y paredes celulares delgadas, liberan sus compuestos solubles con facilidad. En cambio, las raíces y cortezas son tejidos leñosos y densos, con paredes celulares lignificadas que oponen una resistencia considerablemente mayor a la difusión de los solutos hacia el medio acuoso. La infusión filtrante de ratania se elabora a partir de raíz, lo que la ubica en esta segunda categoría.

Según el método de extracción. Se distinguen tres técnicas fundamentales. La infusión consiste en verter agua a temperatura próxima a la ebullición sobre el material vegetal previamente reducido de tamaño, dejándolo reposar durante un tiempo breve. La decocción implica someter el material a ebullición sostenida en agua durante un periodo prolongado, y se emplea tradicionalmente para tejidos leñosos como raíces y cortezas. La maceración, por su parte, consiste en el contacto del material con agua a temperatura ambiente durante periodos que pueden extenderse por varias horas.

La elección del método no es indiferente respecto del perfil de compuestos extraídos. Jäger et al. (2011) demostraron experimentalmente, empleando muérdago como modelo, que la infusión y la maceración generan perfiles de sustancias claramente distintos: mientras que los derivados de fenilpropano fueron extraídos completamente por ambos métodos, la infusión recuperó el 43 % de las sustancias de tipo flavonoide frente a solo el 31 % obtenido por maceración; en sentido inverso, la maceración extrajo el 43 % de las lectinas, que resultaron térmicamente inactivadas durante la infusión. Los mismos autores recogen el pronunciamiento del Comité de Medicamentos a base de Plantas de la Agencia Europea de Medicamentos, según el cual el método de preparación y la concentración de la infusión herbal pueden resultar determinantes, dado que preparaciones distintas pueden ejercer acciones diferentes e incluso presentar perfiles de seguridad distintos.

Esta constatación tiene una implicación directa para el presente trabajo. Si bien la raíz, por su naturaleza leñosa, correspondería tradicionalmente a una preparación por decocción, la formulación en sobre filtrante impone necesariamente la extracción por infusión, que es la práctica de consumo real de este formato. La reducción granulométrica de la materia prima constituye, precisamente, el recurso tecnológico mediante el cual se compensa la mayor resistencia a la transferencia de masa propia del tejido radicular, al incrementar la superficie específica de contacto entre el sólido y el agua. Ello confiere a la granulometría el carácter de variable crítica del proceso, y fundamenta su inclusión como variable independiente en esta investigación.

Tabla 9

Comparación de los métodos de extracción acuosa aplicados a material vegetal y su efecto sobre la recuperación de compuestos

Método	Temperatura	Duración	Aplicación tradicional	Recuperación de flavonoides	Recuperación de lectinas
Infusión	Próxima a ebullición	Breve (minutos)	Hojas y flores	43 %	Inactivadas térmicamente
Decocción	Ebullición sostenida	Prolongada	Raíces y cortezas	No evaluada	No evaluada
Maceración	Ambiente	Varias horas	Compuestos termolábiles	31 %	43 %

Nota. Los porcentajes de recuperación corresponden a datos experimentales obtenidos con muérdago como modelo; los derivados de fenilpropano fueron extraídos completamente tanto por infusión como por maceración. La decocción no fue evaluada en el estudio de referencia. Adaptado de Jäger et al. (2011).

2.2.4. Alimentos y bebidas funcionales

El concepto de alimento funcional se originó en Japón durante la década de 1980, cuando las agencias gubernamentales comenzaron a aprobar alimentos con beneficios sanitarios verificados. Desde entonces, la categoría ha adquirido reconocimiento científico, regulatorio y comercial a escala internacional. Organismos internacionales como la EFSA, la FDA y la OMS definen los alimentos funcionales como aquellos que contienen

componentes bioactivos capaces de contribuir a la prevención y al manejo de enfermedades crónicas no transmisibles, entre ellas la enfermedad cardiovascular, la diabetes tipo 2 y determinados cánceres (Fekete et al., 2025).

Un elemento central de la definición es que el beneficio debe situarse más allá del valor nutricional básico del alimento. Es decir, no basta con que el producto aporte energía, macronutrientes o micronutrientes; se requiere la presencia de compuestos bioactivos que ejerzan un efecto fisiológico demostrable. Entre dichos compuestos figuran los polifenoles, la fibra dietética total, los probióticos, los carotenoides y los ácidos grasos poliinsaturados, entre otros (Fekete et al., 2025).

Los alimentos funcionales se clasifican en dos grandes categorías. Los alimentos funcionales naturales comprenden productos no procesados, como frutas, frutos secos, verduras y granos enteros, naturalmente ricos en nutrientes esenciales, fibra, antioxidantes y fitoquímicos. Los alimentos funcionales procesados, en cambio, son sometidos a modificaciones deliberadas de su composición, tales como el enriquecimiento, la fortificación o la reducción de determinados ingredientes, con el objeto de incrementar su potencial bioactivo (Fekete et al., 2025).

Conviene distinguir el alimento funcional del nutracéutico. Mientras que el alimento funcional se consume como parte de la dieta habitual y conserva la forma de un alimento convencional, el nutracéutico consiste en compuestos bioactivos aislados y purificados, administrados en formulaciones de tipo farmacéutico, tales como cápsulas, polvos o comprimidos. En algunos casos ambas categorías se superponen, particularmente en el caso de extractos concentrados, suplementos dietéticos y formulaciones ricas en antioxidantes (Fekete et al., 2025).

Desde el punto de vista regulatorio, la formulación de declaraciones de propiedades saludables se encuentra sujeta a marcos normativos estrictos. En la Unión Europea, el Reglamento (CE) n.º 1924/2006 establece que las declaraciones nutricionales y de propiedades saludables solo pueden utilizarse en el etiquetado, la presentación y la publicidad de los alimentos cuando se ajustan a sus disposiciones, y exige que se fundamenten en pruebas generalmente aceptadas por la comunidad científica, correspondiendo a la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria la evaluación de dicho

fundamento científico (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2006). Esta exigencia probatoria explica la relevancia de generar datos experimentales rigurosos sobre la capacidad antioxidante de los productos que aspiran a esta categoría.

Las bebidas funcionales constituyen uno de los segmentos de mayor crecimiento dentro de esta categoría, y las infusiones herbales ocupan en él una posición privilegiada. Su matriz acuosa, su bajo aporte calórico, su ausencia de aditivos y su elevada carga de compuestos fenólicos hidrosolubles las convierten en un vehículo idóneo para la incorporación de bioactivos a la dieta cotidiana. Este posicionamiento se inscribe en el paradigma emergente del alimento como medicina, que refleja un desplazamiento en el discurso público y científico según el cual el alimento no constituye únicamente una fuente de energía y nutrientes esenciales, sino también un potencial vehículo de prevención de enfermedades e intervención terapéutica (Fekete et al., 2025).

En este contexto se inscribe la propuesta de la presente investigación. La infusión filtrante de ratania, en tanto alimento funcional natural formulado a partir de una especie nativa rica en compuestos fenólicos, se ajusta plenamente a la definición internacional de la categoría, siempre que su capacidad antioxidante sea cuantificada mediante metodologías estandarizadas y que su proceso de elaboración garantice la reproducibilidad de la dosis de bioactivos aportada por cada unidad de consumo.

2.2.4.1. Estrés oxidativo y capacidad antioxidante de la dieta

El fundamento fisiológico que sustenta el interés por los alimentos con capacidad antioxidante reside en el fenómeno del estrés oxidativo, definido como el desequilibrio entre la producción de especies reactivas de oxígeno y la capacidad de los sistemas de defensa antioxidante del organismo para neutralizarlas. Cuando dicho desequilibrio se sostiene en el tiempo, las especies reactivas atacan los lípidos de membrana, las proteínas estructurales y enzimáticas y el material genético celular. Mileo y Miccadei (2016) señalan que el inicio y la progresión del cáncer se han vinculado al estrés oxidativo por la vía del incremento de mutaciones del ADN, la inducción de daño genético, la inestabilidad genómica y la proliferación celular, de modo que los agentes antioxidantes pueden interferir con la carcinogénesis.

Sobre esta base conceptual, la nutrición humana ha desarrollado el indicador de capacidad antioxidante total de la dieta, que integra el aporte de todos los compuestos con actividad reductora presentes en los alimentos consumidos y se expresa habitualmente en milimoles de equivalentes de Trolox por día. Parohan et al. (2019), mediante una revisión sistemática y un metaanálisis de dosis-respuesta sobre cinco estudios de cohorte prospectivos que reunieron 226 297 individuos, determinaron una asociación inversa significativa entre dicho indicador y la mortalidad por todas las causas, por cáncer y por enfermedades cardiovasculares, y establecieron que un incremento de 5 mmol por día en la capacidad antioxidante total de la dieta se asocia con reducciones del riesgo de mortalidad por todas las causas comprendidas entre el 7 % y el 15 %, según el método de estimación empleado.

Este marco cuantitativo permite dimensionar la contribución de un alimento concreto al conjunto de la dieta y constituye la referencia sobre la cual se evalúa, en el capítulo de resultados, el aporte antioxidante de la infusión filtrante desarrollada.

2.2.5. Importancia de las infusiones filtrantes como alimentos funcionales

Las infusiones filtrantes constituyen una de las formas más difundidas y accesibles de consumo de alimentos funcionales, ya que aportan compuestos bioactivos capaces de generar efectos positivos en la salud más allá de la nutrición básica. Diversos estudios han demostrado que el consumo regular de infusiones ricas en polifenoles y flavonoides favorece la reducción del estrés oxidativo y mejora la capacidad antioxidante total del organismo, lo que contribuye a la prevención de enfermedades crónicas no transmisibles (Gallia et al., 2024; Etheridge y Derbyshire, 2020). Asimismo, se ha reportado que estas bebidas influyen en la regulación del metabolismo de la glucosa y de los lípidos, disminuyendo factores de riesgo asociados al síndrome metabólico, tales como la hiperglucemia, la dislipidemia y la hipertensión arterial (Xiao et al., 2024).

Además de sus efectos metabólicos, las infusiones filtrantes poseen propiedades antiinflamatorias y gastrointestinales que favorecen la digestión, modulan el microbiota intestinal y protegen la mucosa frente a procesos inflamatorios (Suhana et al., 2021). Su relevancia reside también en la facilidad de consumo, el bajo costo y la aceptación cultural, atributos que las convierten en alternativas viables para ser incorporadas de

manera cotidiana en la dieta y, de este modo, fortalecer la prevención primaria en salud pública.

En este marco, la ratania reúne las condiciones para integrarse a esta categoría de productos. Su perfil polifenólico, dominado por taninos condensados, proantocianidinas, flavonoides y ácidos fenólicos, coincide con el de los compuestos bioactivos a los que se atribuyen los efectos funcionales antes señalados. La formulación de una infusión filtrante de ratania permitiría, por tanto, canalizar dicho potencial hacia un formato de consumo cotidiano, accesible y culturalmente aceptado, siempre que se garanticen la estandarización tecnológica del proceso y la aceptabilidad sensorial del producto, aspectos que constituyen el objeto de la presente investigación.

2.2.6. Mecanismos de extracción de compuestos bioactivos durante la infusión

La preparación de una infusión filtrante constituye, desde el punto de vista de la ingeniería de procesos, una operación de extracción sólido-líquido o lixiviación, en la que los compuestos solubles contenidos en la matriz vegetal se transfieren hacia el agua caliente que actúa como solvente. Dhekne y Patwardhan (2020) modelaron matemáticamente este proceso en bolsas filtrantes y establecieron que la cinética de infusión resulta del efecto combinado de la resistencia a la difusión interna dentro de la partícula y de la resistencia a la transferencia de masa en la capa límite que la rodea, siendo la difusión interna el paso limitante de la velocidad global del proceso.

De acuerdo con el modelo desarrollado por estos autores, los factores que gobiernan la cinética de infusión en un sobre filtrante son la carga de material vegetal contenida en la bolsa, el tamaño de partícula, la temperatura del agua y la frecuencia de agitación (Dhekne y Patwardhan, 2020). Farakte et al. (2016) demostraron específicamente el papel determinante del tamaño de partícula en el proceso de infusión, al establecer que la reducción granulométrica incrementa la superficie específica disponible para la transferencia de masa y acorta el camino difusional que deben recorrer los solutos, con el consiguiente aumento de la velocidad de extracción.

La evidencia experimental confirma la relevancia práctica de estas condiciones sobre la calidad funcional del producto. Vuong et al. (2022) evaluaron el efecto de distintas técnicas de preparación sobre la extractabilidad de polifenoles a partir de una bolsa

filtrante de infusión herbal, y determinaron que el tiempo de infusión en agua caliente afectó de manera significativa tanto la extractabilidad de los polifenoles como la actividad antioxidante de la bebida obtenida, concluyendo que dichas técnicas ejercen un impacto sustancial sobre la disponibilidad efectiva de compuestos bioactivos en una taza de infusión. En la misma línea, Jäger et al. (2011) demostraron que el método de extracción empleado condiciona el perfil de compuestos recuperados, dado que la infusión con agua caliente extrajo el 43 % de las sustancias de tipo flavonoide, frente al 31 % obtenido mediante maceración a temperatura ambiente.

Estos mecanismos fundamentan directamente el diseño experimental de la presente investigación. La granulometría opera sobre la superficie específica de contacto sólido-líquido, incrementando el rendimiento de extracción en el tiempo breve que caracteriza a la preparación de una infusión (Farakte et al., 2016); no obstante, dado que los taninos son los responsables de la astringencia por su interacción con las proteínas salivales, un aumento excesivo de la extracción puede comprometer la aceptabilidad sensorial del producto (Soares et al., 2020). Por su parte, las condiciones de secado determinan la concentración inicial y la integridad química de los compuestos bioactivos disponibles en la matriz, fijando el techo máximo de extracción alcanzable (Vuong et al., 2022). Ambas variables independientes convergen así sobre un mismo mecanismo físico, lo que justifica su evaluación conjunta.

2.2.7. Parámetros de calidad

La calidad de las infusiones filtrantes se determina mediante un conjunto de parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y sensoriales que garantizan tanto la inocuidad del producto como su aceptación por parte del consumidor, y que se encuentran regulados por normativas nacionales e internacionales (ISO, 2011; INACAL, 2021).

2.2.7.1. Parámetros fisicoquímicos

En el plano fisicoquímico se controlan indicadores clave como la humedad, cuyo límite máximo se fija entre el 9 % y el 12 % según la especie, las cenizas totales, con valores comprendidos entre 10 y 12 %, y la ceniza insoluble en ácido, con un límite máximo del 4 %. Asimismo, se establecen límites para contaminantes inorgánicos como el plomo ($\leq$

10 ppm) y el arsénico (≤ 5 ppm), además del cumplimiento de los Límites Máximos de Residuos de plaguicidas fijados por el Codex Alimentarius (INACAL, 2021).

La humedad constituye el parámetro fisicoquímico de mayor relevancia para la presente investigación, por cuanto queda determinada directamente por las condiciones de secado evaluadas y cumple una doble función: asegurar la estabilidad microbiológica del producto durante el almacenamiento y preservar los compuestos bioactivos frente a reacciones de degradación. Las cenizas, por su parte, reflejan el contenido de materia mineral de la materia prima; en el caso específico de la ratania, Aldakheel et al. (2021) caracterizaron su composición elemental mediante espectroscopía de plasma inducido por láser, identificando tanto elementos nutricionales de relevancia para la salud humana como niveles traza de elementos potencialmente tóxicos, cuya presencia debe considerarse al establecer los criterios de inocuidad del producto.

Tabla 10

Parámetros fisicoquímicos exigidos para infusiones filtrantes

Parámetro	Límite establecido
Humedad	9 % a 12 %, según la especie
Cenizas totales	10 % a 12 %
Ceniza insoluble en ácido	Máximo 4 %
Plomo	Máximo 10 ppm
Arsénico	Máximo 5 ppm
Residuos de plaguicidas	Según Límites Máximos de Residuos del Codex Alimentarius

Nota. Los valores corresponden a normas técnicas desarrolladas para infusiones de hojas y flores, dado que no existe normativa específica para infusiones filtrantes elaboradas a partir de raíces. Adaptado de INACAL (2021).

2.2.7.2. Parámetros microbiológicos e inocuidad

Los productos vegetales deshidratados destinados a infusiones presentan un riesgo microbiológico específico derivado de su naturaleza seca, en la cual la contaminación microbiana puede persistir, de modo que las hierbas y plantas medicinales llegan a constituir fuentes de brotes de enfermedades transmitidas por alimentos. El riesgo de

mayor preocupación corresponde a los hongos filamentosos de los géneros *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium*, capaces de sintetizar micotoxinas con actividad carcinogénica, mutagénica e inmunosupresora; conviene distinguir, además, que las micotoxinas producidas por *Fusarium* se generan principalmente en campo y se acumulan durante la cosecha y el secado, mientras que las producidas por *Penicillium* y *Aspergillus* contaminan predominantemente durante el almacenamiento (Altyn y Twarużek, 2020).

La variable crítica que gobierna este riesgo es la humedad residual del producto seco, magnitud determinada directamente por las condiciones de secado, razón por la cual la normativa establece un límite máximo del 9 % (INACAL, 2021). Esta consideración fundamenta una de las tensiones centrales de la presente investigación: el binomio temperatura-tiempo de secado debe ser suficiente para garantizar la estabilidad microbiológica, pero no tan severo como para degradar los compuestos antioxidantes de interés. En el flujo de elaboración propuesto, la etapa de lavado y desinfección con hipoclorito de sodio al 0,01 % durante 5 a 10 minutos opera como barrera preventiva frente a la carga microbiana inicial, en tanto que el secado controlado impide la proliferación posterior.

Cabe destacar que la propia ratania aporta una ventaja tecnológica en este ámbito. Zabka (2022) demostró que el extracto de *Krameria lappacea* presenta una eficacia antifúngica extraordinaria frente a hongos filamentosos peligrosos, con concentraciones mínimas inhibitorias comprendidas entre 0,11 y 1,24 mg/ml, comparable a la de aceites esenciales de alto costo. Esta actividad intrínseca puede contribuir a la estabilidad microbiológica del producto durante su vida útil.

2.2.7.3. Parámetros sensoriales

Desde el punto de vista organoléptico, el color, el aroma y el sabor de la infusión deben ser característicos de la planta empleada, sin olores a humedad ni a rancidez, y con una granulometría adecuada que evite que partículas excesivamente finas atraviesen el papel filtrante y generen turbidez en la bebida (ISO, 2011). Este requisito establece un límite inferior práctico al tamaño de partícula, ya que si bien una menor granulometría favorece la extracción (Farakte et al., 2016), una reducción excesiva compromete la integridad visual del producto.

La evaluación sensorial de infusiones sigue un procedimiento estandarizado que se inicia con la apreciación del color y el aroma, prosigue con la valoración del sabor a una temperatura de consumo que idealmente no debe exceder los 50 °C, y culmina con la asignación de una puntuación de aceptabilidad general, empleando escalas de 7 o de 9 puntos según los objetivos del estudio (Liu et al., 2025). En investigaciones orientadas al desarrollo de nuevos productos, el instrumento de uso más extendido es la escala hedónica aplicada a paneles de consumidores; Tannuri et al. (2026), en un estudio sobre mezclas de infusiones herbales sudamericanas, obtuvieron mediante este instrumento puntuaciones de 6,5 a 7,0 para el atributo sabor, y determinaron que la percepción sensorial varió principalmente en función del sexo de los panelistas y de sus hábitos previos de consumo.

En el caso específico de la infusión de ratania, el atributo sensorial crítico es la astringencia, derivada de la interacción de los taninos con las proteínas salivales, que reduce la lubricación oral y genera la sensación de sequedad característica (Soares et al., 2020). Dado que la concentración de taninos extraídos depende de la granulometría empleada (Farakte et al., 2016), se configura el compromiso tecnológico central de esta investigación: la maximización de la capacidad antioxidante mediante la reducción del tamaño de partícula opera en sentido contrario a la aceptabilidad sensorial, de modo que el tratamiento óptimo será aquel que logre el mejor equilibrio entre ambas dimensiones.

2.2.7.4. Parámetros funcionales: capacidad antioxidante y métodos de determinación

En las infusiones destinadas a ser comercializadas como alimentos funcionales, la capacidad antioxidante constituye el parámetro de calidad que sustenta la declaración de funcionalidad, y su determinación exige precisar el ensayo empleado, por cuanto los distintos métodos disponibles no son procedimientos equivalentes. Los ensayos de uso más extendido se clasifican, atendiendo al mecanismo de reacción, en aquellos basados en la transferencia de un electrón y aquellos basados en la transferencia de un átomo de hidrógeno, y cada uno emplea un reactivo cromogénico distinto con su propio potencial redox de referencia.

El método del radical DPPH, empleado en la presente investigación, se fundamenta en la decoloración de una disolución del radical estable 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo por acción

de los compuestos capaces de donarle electrones o átomos de hidrógeno, y expresa el resultado frente a una curva de calibración construida con Trolox, un análogo hidrosoluble de la vitamina E. El método ABTS opera sobre el catión radical del ácido 2,2-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico), y el método FRAP mide la capacidad de reducir el ion férrico a ferroso.

La equivalencia entre estos ensayos no debe presuponerse. Rumpf et al. (2023), al comparar de manera sistemática los métodos DPPH, ABTS, FRAP y Folin-Ciocalteu sobre un conjunto de cincuenta y dos ligninas, determinaron que FRAP y Folin-Ciocalteu presentan entre sí la mejor correlación, lo cual atribuyen a que ambos operan bajo el mismo mecanismo de transferencia de un electrón, mientras que el ensayo DPPH correlaciona solo débilmente con los restantes, lo que indica que refleja atributos antioxidantes distintos como consecuencia de un mecanismo de reacción diferente. Los mismos autores determinaron que el coeficiente de variación resultó menor para ABTS y mayor para DPPH. En consecuencia, la comparación de valores de capacidad antioxidante entre estudios exige verificar que el ensayo empleado sea el mismo, y toda comparación entre métodos distintos debe interpretarse en términos de orden de magnitud y no como equivalencia numérica.

Procede distinguir, por último, entre la capacidad antioxidante y el contenido de compuestos fenólicos, magnitudes relacionadas, pero conceptualmente diferentes. El método de Folin-Ciocalteu, empleado habitualmente para cuantificar fenoles totales, mide la capacidad reductora de la muestra frente a un reactivo de molibdeno y tungsteno y expresa el resultado como equivalentes de un estándar fenólico, de modo que informa sobre la concentración de compuestos reductores presentes, pero no sobre su eficacia efectiva para neutralizar radicales libres. Los ensayos DPPH, ABTS y FRAP, en cambio, cuantifican directamente dicha eficacia frente a una especie radicalaria u oxidante definida. Dado que el objetivo funcional del producto desarrollado consiste en aportar capacidad de neutralización de radicales libres, y no un contenido determinado de compuestos fenólicos, la presente investigación adoptó el ensayo DPPH como parámetro funcional de referencia. La determinación del contenido de fenoles totales y del perfil fenólico individual mediante cromatografía constituye una caracterización complementaria, no sustitutiva, y se recoge como línea de trabajo futura en el apartado de recomendaciones.

2.2.8. Normativa y requisitos técnicos aplicables

Las exigencias de calidad descritas se encuentran recogidas en normas internacionales, como la norma ISO relativa al té (ISO, 2011), y en Normas Técnicas Peruanas que regulan especies específicas, tales como la manzanilla, el anís, el boldo, la hierba luisa y la menta, las cuales precisan requisitos de pureza y seguridad (INACAL, 2021).

Corresponde señalar, no obstante, una limitación normativa de implicaciones directas para el presente trabajo: las Normas Técnicas Peruanas vigentes en materia de infusiones filtrantes fueron desarrolladas para especies cuya materia prima corresponde a hojas y flores, sin que exista norma específica alguna aplicable a infusiones elaboradas a partir de raíces ni, en particular, a la ratania (INACAL, 2021). Los valores de referencia empleados en este estudio provienen, por tanto, de normas análogas y deben interpretarse como criterios orientativos. Esta ausencia normativa constituye precisamente uno de los vacíos que la presente investigación contribuye a llenar, al generar datos experimentales sobre las propiedades fisicoquímicas, funcionales y sensoriales de una infusión filtrante de raíz obtenida bajo condiciones de proceso controladas y reproducibles.

Finalmente, el material de la bolsa filtrante constituye un aspecto fundamental de la inocuidad, dado que debe ser resistente al agua caliente y no liberar compuestos dañinos durante la preparación. En este sentido se recomienda el uso de fibras de celulosa certificadas frente a materiales plásticos, puesto que Sadat et al. (2023) demostraron que estos últimos pueden liberar microplásticos y ésteres de ftalato durante la infusión, afectando la calidad y la seguridad del producto. Esta consideración fundamenta la selección del material especificado para las fundas de infusión filtrante de 2 g en el flujo de elaboración del presente estudio.

2.3. Procesamiento y secado de plantas medicinales

El secado constituye una etapa crítica del procesamiento poscosecha de las plantas medicinales, las cuales presentan típicamente un elevado contenido de humedad y una carga microbiana considerable, por lo que resulta indispensable deshidratarlas con prontitud para prevenir su deterioro y la pérdida de calidad. El método de secado empleado incide de manera significativa sobre los niveles de metabolitos secundarios y sobre las características organolépticas del material vegetal (Beigi et al., 2025). En el caso

específico de la ratania, las condiciones óptimas de secado no han sido estandarizadas, lo que constituye una limitación para su procesamiento industrial y una de las brechas que aborda la presente investigación.

2.3.1. Procesamiento poscosecha de la ratania

El flujo de elaboración propuesto en este estudio comprende las etapas de recepción, clasificación, lavado y desinfección, secado, clasificación, molienda y tamizado, pesado, enfundado y almacenamiento. Las etapas iniciales resultan determinantes para la calidad final del producto, por cuanto la materia prima procede íntegramente de la recolección de poblaciones silvestres en suelos áridos y pedregosos de los Andes, condición que implica la presencia de tierra, material extraño y una carga microbiana propia del contacto directo con el suelo (Brokamp et al., 2012).

La recepción y la clasificación tienen por objeto separar el material no conforme y garantizar la homogeneidad del lote. Esta selección adquiere particular relevancia en la ratania, dado que los compuestos fenólicos de interés se concentran preferentemente en la corteza radicular, cuyo peridermis contiene abundante material tanínífero, mientras que las porciones leñosas internas presentan una concentración considerablemente menor (Brokamp et al., 2012). La clasificación permite, por tanto, maximizar la proporción de tejido rico en bioactivos que ingresa al proceso.

La etapa de lavado y desinfección, ejecutada en el presente estudio mediante inmersión en hipoclorito de sodio al 0,01 % durante 5 a 10 minutos, constituye la barrera preventiva orientada a reducir la carga microbiana inicial. El hipoclorito de sodio es el desinfectante de mayor uso en la industria de vegetales debido a su amplio espectro antimicrobiano y a su bajo costo. Arienzo et al. (2023) documentaron que su aplicación produce una reducción efectiva e inmediata de la carga bacteriana del producto; no obstante, los mismos autores advierten que dicho efecto puede revertirse durante el almacenamiento posterior, dado que la eliminación del microbiota competitivo permite que las bacterias remanentes proliferen. Esta observación refuerza la necesidad de que la desinfección sea complementada por un secado adecuado, capaz de reducir la humedad hasta niveles que impidan cualquier proliferación microbiana ulterior.

2.3.2. Secado de plantas medicinales

El secado cumple una doble función tecnológica en la elaboración de infusiones filtrantes. Por una parte, la reducción de la humedad inhibe el desarrollo microbiano y garantiza la estabilidad del producto durante su almacenamiento. Por otra, preserva los compuestos bioactivos frente a reacciones de degradación enzimática e hidrolítica. Sin embargo, el propio proceso de secado puede modificar dichos compuestos, lo que configura un compromiso técnico ineludible: ElGamal et al. (2023) establecen que la vitamina C, los fenoles, los flavonoides y los glicósidos reaccionan con el oxígeno durante el secado convectivo a temperaturas elevadas, y que la velocidad de esta reacción determina el grado de degradación de los compuestos bioactivos.

La temperatura de secado constituye, en consecuencia, la variable de proceso de mayor incidencia sobre el contenido final de compuestos funcionales. A partir de una revisión exhaustiva de la literatura, ElGamal et al. (2023) determinaron que los rangos de temperatura idóneos para la retención de los distintos grupos de bioactivos son de 55 a 60 °C para los polifenoles, de 60 a 70 °C para los flavonoides, de 45 a 50 °C para los glicósidos y de 50 a 70 °C para la actividad antioxidante. Estos rangos fundamentan directamente la selección de los niveles de temperatura evaluados en la presente investigación, 40 y 60 °C, que se sitúan por debajo del intervalo óptimo y dentro de él, respectivamente.

Corresponde precisar, no obstante, que el efecto de la temperatura de secado sobre la capacidad antioxidante no es unidireccional, sino que resulta del balance entre fenómenos de degradación y de enriquecimiento, cuya magnitud relativa depende de la matriz vegetal y de la naturaleza de sus compuestos fenólicos. Junto a la degradación térmica, operan al menos tres mecanismos que pueden incrementar la capacidad antioxidante del material seco. El primero es la inactivación de las enzimas oxidativas, principalmente la polifenoloxidasas y la peroxidasa, que en condiciones de secado lento degradan los compuestos fenólicos; Babaei Rad et al. (2025) señalan que las altas temperaturas durante el secado inactivan dichas enzimas, previenen las reacciones oxidativas y preservan mejor los principios activos de la planta. El segundo es la liberación de compuestos fenólicos ligados a la pared celular: dichos autores explican que los compuestos fenólicos se encuentran habitualmente ligados en el interior de las células vegetales y que, cuando

están unidos y esterificados, el calentamiento rompe esos enlaces y los convierte en formas más simples y extraíbles, fenómeno reforzado por el colapso de los espacios intercelulares inducido por el calor. El tercero es el incremento específico de los taninos hidrolizables extraíbles en matrices táníferas, documentado por Lim y Eom (2022) en cáscara de caqui astringente.

La evidencia experimental confirma este comportamiento bidireccional. Babaei Rad et al. (2025), al evaluar once métodos de secado en frutos de *Capparis spinosa*, registraron la menor actividad antioxidante en las muestras secadas en estufa a 50 °C, mientras que las secadas a 70 °C presentaron niveles favorables de fenoles totales, flavonoides, antocianinas y actividad antioxidante, con un contenido de fenoles totales de 5,31 mg GAE/g de peso seco. Por su parte, Lim y Eom (2022) determinaron que el secado térmico redujo la capacidad antioxidante de la pulpa del caqui de manera dependiente de la temperatura, pero la incrementó en la cáscara, tejido rico en taninos, con correlaciones de $r^2 = 0,9493$ respecto de los fenoles totales y $r^2 = 0,9288$ respecto de los taninos hidrolizables. Estos hallazgos resultan de particular relevancia para la presente investigación, dado que la corteza radicular de *Krameria lappacea* constituye precisamente una matriz de elevado contenido tánico, en la cual cabe esperar que los mecanismos de enriquecimiento adquieran un peso comparable o superior al de la degradación térmica.

El tiempo de secado opera de manera conjunta con la temperatura, dado que tanto la degradación como la liberación de compuestos fenólicos responden a una cinética dependiente de la intensidad y de la duración de la exposición (ElGamal et al., 2023). Un secado insuficiente, sea por baja temperatura o por tiempo reducido, deja una humedad residual que compromete la inocuidad del producto, en tanto que las plantas medicinales secas con humedad excesiva constituyen matrices susceptibles al desarrollo de hongos filamentosos y a la consiguiente formación de micotoxinas (Beigi et al., 2025). Por el contrario, un secado excesivamente severo puede degradar los compuestos antioxidantes que constituyen el fundamento funcional del producto (ElGamal et al., 2023). Los niveles de 3 y 6 horas evaluados en este estudio permiten precisamente delimitar dicho compromiso.

Adicionalmente, el secado modifica la estructura física de la matriz vegetal, lo que repercute sobre las etapas subsiguientes del proceso. La deshidratación genera una contracción del tejido y una alteración de su porosidad, factores que condicionan tanto el comportamiento del material durante la molienda como la resistencia posterior a la transferencia de masa durante la infusión (Beigi et al., 2025). De este modo, las condiciones de secado no solo determinan la concentración inicial de compuestos bioactivos disponibles, sino que influyen también sobre la eficiencia con la que estos podrán ser extraídos durante la preparación de la bebida (Dhekne y Patwardhan, 2020).

Tabla 11

Rangos de temperatura óptima de secado para la retención de compuestos bioactivos

Grupo de compuestos	Temperatura óptima (°C)
Vitamina C	50 a 60
Polifenoles	55 a 60
Flavonoides	60 a 70
Glicósidos	45 a 50
Compuestos volátiles	40 a 50
Actividad antioxidante	50 a 70

Nota. Adaptado de ElGamal et al. (2023).

2.3.3. Molienda y granulometría

La molienda constituye una operación de reducción de tamaño cuyo propósito, en el contexto de las infusiones filtrantes, es incrementar la superficie específica de la materia prima con el fin de intensificar la extracción de compuestos solubles durante el breve tiempo de contacto que caracteriza a la preparación de la bebida. Las partículas de menor tamaño poseen una mayor superficie específica y, por tanto, exponen un mayor número de moléculas bioactivas disponibles para su liberación al medio acuoso (Deli et al., 2019). Farakte et al. (2016) confirmaron experimentalmente el papel determinante del tamaño de partícula en el proceso de infusión, estableciendo que la reducción granulométrica acelera la cinética de extracción al acortar el camino difusional que deben recorrer los solutos desde el interior de la partícula hasta el seno del líquido.

Esta relación, sin embargo, no es lineal ni indefinidamente favorable. Senawong et al. (2023) demostraron, al evaluar el efecto de la molienda sobre el rendimiento de extracción de fitoquímicos en hojas vegetales, que el rendimiento se incrementa conforme disminuye el tamaño de partícula hasta alcanzar un óptimo, a partir del cual comienza a decrecer. Los autores atribuyen este comportamiento a dos fenómenos concurrentes: la generación de calor durante la molienda superfina, que provoca la oxidación de los polifenoles y las catequinas, y la aglomeración del polvo, que dificulta su disolución. En la misma línea, Deli et al. (2019) reportaron que las partículas de menor tamaño pueden experimentar un incremento térmico considerable durante la operación de molienda, suficiente para alterar los polifenoles y flavonoides y reducir la capacidad antioxidante del polvo resultante, y que su mayor superficie específica las expone además a una mayor velocidad de oxidación.

Estos hallazgos sustentan la selección de los niveles granulométricos evaluados en la presente investigación, 850 y 2000 μm . Ambos valores se sitúan en el rango de partícula gruesa a media, alejados del régimen de molienda superfina en el que se manifiestan los efectos adversos de sobrecalentamiento y aglomeración descritos por Senawong et al. (2023). El nivel de 850 μm ofrece una superficie específica sustancialmente mayor que el de 2000 μm , lo que, conforme al mecanismo establecido por Farakte et al. (2016), debería traducirse en una extracción más eficiente de compuestos fenólicos y, consecuentemente, en una mayor capacidad antioxidante de la infusión.

No obstante, el incremento de la extracción conlleva una contrapartida sensorial ineludible en el caso de la ratania. Dado el elevado contenido de taninos de su corteza radicular (Brokamp et al., 2012), una mayor liberación de estos compuestos intensifica la astringencia percibida, sensación que se origina en la interacción de los taninos con las proteínas salivales, cuya precipitación reduce la lubricación oral (Soares et al., 2020). A ello se suma un límite tecnológico adicional: la normativa exige una granulometría que impida el paso de partículas excesivamente finas a través del papel filtrante, dado que ello generaría turbidez en la bebida (ISO, 2011). La determinación del tamaño de partícula óptimo constituye, por tanto, un problema de equilibrio entre la eficacia funcional, la aceptabilidad sensorial y la integridad visual del producto, y su resolución representa uno de los objetivos centrales de esta investigación.

2.4. Contexto sociocultural, económico y ambiental

En el ámbito social y cultural, la ratania representa un recurso ancestral que ha sido utilizado durante siglos por las comunidades andinas, las cuales poseen conocimientos valiosos sobre su recolección, preparación y aplicación medicinal (Corroto et al., 2022). No obstante, la falta de documentación y el escaso apoyo institucional han limitado la valorización de este conocimiento, generando una pérdida progresiva de saberes tradicionales (Corroto et al., 2022).

Desde una perspectiva económica, el desarrollo de productos derivados de plantas autóctonas puede generar oportunidades para las comunidades rurales, al fomentar la producción sostenible, el acceso a mercados especializados y la diversificación de ingresos (Sarapura y Hoddy, 2022). Asimismo, la creciente demanda global por productos naturales y sostenibles representa una oportunidad estratégica para posicionar al Perú en el mercado internacional de infusiones funcionales (Kussmann et al., 2023).

Por otro lado, el uso sostenible de la ratania requiere establecer buenas prácticas de recolección y procesamiento que permitan conservar su hábitat natural y evitar la sobreexplotación. La magnitud del problema es considerable: Brokamp et al. (2012) reportan que el Perú, principal país exportador, moviliza alrededor de 30 toneladas métricas anuales, procedentes en su totalidad de la recolección destructiva de poblaciones silvestres, lo que equivale a la destrucción de aproximadamente 140 000 a 395 000 plantas por año solo para atender la demanda de exportación. Las iniciativas que promuevan la sostenibilidad ecológica y la valorización de la biodiversidad andina resultan, en consecuencia, fundamentales para asegurar la viabilidad de este tipo de proyectos en el largo plazo (Kor et al., 2021).

En este marco, la estandarización tecnológica del procesamiento que persigue la presente investigación adquiere una dimensión que trasciende lo estrictamente técnico. La optimización de las condiciones de secado y granulometría permite maximizar el aprovechamiento funcional de cada unidad de materia prima recolectada, de modo que la contribución de este trabajo no se limita al desarrollo de un producto, sino que aporta también a un uso más eficiente y, por tanto, menos presionante sobre un recurso natural amenazado (Brokamp et al., 2012).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

La presente investigación se ejecutó en las instalaciones de la Universidad Nacional del Santa, ubicada en el distrito de Nuevo Chimbote, provincia del Santa, departamento de Áncash, Perú.

Los ensayos se desarrollaron en el Laboratorio de Control de Calidad y en el Laboratorio de Nutrición y Toxicología, ambos pertenecientes al Instituto de Investigación Tecnológica Agroindustrial (IITA), así como en el Laboratorio de Química Orgánica y en el Laboratorio de Microbiología y Toxicología, correspondientes a la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial (EPIA) y la Planta Piloto Agroindustrial de la Universidad Nacional del Santa.

3.2. Materiales, equipos y reactivos

3.2.1. Materia prima

Ratania (*Krameria lappacea*): Proveniente de la localidad de Huamachuco, región La Libertad (zona altoandina de la sierra de Trujillo) y adquirida en el establecimiento comercial "Natura del Cielo", ubicado en los alrededores del mercado de Buenos Aires, Nuevo Chimbote.

3.2.2. Material del laboratorio

3.2.2.1. Material de vidrio

- Vasos de precipitado (50, 100 y 250 mL)
- Matraces Erlenmeyer de 250 mL
- Matraces aforados o fioles (250 mL y 1 L)
- Probeta graduada de 50 mL
- Pipetas volumétricas (1 y 10 mL)
- Tubos de ensayo
- Tubos de centrifuga
- Viales ámbar

- Placas Petri de vidrio
- Luna de reloj
- Varilla de agitación de vidrio
- Embudo de vidrio

3.2.2.2. Material para determinaciones analíticas

- Cápsulas de aluminio para determinación de humedad
- Crisoles de porcelana para determinación de cenizas
- Crisoles filtrantes de vidrio con placa porosa para determinación de fibra dietética total
- Microplacas de 96 pozos para determinación de capacidad antioxidante
- Micropipetas de volumen variable (10 a 200 μL y 100 a 1000 μL)
- Puntas descartables para micropipeta
- Pinzas metálicas para manipulación de crisoles
- Espátula de acero inoxidable
- Gradilla para tubos de ensayo
- Papel aluminio

3.2.2.3. Material para el procesamiento

- Bandejas para secado
- Tamices normalizados de malla de 850 y 2000 μm
- Hacha de mano
- Recipientes plásticos para lavado y desinfección
- Bolsas de polietileno con cierre hermético (31 $\times$ 27 cm, planas, marca Bell's)
- Sobres filtrantes de tela para infusión
- Papel toalla

3.2.2.4. Material para evaluación sensorial

- Vasos descartables uniformes codificados
- Fichas de evaluación sensorial
- Bandejas de presentación de muestras

3.2.2.5. Equipo de protección personal

- Guantes de nitrilo
- Mascarilla
- Mandil de laboratorio
- Toca

3.2.3. Reactivos

- Agua destilada
- Hipoclorito de sodio de 100 ppm
- Hidróxido de sodio (soluciones 0,1 N y 0,275 N)
- Ácido clorhídrico (solución 0,325 N)
- Ácido clorhídrico 2 N
- Fosfato dibásico de sodio
- Fosfato monobásico de sodio monohidratado
- α -amilasa termoestable
- Proteasa
- Amiloglucosidasa
- Celite
- Etanol 96°
- Etanol 78°
- Acetona
- Fenolftaleína como indicador
- 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH)
- Metanol grado analítico
- Trolox (ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico)
- Soluciones buffer de pH 4,00 y 7,00 para calibración del potenciómetro

3.2.4. Equipos

- Secador de bandejas con control de temperatura (Food Dehydrator, modelo QG-C20, serie DL20240828161)
- Molino manual de laboratorio

- Tamizador eléctrico (Corporación Mallas y Aceros del Perú S.A.C.)
- Juego de tamices de ensayo estándar, especificación ASTM E-11, de 850 y 2000 μm (Cormacperú)
- Estufa esterilizadora con control de temperatura (POL-EKO, serie SW1TF121017)
- Horno mufla (Photherm, modelo ECO 110/3, serie 22050159)
- Analizador de fibra (Foss, modelo Fibertec 1023, serie 91760484)
- Balanza analítica con precisión de $\pm 0,0001$ g (Precisa, modelo LX220ASCS, serie R1-1296)
- Balanza de precisión de laboratorio, con aproximación de lectura de 0,1 g
- Potenciómetro digital
- Refractómetro digital, escala de 0 a 32 °Brix
- Baño María con control de temperatura (Foss Analytical, modelo WB 1024, serie 91761482)
- Desecador
- Lector multimodal de microplacas (BioTek Instruments, modelo Synergy H1, serie 1502082)
- Baño ultrasónico
- Centrífuga
- Micropipeta digital de volumen variable (Bitlab)
- Agitador vórtex
- Hervidora eléctrica
- Termómetro digital
- Cronómetro

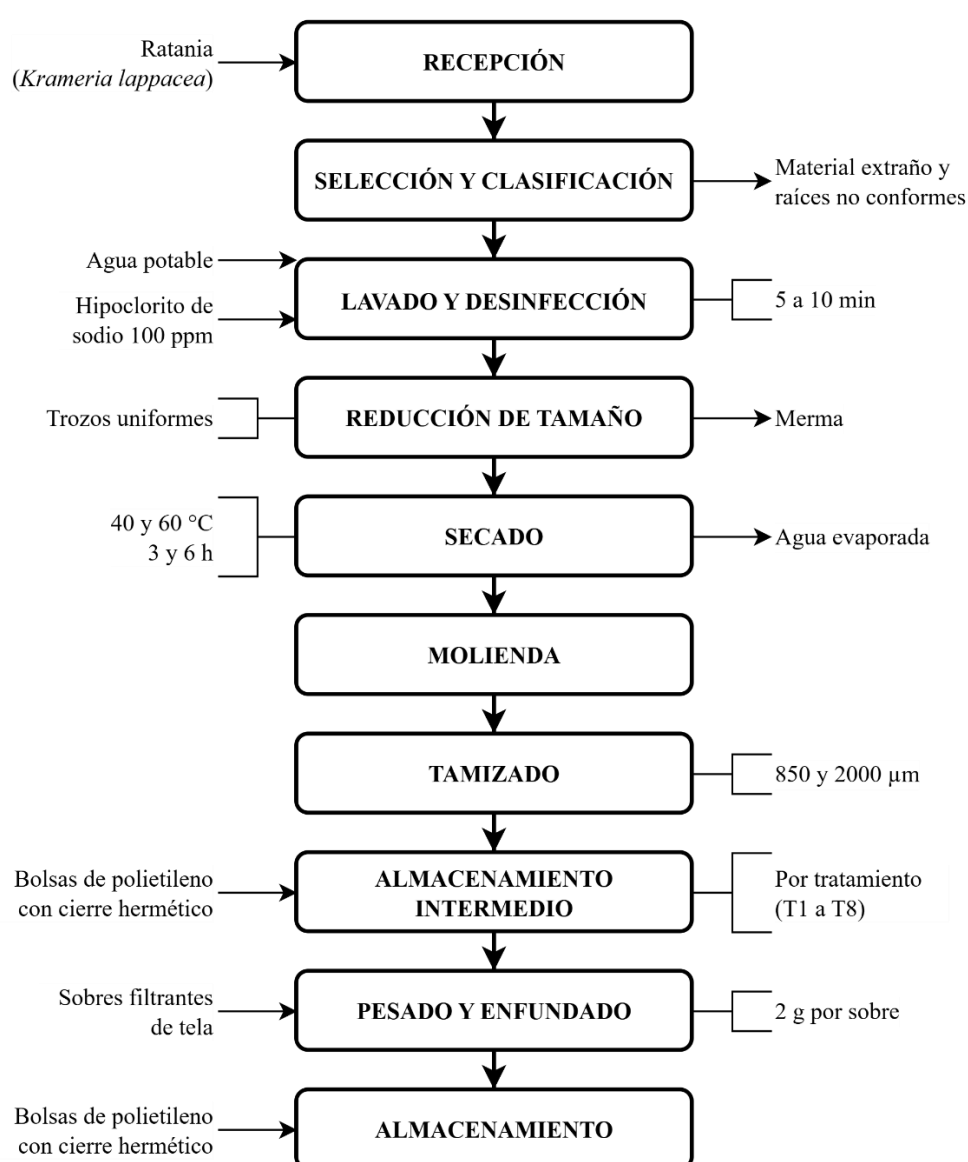
3.3. Metodología de procesamiento

3.3.1. Descripción del proceso de elaboración

En la figura siguiente se presenta el diagrama de flujo de la elaboración de la infusión filtrante de ratania, cuyas operaciones se describen a continuación.

Figura 2

Diagrama de flujo de la elaboración de infusión filtrante de Krameria lappacea (Ratania)



Nota. Elaboración propia

Recepción. La materia prima, constituida por raíz de ratania (*Krameria lappacea*), fue adquirida en un establecimiento comercial de productos naturistas y trasladada a las instalaciones del laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional del Santa. El material se recepcionó en estado deshidratado, condición en la que se comercializa habitualmente esta especie, cuyo mercado nacional e internacional opera exclusivamente sobre raíz seca sometida a deshidratación artesanal por parte de los recolectores (Brokamp et al., 2012). A su ingreso se realizó un control visual orientado a verificar la ausencia de cuerpos extraños, exceso de tierra y signos de deterioro, registrándose el peso y la procedencia del lote con fines de trazabilidad.

Selección y clasificación. La raíz recepcionada fue sometida a una selección manual destinada a separar el material no conforme, comprendiendo restos de otras especies vegetales, fragmentos deteriorados, material extraño y raíces de tamaño inadecuado. Esta operación resulta determinante para garantizar la homogeneidad del lote, condición especialmente relevante en materia prima procedente de recolección silvestre.

Lavado y desinfección. El material clasificado fue sometido a un lavado con agua potable orientado a remover tierra, polvo y partículas adheridas a la superficie radicular, condición esperable dado el hábitat edáfico de la especie y su manipulación durante la deshidratación artesanal. Posteriormente se aplicó una desinfección por inmersión en solución de hipoclorito de sodio de 100 ppm de cloro activo durante un período de 5 a 10 minutos, concentración establecida para la desinfección de productos vegetales destinados al consumo humano, con el objeto de reducir la carga microbiana inicial y asegurar la inocuidad del producto. Concluida la inmersión, el material fue escurrido a fin de eliminar el exceso de solución desinfectante.

Reducción de tamaño. Con el propósito de uniformizar las dimensiones del material y favorecer una transferencia de calor y masa homogénea durante el secado, las raíces fueron fraccionadas manualmente mediante el uso de una hacha hasta obtener trozos de tamaño regular. Esta operación resulta indispensable en el procesamiento de material radicular, dado que la naturaleza leñosa del tejido y la heterogeneidad dimensional de las raíces comprometerían la uniformidad del tratamiento térmico si este se aplicara sobre el material íntegro.

Secado. El material fraccionado fue sometido a secado convectivo en secador de bandejas, bajo las condiciones establecidas por el diseño experimental, evaluándose dos niveles de temperatura (40 y 60 °C) y dos niveles de tiempo (3 y 6 h). El material se dispuso en capa uniforme sobre las bandejas del equipo, evitando su superposición, a fin de garantizar la circulación homogénea del aire caliente.

Corresponde precisar el alcance de esta operación. Dado que la materia prima ingresa al proceso en estado deshidratado, el secado no se aplicó como operación de deshidratación destinada a la conservación, sino como tratamiento térmico controlado y variable experimental, orientado a estandarizar el material y a evaluar el efecto de la temperatura y del tiempo de exposición sobre los compuestos bioactivos y sobre el perfil sensorial de la infusión resultante. Esta consideración resulta esencial, por cuanto la deshidratación artesanal practicada por los recolectores se realiza sin control de temperatura ni de tiempo, generando material de características heterogéneas; la aplicación de condiciones controladas permite, en consecuencia, tanto la uniformización del lote como la determinación del efecto de dichas condiciones sobre las propiedades del producto, conforme al objetivo general de la presente investigación.

Molienda. El material seco fue reducido a partículas mediante molino manual de laboratorio, operación orientada a incrementar la superficie específica de contacto y a facilitar la posterior clasificación granulométrica.

Tamizado. El producto molido fue clasificado mediante tamices normalizados de 850 y 2000 μm dispuestos en tamizador eléctrico, con tiempos de operación de 5 a 8 minutos por lote, obteniéndose las dos fracciones granulométricas establecidas por el diseño experimental. Esta operación define la segunda variable independiente del estudio, dado que el tamaño de partícula condiciona la superficie disponible para la transferencia de masa durante la infusión y, en consecuencia, la extracción de compuestos bioactivos.

Almacenamiento intermedio. Las fracciones obtenidas fueron acondicionadas en bolsas de polietileno con cierre hermético, identificadas de manera independiente para cada uno de los ocho tratamientos derivados del diseño factorial, y conservadas en ambiente seco hasta su procesamiento posterior. Esta etapa previene la rehidratación del material y la

degradación oxidativa de los compuestos fenólicos durante el intervalo transcurrido hasta el envasado.

Pesado y enfundado. De cada tratamiento se pesaron porciones de 2 g de material molido, las cuales fueron dispuestas manualmente en sobres filtrantes de tela, cerrados mediante el cordón incorporado en el propio sobre, verificándose en cada caso la exactitud de la dosificación. La selección de un material textil responde a la necesidad de garantizar la permeabilidad al agua caliente y la retención de las partículas sólidas, evitando el empleo de materiales plásticos susceptibles de liberar microplásticos y ésteres de ftalato durante la infusión (Sadat et al., 2023).

Almacenamiento. Las unidades terminadas fueron almacenadas en bolsas de polietileno con cierre hermético, en ambiente limpio, seco y ventilado, protegidas de la exposición directa a la radiación solar y de la humedad ambiental, con el fin de preservar las propiedades fisicoquímicas, funcionales y sensoriales del producto hasta el momento de su evaluación.

3.3.2. Balance de materia y cálculo del rendimiento

El balance de materia se estableció con el objeto de cuantificar las pérdidas asociadas a cada operación del proceso, determinar el rendimiento alcanzado y garantizar la trazabilidad de la masa desde la recepción de la materia prima hasta la obtención del producto envasable. La totalidad del proceso se ejecutó sobre un único lote y en una sola jornada, condición que elimina la variabilidad atribuible a diferencias de procedencia de la materia prima o a condiciones ambientales distintas entre jornadas.

El material se pesó al ingreso y a la salida de cada operación en balanza de precisión de laboratorio, registrándose las masas con aproximación de 0,1 g. Las determinaciones analíticas efectuadas sobre porciones reducidas de muestra, que requirieron una resolución mayor, se realizaron en balanza analítica con precisión de $\pm 0,0001$ g (Precisa, modelo LX220ASCS, serie R1-1296). Las operaciones de molienda y tamizado se registraron de manera conjunta, por constituir etapas consecutivas ejecutadas sobre el mismo material sin pesaje intermedio. En la operación de lavado y desinfección el pesaje se efectuó una vez eliminada el agua superficial mediante escurrido, de modo que la masa registrada corresponde al material escurrido y no incluye agua de arrastre.

La merma de cada operación se determinó por diferencia entre la masa de entrada y la masa de salida, y se expresó como porcentaje respecto de la masa que ingresó a dicha operación, conforme a la expresión siguiente:

$$\text{Merma (\%)} = \left[\frac{\text{masa de entrada} - \text{masa de salida}}{\text{masa de entrada}} \right] \times 100$$

El contenido de humedad final del material sometido a cada condición de secado se calculó a partir del principio de conservación de la materia seca, considerando que la operación de secado retira exclusivamente agua y no modifica la masa de sólidos. La masa de materia seca de cada porción se obtuvo a partir de la humedad inicial determinada en la materia prima recepcionada, y la humedad final se calculó por diferencia respecto de la masa remanente tras el secado:

$$\text{Materia seca (g)} = \text{masa de entrada} \times \left(\frac{1 - \text{humedad inicial}}{100} \right)$$

$$\text{Humedad final (\%)} = \left[\frac{\text{masa de salida} - \text{materia seca}}{\text{masa de salida}} \right] \times 100$$

El rendimiento de cada tratamiento se expresó como la relación porcentual entre la masa de producto envasable obtenida y la masa de materia prima recepcionada, criterio que permite dimensionar el aprovechamiento efectivo del recurso desde el punto de entrada del proceso:

$$\text{Rendimiento (\%)} = \left(\frac{\text{masa de producto envasable}}{\text{masa de materia prima recepcionada}} \right) \times 100$$

El rendimiento global del proceso se obtuvo aplicando la misma expresión a la suma de las masas obtenidas en los ocho tratamientos. Finalmente, el número de unidades de producto por tratamiento se determinó dividiendo la masa envasable entre la dosificación de 2 g por sobre y considerando únicamente la parte entera del cociente, dado que una fracción de sobre no constituye una unidad comercializable:

$$\text{Unidades por tratamiento} = \text{parte entera de} \left(\frac{\text{masa de producto envasable}}{2 \text{ g}} \right)$$

3.4. Métodos de análisis

3.4.1. Caracterización fisicoquímica de la materia prima

3.4.1.1. Humedad

La determinación de humedad se realizó siguiendo el método gravimétrico descrito por la AOAC 930.04, correspondiente a la determinación de humedad en material vegetal, el cual se basa en la pérdida de peso por secado en estufa a temperatura controlada hasta alcanzar peso constante. Para ello, las cápsulas de aluminio fueron secadas previamente en estufa a 105 °C durante 30 minutos y pesadas para obtener el peso en vacío (W_0). Luego se colocaron aproximadamente de 2 a 5 g de muestra en cada cápsula, registrándose el peso inicial del conjunto (W_1). Las cápsulas con muestra se llevaron nuevamente a estufa a 105 °C durante un periodo de 3 horas, transcurrido el cual se retiraron y se dejaron enfriar en desecador durante 30 minutos antes de realizar la segunda pesada (W_2). En caso de que la diferencia entre dos pesadas consecutivas fuera mayor a 0,002 g, las cápsulas retornaron a la estufa durante intervalos adicionales de una hora hasta alcanzar peso constante, garantizando la precisión del análisis. Finalmente, el porcentaje de humedad se calculó considerando la pérdida de masa debida a la evaporación del agua presente en la muestra, según la ecuación siguiente:

$$\% \text{Humedad} = \frac{W_1 - W_2}{W_1 - W_0} \times 100$$

Donde:

- W_0 = masa de la cápsula vacía (g)
- W_1 = masa de la cápsula más muestra antes del secado (g)
- W_2 = masa de la cápsula más muestra después del secado (g)

3.4.1.2. Cenizas

La determinación de cenizas se realizó siguiendo el método AOAC 930.05, correspondiente a la determinación de cenizas en material vegetal, el cual se basa en la incineración de la muestra a alta temperatura para eliminar completamente la materia

orgánica y cuantificar el residuo inorgánico remanente. Para ello, las cápsulas de porcelana fueron previamente secadas en estufa a 105 °C durante 30 minutos y pesadas para obtener el valor inicial (W_0). Posteriormente se colocaron aproximadamente de 2 a 5 g de muestra en cada cápsula y se registró el peso conjunto de cápsula y muestra antes de la incineración (W_1). Las cápsulas fueron introducidas en el horno mufla a una temperatura controlada entre 500 y 550 °C durante un periodo de 3 a 5 horas, permitiendo la completa volatilización de la materia orgánica.

Una vez finalizada la incineración, las cápsulas se retiraron cuidadosamente del horno y se dejaron enfriar en desecador durante 30 minutos antes de registrar el peso final (W_2). En caso de que la diferencia entre dos pesadas consecutivas fuera mayor a 0,002 g, las cápsulas retornaron al horno por intervalos adicionales de una hora hasta alcanzar peso constante. El contenido de cenizas se expresó como porcentaje respecto a la masa original de la muestra mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{Cenizas} = \frac{W_2 - W_0}{W_1 - W_0} \times 100$$

Donde:

- W_0 = masa de la cápsula vacía (g)
- W_1 = masa de la cápsula más muestra antes de la incineración (g)
- W_2 = masa de la cápsula más cenizas después de la incineración (g)

3.4.1.3. Fibra dietética total

La determinación de fibra dietética total se realizó mediante el método enzimático-gravimétrico establecido por la AOAC 991.43, complementado por los métodos AOAC 985.29 y AOAC 32-05.01, siguiendo el protocolo implementado en el Instituto de Investigación Tecnológica Agroindustrial de la Universidad Nacional del Santa. El método se fundamenta en la digestión enzimática secuencial de la muestra mediante α -amilasa termoestable, proteasa y amiloglucosidasa, seguida de la precipitación de la fibra soluble en medio etanólico y su recuperación gravimétrica por filtración.

Se prepararon buffer fosfato 0,08 M a pH 6,0, hidróxido de sodio 0,275 N y ácido clorhídrico 0,325 N. Los crisoles filtrantes se pesaron, se les adicionó 0,5 g de celite y se secaron en estufa a 130 °C durante 3 horas hasta peso constante, registrándose el peso del sistema crisol más celite.

Se pesó 1 g de muestra desgrasada en cada uno de dos frascos identificados como placa 1 y placa 2. A cada frasco se adicionaron 50 mL de buffer fosfato pH 6,0 y 50 µL de α-amilasa termoestable, sometiéndose a baño María a 80 °C durante 30 minutos para hidrolizar el almidón. Tras enfriar y lavar las paredes con agua destilada, se ajustó el pH a 7,5 con NaOH 0,275 N, se adicionaron 100 µL de proteasa y se aplicó baño María a 60 °C durante 30 minutos. Posteriormente se ajustó el pH al rango de 4,0 a 4,6 con HCl 0,325 N, se adicionaron 200 µL de amiloglucosidasa y se aplicó un tercer baño María a 60 °C durante 30 minutos.

A cada frasco se adicionaron 280 mL de alcohol de 96° atemperado a 60 °C, dejándose reposar una hora para precipitar la fibra soluble. El precipitado se transfirió cuantitativamente a los crisoles mediante filtración al vacío con succión suave, lavándose los residuos sucesivamente con alcohol de 78°, alcohol de 96° y acetona. Los crisoles se secaron en estufa a 105 °C durante 12 horas, se enfriaron en campana y se pesaron. Sobre el residuo de la placa 1 se determinó el contenido de cenizas y sobre el de la placa 2 el de proteína, correcciones indispensables por cuanto el residuo gravimétrico incluye fracciones minerales y nitrogenadas que no constituyen fibra dietética total. Paralelamente se procesó un blanco de reactivos bajo idéntico procedimiento.

El contenido de fibra dietética total se determinó mediante la siguiente expresión:

$$\%FDT = \frac{\left(\frac{R_1 + R_2}{2}\right) - P - C - B}{\left(\frac{M_1 + M_2}{2}\right)} \times 100$$

Donde:

- R_1 = peso del residuo de la placa 1 (g)
- R_2 = peso del residuo de la placa 2 (g)

- P = peso de proteína determinado sobre R₁ (g)
- C = peso de cenizas determinado sobre R₂ (g)
- B = peso del blanco (g)
- M₁ y M₂ = pesos de muestra inicial de las placas 1 y 2 (g)

El peso del blanco se calculó, a su vez, mediante la expresión:

$$B = \frac{BR_1 + BR_2}{2} - BP - BA$$

Donde:

- BR₁ y BR₂ = pesos de los residuos del blanco (g)
- BP = peso de proteína del blanco determinado sobre BR₁ (g)
- BA = peso de cenizas del blanco determinado sobre BR₂ (g)

3.4.2. Caracterización fisicoquímica del producto terminado

3.4.2.1. Preparación de la infusión

La preparación de las infusiones destinadas a la caracterización fisicoquímica se realizó siguiendo el método convencional descrito por Tan et al. (2023) para estudios de té, con adaptaciones al producto en investigación. Se empleó una relación de 1 g de material seco por cada 50 mL de agua destilada, equivalente a una proporción peso a volumen de 1:50, procedimiento aplicado de manera independiente a cada uno de los ocho tratamientos derivados del diseño experimental.

Para ello, el material fue colocado en un vaso de precipitación de vidrio e infusionado en agua destilada a 80 ± 5 °C durante un tiempo de 3 minutos, tras el cual la bolsa filtrante fue retirada cuidadosamente sin exprimirla, a fin de evitar la liberación de partículas no solubles que pudieran alterar la claridad del extracto. Las infusiones obtenidas se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente, aproximadamente 25 °C, y se emplearon inmediatamente para las determinaciones de pH, sólidos solubles totales y acidez

titulable. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado a fin de asegurar la repetibilidad de los resultados.

3.4.2.2. pH

La determinación del pH se realizó siguiendo el método AOAC 981.12, con adaptaciones para muestras líquidas provenientes de infusiones. Las infusiones previamente preparadas según el procedimiento descrito en el apartado anterior fueron analizadas inmediatamente después de alcanzar temperatura ambiente, 25 ± 2 °C.

Antes de cada serie de mediciones, el potenciómetro fue calibrado empleando soluciones buffer estándar de pH 4,00 y 7,00, conforme a las indicaciones del fabricante. Posteriormente se colocó un volumen de 10 a 15 mL de la muestra en un vaso de precipitación de vidrio y se sumergió el electrodo, evitando la presencia de burbujas y asegurando su contacto total con la solución. Entre cada medición, el electrodo fue enjuagado con agua destilada y secado con papel absorbente. Las lecturas se registraron una vez que el equipo alcanzó estabilidad, reportándose el valor final con dos cifras decimales.

3.4.2.3. Sólidos solubles totales (°Brix)

La determinación de sólidos solubles totales se realizó por refractometría directa, siguiendo el método AOAC 932.12, empleando la infusión previamente preparada. Se colocaron de 4 a 5 gotas de la infusión sobre el prisma limpio y calibrado del refractómetro a 20 °C, realizándose la lectura directa en grados Brix, magnitud que corresponde al porcentaje de solutos solubles presentes en la bebida.

Entre mediciones, el prisma del refractómetro se enjuagó con agua destilada y se secó cuidadosamente con papel absorbente, evitando así la contaminación cruzada entre muestras y asegurando que cada lectura correspondiera únicamente a los sólidos solubles de la infusión evaluada. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado.

3.4.2.4. Acidez titulable

La determinación de la acidez titulable se realizó mediante titulación ácido-base con detección visual del punto final, siguiendo los fundamentos del método AOAC 942.15,

expresando el resultado como ácido gálico por tratarse del compuesto fenólico de referencia en la matriz evaluada.

La determinación se efectuó sobre la infusión preparada según el procedimiento descrito en el apartado correspondiente, cuya relación de 1 g de material seco por cada 50 mL de agua destilada permitió atenuar suficientemente la intensidad de la coloración rojiza característica de la ratania, atribuible a su elevado contenido de taninos y proantocianidinas, posibilitando de este modo la observación nítida del viraje del indicador.

De la infusión se tomó una alícuota de 1 mL, la cual fue transferida a un matraz Erlenmeyer y adicionada con fenolftaleína como indicador. La valoración se efectuó mediante la adición controlada de hidróxido de sodio 0,1 N, previamente estandarizado, con agitación constante hasta la aparición de una coloración rosada persistente durante al menos 30 segundos, correspondiente al punto final de la titulación. Dada la reducida magnitud del volumen consumido, la adición del titulante se realizó empleando micropipeta, registrándose el gasto en microlitros. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado.

La acidez titulable se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\% p/v = \frac{V_{NaOH} \times N_{NaOH} \times mEq_{ácido}}{V_{alícuota}} \times 100$$

Donde:

- V_{NaOH} = volumen de hidróxido de sodio consumido en la titulación (mL)
- N_{NaOH} = normalidad del hidróxido de sodio (0,1 N)
- $mEq_{ácido}$ = peso miliequivalente del ácido gálico (0,170 g/mEq)
- $V_{alícuota}$ = volumen de la alícuota titulada (1 mL)

Sustituyendo las condiciones experimentales empleadas y expresando el gasto de titulante en microlitros, la expresión se simplifica a:

$$\% p/v = \text{Gasto } (\mu\text{L}) \times 0,0017$$

3.4.3. Caracterización funcional del producto terminado

3.4.3.1. Capacidad antioxidante por el Método DPPH

La determinación de la capacidad antioxidante se realizó mediante el ensayo de captación del radical libre 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH), siguiendo el protocolo implementado en el Instituto de Investigación Tecnológica Agroindustrial de la Universidad Nacional del Santa, basado en la metodología propuesta por Thaipong et al. (2006) y adaptado al formato de microplaca. El fundamento del método reside en la reducción del radical DPPH, de coloración violeta intensa y absorbancia máxima a 515 nm, por acción de los compuestos antioxidantes presentes en la muestra, lo que origina una disminución proporcional de la absorbancia registrada.

La solución madre de DPPH 1 mM se preparó disolviendo 0,004 g del reactivo y aforando a 10 mL con metanol. A partir de esta se obtuvo la solución de trabajo, mediante dilución con metanol absoluto hasta alcanzar una absorbancia cercana a 0,800 a una longitud de onda de 515 nm. La solución madre de Trolox 1 mM se preparó disolviendo 0,0125 g del estándar y aforando a 50 mL con metanol. Las soluciones de extracción se prepararon en dos sistemas: una mezcla de metanol y agua destilada en proporción 50:50 v/v, acidificada a pH 2 con ácido clorhídrico 2 N, y una mezcla de acetona y agua destilada en proporción 70:30 v/v.

Se construyó una curva de calibración con ocho estándares de Trolox, en concentraciones de 5, 10, 25, 50, 100, 200, 400 y 500 μM , obtenidos por dilución de la solución madre con metanol conforme al principio de conservación de masa ($C_1V_1 = C_2V_2$), e incluyendo adicionalmente un blanco de reactivos. Cada estándar se procesó por triplicado bajo idénticas condiciones que las muestras.

Las infusiones se prepararon empleando una relación de 2 g de material seco por cada 100 mL de agua destilada, equivalente a una proporción de 1:50, coincidente con la utilizada en las restantes determinaciones. El agua se calentó hasta 100 °C y se vertió sobre el sobre filtrante, manteniéndose un tiempo de infusión de 5 minutos, tras el cual el

sobre fue retirado sin exprimirlo. La infusión obtenida se dejó enfriar hasta temperatura ambiente antes de proceder a la extracción.

Sobre la infusión se aplicó el procedimiento de doble extracción secuencial establecido en el protocolo. Una alícuota de 5 mL de muestra líquida se combinó con 20 mL de la solución de metanol y agua a pH 2, sometándose a baño ultrasónico durante 30 minutos y posterior centrifugación a 4000 rpm durante 20 minutos, tras lo cual se separó el sobrenadante (A). Al residuo resultante se le adicionaron 20 mL de la solución de acetona y agua, repitiéndose el baño ultrasónico durante 30 minutos y la centrifugación a 4000 rpm durante 20 minutos, obteniéndose el sobrenadante (B). Ambos sobrenadantes se combinaron y constituyeron el extracto empleado para la determinación. Durante la totalidad del procedimiento, los tubos se mantuvieron cubiertos con papel aluminio a fin de evitar la fotodegradación de los compuestos fenólicos.

Con carácter previo al análisis definitivo, se ensayaron distintos factores de dilución del extracto para cada tratamiento, seleccionándose en cada caso aquel que proporcionó la mayor capacidad antioxidante y cuya respuesta se situó dentro del rango lineal de la curva de calibración.

Las determinaciones se realizaron en microplacas de 96 pozos empleando un lector multimodal BioTek Synergy H1. Se dispensaron 10 µL de cada estándar de la curva de calibración, del blanco de muestra y del extracto correspondiente a cada tratamiento, todos ellos por triplicado, sobre los cuales el sistema de inyección automática del equipo dispuso la solución de trabajo de DPPH. Las placas se mantuvieron en oscuridad durante 30 minutos, a fin de permitir la reacción entre los compuestos antioxidantes y el radical, transcurridos los cuales se registró la absorbancia a 515 nm mediante el protocolo DPPH configurado en el equipo.

El porcentaje de reducción del radical DPPH se determinó, tanto para los estándares de la curva como para las muestras, mediante las siguientes ecuaciones:

Para la curva de calibración:

$$\% \text{DPPH reducido} = \frac{A_0 - (STD_n - BLK)}{A_0} \times 100$$

Para las muestras:

$$\%DPPH \text{ reducido} = \frac{A_0 - (SPL_m - BLK_m)}{A_0} \times 100$$

Donde:

- A_0 = absorbancia de la solución de DPPH sin muestra
- STD_n = absorbancia del estándar de Trolox correspondiente
- SPL_m = absorbancia de la muestra
- BLK = absorbancia del blanco de reactivos
- BLK_m = absorbancia del blanco de la muestra

Los porcentajes de reducción obtenidos para los estándares se graficaron frente a sus respectivas concentraciones de Trolox, obteniéndose por regresión lineal la ecuación de la curva patrón:

$$\%DPPH \text{ reducido} = a \cdot C_{Trolox} + b$$

Donde a corresponde a la pendiente de la recta, b al intercepto y C_{Trolox} a la concentración del estándar expresada en micromoles por litro.

La concentración equivalente de Trolox de cada muestra se determinó por interpolación en dicha ecuación y se multiplicó posteriormente por el factor de dilución correspondiente. Los resultados se expresaron como micromoles de equivalentes de Trolox por litro de infusión ($\mu\text{mol ET/L}$). Todas las determinaciones se realizaron por triplicado.

3.4.3.2. Expresión del aporte antioxidante por unidad de consumo

La capacidad antioxidante determinada mediante el método DPPH se expresa por litro de infusión, magnitud apropiada para la comparación entre tratamientos pero que no refleja de manera directa el aporte que recibe el consumidor por cada unidad de producto. Con el objeto de dimensionar dicho aporte y de permitir su contraste con los valores de

referencia de ingesta antioxidante dietaria disponibles en la literatura, los resultados se expresaron adicionalmente sobre dos bases complementarias: por sobre filtrante y por gramo de material seco.

La conversión se fundamenta en la relación de preparación establecida en el apartado correspondiente, de 1 g de material seco por cada 50 mL de agua, y en la dosificación de 2 g por sobre filtrante, de modo que cada unidad de producto genera 100 mL de infusión. El aporte por unidad de consumo se calculó conforme a la expresión siguiente:

$$\text{Aporte por sobre } (\mu\text{mol ET}) = \text{capacidad antioxidante } (\mu\text{mol ET/L}) \times 0,100 \text{ L}$$

El aporte por gramo de material seco se obtuvo dividiendo el valor anterior entre la masa dosificada por unidad:

$$\text{Aporte por gramo } (\mu\text{mol ET/g}) = \frac{\text{aporte por sobre } (\mu\text{mol ET})}{2 \text{ g}}$$

La desviación estándar asociada a cada valor se transformó aplicando el mismo factor de conversión, por tratarse de una transformación lineal que no modifica el coeficiente de variación.

Estas expresiones no introducen supuesto alguno sobre la eficiencia de extracción, por cuanto la determinación se realizó directamente sobre la infusión ya preparada; el valor medido corresponde, por tanto, a los compuestos efectivamente transferidos a la bebida bajo las condiciones de preparación establecidas, y no a la totalidad de los compuestos presentes en la materia prima.

3.4.4. Análisis sensorial mediante escala visual analógica (VAS)

La evaluación sensorial se realizó mediante una prueba de aceptabilidad empleando una escala visual analógica (VAS) de tipo hedónico, con el objeto de determinar el grado de aceptación de los atributos color, olor, sabor y aceptabilidad general de las infusiones filtrantes correspondientes a los ocho tratamientos del diseño experimental, que se presenta en el Anexo 1.

3.4.4.1. Panel de evaluación y determinación del tamaño de muestra

El número de evaluadores se estableció tomando como referencia el valor publicado por Hough et al. (2006), quienes determinaron que se requieren 112 consumidores para detectar una diferencia equivalente al 10 % de la amplitud de la escala con un nivel de significancia del 5 % y una potencia del 90 %, a partir del error estándar promedio obtenido de 108 estudios realizados en cinco países. La norma ISO 11136:2014 (ISO, 2014) dispone que el tamaño de la muestra de consumidores debe derivarse de un cálculo de potencia; sin embargo, dicho cálculo exige conocer la varianza del error de la respuesta sensorial, magnitud que no se encuentra disponible antes de ejecutar la evaluación. Por esta razón se adoptó la referencia publicada como criterio de convocatoria y se convocó un panel de 105 evaluadores, cifra del mismo orden que la señalada por dichos autores.

Concluida la evaluación y disponible ya la varianza del error de cada atributo, el requerimiento se verificó mediante el cálculo directo. Dado que el análisis contempla la comparación múltiple de las ocho combinaciones experimentales, el valor crítico se ajustó conforme al procedimiento de Tukey, según la expresión siguiente:

$$N = \frac{2\sigma^2 \left(\frac{q}{\sqrt{2}} + t_{\beta} \right)^2}{d^2}$$

donde:

N = número de evaluadores requerido

σ^2 = cuadrado medio del error del modelo que incorpora al panelista como bloque

q = valor crítico de la distribución del rango studentizado para un nivel de significancia de 0,05 y ocho tratamientos

t_{β} = valor de la distribución t asociado a la potencia establecida

d = diferencia mínima detectable, expresada en puntos de la escala

La división de q entre la raíz de dos corresponde al ajuste por comparaciones múltiples de Tukey, mientras que el factor 2 del numerador recoge que la diferencia se establece entre dos medias independientes.

Se adoptaron un nivel de significancia de 0,05, una potencia del 90 % y una diferencia mínima detectable de 0,9 puntos, equivalente al 10 % de la amplitud de la escala empleada, la cual comprende 9 unidades entre sus valores extremos de 1 y 10. Los cuadrados medios del error de los modelos con panelista como bloque fueron de 1,5023 para color, 1,0738 para olor, 2,0861 para sabor y 1,3235 para aceptabilidad general, todos con 728 grados de libertad, a los que corresponden valores de $q = 4,2989$ y de t asociado a la potencia de 1,2827.

La aplicación de la expresión arrojó requerimientos de 70 evaluadores para color, 50 para olor, 97 para sabor y 62 para aceptabilidad general. El desarrollo correspondiente al sabor, atributo de mayor dispersión y por tanto el más exigente, es el siguiente:

$$N = \frac{2(2,0861)(3,0398 + 1,2827)^2}{0,81} = 96,24$$

Por tratarse de un tamaño mínimo, el resultado se redondeó al entero inmediato superior, de modo que el requerimiento del estudio quedó establecido en 97 evaluadores. Se adoptó este valor por corresponder al atributo más exigente, con lo que el tamaño de panel resulta adecuado para la totalidad de los atributos evaluados. El panel de 105 evaluadores efectivamente empleado superó dicho requerimiento en ocho unidades, de manera que la potencia del 90 % establecida quedó asegurada en los cuatro atributos.

El panel estuvo conformado por 105 evaluadores no entrenados, integrado por estudiantes de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial y del Centro Preuniversitario de la Universidad Nacional del Santa, con edades comprendidas entre 18 y 25 años. Los participantes cumplieron los criterios de admisión establecidos, consistentes en encontrarse en adecuado estado de salud y abstenerse del consumo de alimentos de aroma intenso y del uso de fragancias durante el periodo previo a la evaluación. La participación fue voluntaria y los evaluadores fueron informados previamente sobre la naturaleza del producto y sus componentes. La totalidad de las evaluaciones se llevó a cabo en una única jornada, de modo que los ocho tratamientos fueron valorados por todos los evaluadores

bajo idénticas condiciones de preparación y presentación. La selección de consumidores no entrenados responde al carácter de la prueba, orientada a estimar la aceptación del producto por parte del público objetivo.

3.4.4.2. Preparación y presentación de las muestras

Las infusiones se prepararon empleando una relación de 2 g de material seco por cada 100 mL de agua destilada, equivalente a una proporción de 1:50, coincidente con la utilizada en la caracterización fisicoquímica. El agua se llevó a 100 °C y se mantuvo un tiempo de reposo de 5 minutos, tras el cual la bolsa filtrante fue retirada sin exprimirla.

Las infusiones se sirvieron a una temperatura aproximada de 50 °C, conforme a la recomendación de Liu et al. (2025) para la evaluación sensorial de infusiones, en volúmenes de 15 mL por muestra y en recipientes uniformes codificados, de modo que los evaluadores desconocieran la identidad del tratamiento. Cada evaluador recibió las ocho muestras correspondientes a la totalidad de los tratamientos del diseño experimental.

La degustación se desarrolló en el área destinada a evaluación sensorial de la Planta Piloto Agroindustrial, de manera individual y en silencio, bajo condiciones controladas, proporcionándose agua sin gas entre muestras sucesivas para la limpieza del paladar, consideración especialmente relevante dada la naturaleza astringente de la matriz evaluada. Al haber valorado cada evaluador la totalidad de los ocho tratamientos, se obtuvieron 840 evaluaciones por atributo.

3.4.4.3. Instrumento de evaluación y conversión de las respuestas

Se empleó una ficha en la que cada atributo se representó mediante una línea continua de 9 cm, anclada en sus extremos y en su punto medio, correspondiendo el valor 1 al descriptor "Me disgusta mucho", el valor 5,5 al punto neutro "No me gusta ni me disgusta" y el valor 10 al descriptor "Me gusta mucho". Los evaluadores marcaron con una línea vertical sobre cualquier punto de la escala según su apreciación de aceptabilidad, sin restricción a categorías predefinidas.

La naturaleza continua de este instrumento constituye su principal ventaja frente a las escalas hedónicas estructuradas, por cuanto evita el agrupamiento de las respuestas en categorías discretas e incrementa la sensibilidad de la medición.

Concluida la totalidad de las sesiones, cada marca fue medida con regla graduada milimetrada. El valor asignado se obtuvo sumando una unidad a la distancia, expresada en centímetros, comprendida entre el extremo izquierdo de la línea y la marca realizada por el evaluador, conforme a la expresión siguiente:

$$\text{Valor asignado} = 1 + \text{distancia medida (cm)}$$

Esta equivalencia se deriva directamente del diseño del instrumento, en el cual la línea de 9 cm abarca las 9 unidades comprendidas entre los valores 1 y 10, de modo que cada centímetro corresponde a una unidad de la escala y el punto medio geométrico equivale al valor 5,5. Las lecturas se registraron con aproximación de 0,1 unidades, preservando así la naturaleza continua del instrumento y generando una variable continua por atributo, empleada en el análisis estadístico correspondiente.

3.5. Diseño experimental

3.5.1. Variables de estudio

3.5.1.1. Variables independientes

- Temperatura de secado: 40 y 60 °C
- Tiempo de secado: 3 y 6 horas
- Tamaño de partícula: 2000 y 850 µm

3.5.1.2. Variables dependientes

- Propiedades fisicoquímicas de la materia prima: humedad, cenizas y fibra dietética total
- Propiedades fisicoquímicas de la infusión: pH, °Brix, acidez total
- Propiedades funcionales (capacidad antioxidante)
- Propiedades sensoriales de la infusión: color, aroma, sabor y aceptación general de la infusión

3.5.2. Diseño factorial y codificación de tratamientos

La presente investigación empleó un diseño factorial completo 2^3 , correspondiente a tres factores evaluados en dos niveles cada uno, lo que genera ocho combinaciones

experimentales. Los factores considerados fueron el tiempo de secado, la temperatura de secado y el tamaño de partícula, seleccionados por su incidencia sobre las propiedades fisicoquímicas, funcionales y sensoriales de la infusión filtrante.

Tabla 12

Niveles de los factores evaluados en el diseño factorial 2³

Parámetros	Niveles	
	-1	1
Temperatura de secado (°C)	40	60
Tiempo de secado (h)	3	6
Granulometría de la molienda (µm)	850	2000

Nota. Los niveles se expresan tanto en valores codificados como en sus correspondientes valores naturales. Elaboración propia.

La combinación de los tres factores en sus dos niveles generó ocho tratamientos, identificados como T1 a T8, codificación que se mantiene de manera uniforme a lo largo de toda la investigación. La matriz experimental resultante se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 13

Matriz experimental del diseño factorial 2³

Tratamiento	Temperatura de secado (°C)	Tiempo de secado (h)	Tamaño de partícula (µm)	Codificación (A, B, C)
T1	40	3	850	-1, -1, -1
T2	40	3	2000	-1, -1, +1
T3	40	6	850	-1, +1, -1
T4	40	6	2000	-1, +1, +1
T5	60	3	850	+1, -1, -1
T6	60	3	2000	+1, -1, +1
T7	60	6	850	+1, +1, -1
T8	60	6	2000	+1, +1, +1

Nota. Elaboración propia.

El diseño adoptado permite estimar los tres efectos principales, las tres interacciones dobles y la interacción triple entre los factores, lo que posibilita determinar no solo la influencia individual de cada variable independiente, sino también su comportamiento conjunto sobre las respuestas evaluadas.

3.5.3. Unidades experimentales y repeticiones

La unidad experimental estuvo constituida por el lote de raíz de ratania sometido a una combinación específica de temperatura de secado, tiempo de secado y tamaño de partícula, del cual se obtuvieron las infusiones filtrantes correspondientes a cada tratamiento.

La estructura de repeticiones difirió según la naturaleza de la determinación realizada. En el caso de las variables fisicoquímicas de la infusión, correspondientes al pH, los sólidos solubles totales y la acidez titulable, así como de la variable funcional relativa a la capacidad antioxidante, cada tratamiento fue evaluado por triplicado, generándose 24 observaciones por variable. Las determinaciones fisicoquímicas de la materia prima, comprendiendo humedad, cenizas y fibra dietética total, se realizaron igualmente por triplicado sobre el material previo al procesamiento.

En el caso de las variables sensoriales, correspondientes a los atributos color, olor, sabor y aceptabilidad general, la estructura fue distinta. Cada uno de los 105 panelistas evaluó la totalidad de los ocho tratamientos, obteniéndose 840 evaluaciones por atributo. Bajo este esquema, cada panelista constituye un bloque completo, dado que dentro de él se encuentran representados todos los tratamientos del diseño. Esta condición determina que las observaciones sensoriales no sean independientes entre sí y fundamenta el modelo estadístico adoptado, según se detalla en el apartado correspondiente.

El diseño resultó completamente balanceado en todos los casos, con igual número de observaciones por tratamiento, condición que garantiza la ortogonalidad de los efectos y confiere al estadístico F robustez frente a desviaciones moderadas de los supuestos distribucionales.

3.6. Metodología estadística

3.6.1. Modelo estadístico

3.6.1.1. Modelo para variables fisicoquímicas y funcionales

Las variables fisicoquímicas de la infusión y la variable funcional se analizaron mediante un diseño factorial 2^3 completamente al azar, cuyo modelo estadístico se expresa de la siguiente manera:

$$Y_{ijkl} = \mu + A_i + B_j + C_k + (AB)_{ij} + (AC)_{ik} + (BC)_{jk} + (ABC)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde:

- Y_{ijkl} = valor observado de la variable respuesta
- μ = media general
- A_i = efecto del i-ésimo nivel de la temperatura de secado
- B_j = efecto del j-ésimo nivel del tiempo de secado
- C_k = efecto del k-ésimo nivel del tamaño de partícula
- $(AB)_{ij}$ = efecto de la interacción entre temperatura y tiempo de secado
- $(AC)_{ik}$ = efecto de la interacción entre temperatura y tamaño de partícula
- $(BC)_{jk}$ = efecto de la interacción entre tiempo de secado y tamaño de partícula
- $(ABC)_{ijk}$ = efecto de la interacción triple entre los tres factores
- ε_{ijkl} = error experimental asociado a la l-ésima repetición

En este modelo, cada determinación analítica constituye una observación independiente, dado que las mediciones instrumentales se realizaron sobre alícuotas distintas sin que exista relación estructural entre ellas. El error experimental recoge, por tanto, la variabilidad atribuible a la repetibilidad del método analítico y a la heterogeneidad propia de la materia prima.

3.6.1.2. Modelo para variables sensoriales con bloque de panelista

Las variables sensoriales se analizaron mediante un diseño factorial 2^3 en bloques completos al azar, incorporando al panelista como factor de bloqueo. Esta decisión responde a que cada uno de los 105 panelistas evaluó la totalidad de los ocho tratamientos, obteniéndose 840 evaluaciones por atributo, de modo que las ocho calificaciones emitidas por un mismo evaluador comparten su criterio personal de puntuación y no constituyen observaciones independientes entre sí.

El modelo estadístico correspondiente se expresa de la siguiente manera:

$$Y_{ijkl} = \mu + P_l + A_i + B_j + C_k + (AB)_{ij} + (AC)_{ik} + (BC)_{jk} + (ABC)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde:

- Y_{ijkl} = puntaje otorgado por el l -ésimo panelista al tratamiento definido por el i -ésimo nivel de temperatura de secado, el j -ésimo nivel de tiempo de secado y el k -ésimo nivel de tamaño de partícula
- μ = media general
- P_l = efecto del l -ésimo panelista, considerado como bloque
- A_i = efecto del i -ésimo nivel de la temperatura de secado
- B_j = efecto del j -ésimo nivel del tiempo de secado
- C_k = efecto del k -ésimo nivel del tamaño de partícula
- $(AB)_{ij}$, $(AC)_{ik}$, $(BC)_{jk}$ = efectos de las interacciones dobles
- $(ABC)_{ijk}$ = efecto de la interacción triple
- ε_{ijkl} = error experimental

Los índices toman los valores $i = 1, 2$ para los niveles de temperatura de secado de 40 y 60 °C; $j = 1, 2$ para los de tiempo de secado de 3 y 6 h; $k = 1, 2$ para los de tamaño de partícula de 850 y 2000 μm ; y $l = 1, 2, \dots, 105$ para el panelista. El modelo no incorpora términos de interacción entre el bloque y los factores experimentales, dado que al

disponerse de una sola observación por panelista y tratamiento dicha interacción queda confundida con el error experimental.

La incorporación del término P_1 permite extraer del error experimental la variabilidad atribuible a las diferencias de criterio entre evaluadores, la cual constituye una fuente de variación ajena a los factores en estudio. El panelista se trata como factor de control y no como factor experimental; al encontrarse el diseño completamente balanceado, las pruebas F correspondientes a los efectos de los tratamientos resultan idénticas con independencia de que el bloque se considere de efectos fijos o aleatorios. Con la finalidad de justificar esta decisión metodológica, en cada atributo sensorial se ajustaron y compararon ambos modelos, el que omite el bloque y el que lo incorpora, presentándose la comparación correspondiente en el capítulo de resultados. El nivel de significancia empleado en todos los análisis fue de $\alpha = 0,05$.

3.6.2. Análisis de varianza

El análisis de varianza se aplicó a la totalidad de las variables dependientes evaluadas, con el objeto de determinar la significancia estadística de los efectos principales de la temperatura de secado, el tiempo de secado y el tamaño de partícula, así como de sus interacciones dobles y de la interacción triple. El nivel de significancia empleado fue de $\alpha = 0,05$ en todos los casos.

Para cada variable se reportan la suma de cuadrados, los grados de libertad, el cuadrado medio, el estadístico F, el valor de probabilidad asociado y la contribución porcentual de cada fuente de variación. Esta última se calculó como la razón entre la suma de cuadrados de cada efecto y la suma de cuadrados total, y permite dimensionar la importancia relativa de cada factor más allá de su significancia estadística, información particularmente útil cuando un efecto resulta significativo, pero de magnitud reducida.

Se reportan asimismo el coeficiente de determinación del modelo y el coeficiente de variación experimental, este último calculado como la razón entre la raíz cuadrada del cuadrado medio del error y la media general de la variable, expresada en porcentaje. Ambos indicadores permiten evaluar la capacidad explicativa del modelo y la precisión del experimento.

En el caso de las variables sensoriales, y conforme a lo señalado en el apartado precedente, se ajustaron dos modelos por cada atributo, uno que omite el efecto del panelista y otro que lo incorpora como bloque, presentándose una tabla comparativa entre ambos con el fin de justificar la decisión metodológica adoptada y evidenciar el efecto de dicha incorporación sobre el cuadrado medio del error, el coeficiente de determinación y las conclusiones de significancia.

Cuando alguna interacción resultó estadísticamente significativa, se procedió al análisis de efectos simples, procedimiento que permite evaluar el efecto de un factor dentro de cada nivel de los restantes y precisar así el comportamiento de la interacción detectada.

3.6.3. Verificación de supuestos

La validez de las conclusiones derivadas del análisis de varianza se encuentra condicionada al cumplimiento de dos supuestos fundamentales, cuya verificación se realizó sobre los residuales de cada modelo ajustado.

La normalidad de los residuales se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk, contrastando la hipótesis nula de que los residuales proceden de una distribución normal. La homogeneidad de varianzas se evaluó mediante la prueba de Levene con centrado en la mediana, considerando las ocho combinaciones experimentales y contrastando la hipótesis nula de igualdad de varianzas entre tratamientos.

De manera complementaria, la verificación se apoyó en el análisis gráfico de los residuales, mediante el gráfico cuantil-cuantil para la evaluación de la normalidad y el gráfico de residuales frente a valores ajustados para la evaluación de la homocedasticidad y la detección de patrones sistemáticos.

En ambos casos se adoptó un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. Cuando alguno de los supuestos no se cumplió, dicha circunstancia se reportó de manera explícita, se analizaron sus causas y se aplicaron las pruebas de respaldo descritas en el apartado siguiente, conforme al criterio de que la transparencia en el reporte de los supuestos constituye un requisito de rigor metodológico.

3.6.4. Pruebas no paramétricas de respaldo

Con la finalidad de verificar que las conclusiones obtenidas no dependieran del cumplimiento del supuesto de normalidad, se establecieron pruebas de contraste que no requieren dicho supuesto, aplicadas en aquellas variables en las que la prueba de Shapiro-Wilk rechazó la hipótesis de normalidad de los residuales. La selección de la prueba se realizó en función de la estructura del diseño correspondiente a cada variable.

Para las variables sensoriales se empleó la prueba de Friedman, procedimiento no paramétrico específicamente diseñado para diseños en bloques completos, el cual opera sobre los rangos que cada panelista asigna a los tratamientos evaluados y constituye, por tanto, la alternativa apropiada a la estructura de bloques del presente estudio. Dado que en la totalidad de los atributos sensoriales el supuesto de normalidad resultó rechazado, esta prueba se aplicó a los cuatro atributos evaluados.

Para las variables fisicoquímicas y funcionales, cuyo diseño corresponde a un esquema completamente al azar, se estableció la prueba de Kruskal-Wallis como alternativa no paramétrica, la cual contrasta la existencia de diferencias entre tratamientos a partir de los rangos de las observaciones. Esta prueba se aplicó únicamente en aquellas variables en las que el supuesto de normalidad no se cumplió.

Adicionalmente, en las variables que presentaron las desviaciones de mayor consideración respecto de la normalidad, se aplicó un análisis de varianza por permutaciones, procedimiento que no asume distribución alguna para los residuales y que permite contrastar la robustez de cada valor de probabilidad obtenido por la vía paramétrica. En el caso de las variables sensoriales, las permutaciones se realizaron dentro de cada bloque, a fin de respetar la estructura del diseño.

En todos los casos, la coincidencia entre las conclusiones del análisis paramétrico y las de las pruebas de respaldo se interpretó como evidencia de la validez de los resultados obtenidos.

3.6.5. Comparación múltiple de medias

Con el objeto de identificar entre qué tratamientos específicos existen diferencias estadísticamente significativas, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey

sobre las ocho combinaciones experimentales, empleando un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

La prueba de Tukey fue seleccionada por controlar la tasa de error conjunto del total de comparaciones por pares, condición necesaria dado que la comparación simultánea de ocho tratamientos implica 28 contrastes, situación en la que la aplicación de pruebas individuales incrementaría de manera inaceptable la probabilidad de detectar diferencias inexistentes.

Los resultados se presentan mediante la asignación de letras a cada tratamiento, de modo que aquellos que comparten al menos una letra no difieren entre sí de manera estadísticamente significativa. Se reporta asimismo la diferencia mínima significativa correspondiente a cada variable, valor que indica la magnitud que deben superar dos medias para considerarse distintas y que resulta indispensable para interpretar correctamente el alcance de la prueba.

Para las variables sensoriales, la prueba se realizó empleando el cuadrado medio del error del modelo que incorpora al panelista como bloque, dado que este constituye la estimación válida de la variabilidad residual una vez descontado el efecto del evaluador.

3.6.6. Criterio de selección del tratamiento óptimo

Conforme al tercer objetivo específico de la presente investigación, la determinación del tratamiento óptimo se realizó mediante la evaluación conjunta de las respuestas fisicoquímicas, funcionales y sensoriales, sin que ninguna de dichas dimensiones fuera considerada de manera aislada.

La selección se sustentó exclusivamente en las diferencias que alcanzaron significancia estadística según la prueba de comparaciones múltiples, evitándose la atribución de superioridad a tratamientos cuya ventaja numérica no resultara respaldada por dicha prueba. En consecuencia, cuando dos o más tratamientos no presentaron diferencias estadísticamente significativas en una respuesta determinada, se consideraron equivalentes respecto de ella, y la decisión se trasladó a las restantes respuestas evaluadas.

Cuando la equivalencia estadística se mantuvo en la totalidad de las respuestas, la selección se resolvió atendiendo a criterios de ingeniería de proceso, considerando

preferible aquella combinación que implicara un menor consumo energético en las operaciones de secado y molienda.

3.6.7. Software estadístico

La totalidad de los análisis estadísticos se realizó mediante el programa R, versión 4.6.0, ejecutado en el entorno de desarrollo RStudio bajo sistema operativo Windows.

Se emplearon los paquetes readxl para la importación de los datos, dplyr para su procesamiento, car para la prueba de Levene, emmeans para la estimación de medias marginales y el análisis de efectos simples, multcomp y multcompView para las comparaciones múltiples y la asignación de letras, ggplot2 para la elaboración de los gráficos y writexl para la exportación de resultados. El análisis de varianza y las pruebas de normalidad se realizaron mediante las funciones del paquete base del programa.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Caracterización fisicoquímica de la materia prima

Con la finalidad de establecer las condiciones iniciales del material empleado, se realizó la caracterización fisicoquímica de la raíz de ratania (*Krameria lappacea*), determinándose el contenido de humedad, cenizas totales y fibra dietética total. Corresponde precisar que la materia prima fue recepcionada en estado deshidratado, condición en la que se comercializa habitualmente esta especie, cuyo mercado nacional e internacional opera exclusivamente sobre raíz seca sometida a deshidratación artesanal por parte de los recolectores (Brokamp et al., 2012). En consecuencia, la caracterización que se reporta corresponde al material tal como ingresa al proceso, y constituye la línea base respecto de la cual se evalúan los efectos de los tratamientos aplicados. Los resultados obtenidos, expresados como la media de tres repeticiones con su respectiva desviación estándar, se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 14

Propiedades fisicoquímicas de la materia prima deshidratada de Ratania (Krameria lappacea)

Propiedad	Valor	CV (%)
Humedad (%)	11,16 ± 0,08	0,70
Cenizas (%)	3,85 ± 0,78	20,38
Fibra dietética total (%)	59,95 ± 0,39	0,65

Nota. Los valores representan la media ± desviación estándar de tres repeticiones (n = 3) y se expresan en base húmeda, sobre la muestra tal como fue recepcionada. CV: coeficiente de variación. Elaboración propia.

Los coeficientes de variación obtenidos evidencian una elevada precisión en las determinaciones de humedad y fibra dietética total, con valores inferiores al 1 %, mientras que el contenido de cenizas presentó una dispersión mayor, atribuible a la heterogeneidad propia del material radicular y a la posible variabilidad en la cantidad de partículas minerales adheridas entre las distintas alícuotas analizadas.

4.1.1. Humedad

El contenido de humedad obtenido fue de $11,16 \pm 0,08$ %, valor que se sitúa dentro de los límites aceptables establecidos para la materia prima vegetal seca. La Organización Mundial de la Salud señala que el contenido de humedad en los materiales vegetales medicinales debe mantenerse en niveles reducidos, con la finalidad de prevenir el desarrollo microbiano, limitar las reacciones de degradación hidrolítica y garantizar la estabilidad del producto durante su almacenamiento (WHO, 2011). El valor determinado para *K. lappacea* resulta consistente con los límites de humedad exigidos por las normas técnicas aplicables a infusiones filtrantes de otras especies vegetales, que establecen un máximo comprendido entre el 9 y el 12 % (INACAL, 2021), así como con los criterios de calidad contemplados en la monografía europea de la droga vegetal, la cual incluye un ensayo de pérdida por desecación (ESCOP, 2017). En consecuencia, la materia prima presenta condiciones adecuadas de estabilidad para su conservación y su posterior procesamiento en la elaboración de la infusión filtrante.

4.1.2. Cenizas

El contenido de cenizas totales constituye un indicador del material inorgánico remanente tras la incineración de la muestra, y refleja la carga mineral intrínseca del tejido vegetal, así como la posible presencia de impurezas minerales de origen externo (WHO, 2011). El valor obtenido para *K. lappacea* fue de $3,85 \pm 0,78$ %, magnitud que se encuentra dentro del rango habitual reportado para raíces de plantas medicinales y que resulta coherente con la naturaleza radicular de la materia prima. Si bien las raíces, al desarrollarse en contacto directo con el suelo, tienden a acumular minerales, el valor observado se mantiene en un nivel moderado, lo que indica una baja proporción de impurezas minerales adheridas al material recepcionado, condición favorable considerando que la materia prima procede de recolección silvestre en suelos áridos y pedregosos (Brokamp et al., 2012).

La fracción mineral cuantificada como cenizas ha sido caracterizada elementalmente para esta especie. Aldakheel et al. (2021) determinaron, mediante espectroscopía de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente, que el calcio constituye el elemento mayoritario de la raíz con 24 168 mg/kg, seguido por el potasio con 2 281 mg/kg, el

magnesio con 1 150 mg/kg y el fósforo con 258 mg/kg, junto con hierro, manganeso, selenio, cobre, zinc y boro en concentraciones propias de elementos traza, conforme al perfil completo desarrollado en el marco teórico. Trasladadas a la unidad de consumo del producto desarrollado, dichas concentraciones equivalen a un aporte aproximado de 48,34 mg de calcio, 4,56 mg de potasio, 2,30 mg de magnesio y 0,52 mg de fósforo por sobre filtrante de 2 g, en el supuesto de transferencia completa del elemento a la infusión.

La predominancia del calcio resulta particularmente relevante para la interpretación de los resultados sensoriales del presente estudio, por cuanto los propios autores le atribuyen una participación directa en las propiedades astringentes características de la especie, lo que aporta una explicación complementaria a la habitualmente atribuida en exclusiva al contenido de taninos. Los mismos autores identificaron, junto a los elementos nutricionales, la presencia de aluminio, bario, cadmio y plomo, cuyas implicaciones para la inocuidad del producto se desarrollan en el marco teórico y se recogen en el apartado de recomendaciones.

Cabe destacar, finalmente, que el valor determinado se sitúa holgadamente por debajo del límite máximo de cenizas totales establecido por la normativa para infusiones filtrantes, que según la especie se fija en valores de hasta 10 a 12 % (INACAL, 2021), lo que respalda la calidad de la materia prima empleada.

4.1.3. Fibra dietética total

El contenido de fibra dietética total determinado fue de $59,95 \pm 0,39$ %, valor elevado que resulta congruente con la naturaleza leñosa y lignificada del tejido radicular de la ratania. Este resultado puede explicarse a partir de dos factores complementarios. En primer lugar, las raíces de las plantas leñosas presentan paredes celulares con altas proporciones de celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes que constituyen la fracción de fibra dietética total. En segundo lugar, y de manera particularmente relevante para esta especie, el método enzimático-gravimétrico empleado cuantifica dentro de la fracción de fibra no solo los polisacáridos de la pared celular, sino también fracciones de lignina y otros compuestos asociados a los polisacáridos vegetales, tales como fracciones proteicas, compuestos fenólicos, ceras, saponinas, fitatos, cutina y fitoesteroles que precipitan junto con el residuo durante el ensayo (McCleary, 2023). Dado el elevado

contenido de taninos, proantocianidinas y demás polifenoles característicos de la corteza radicular de *K. lappacea*, resulta esperable que una fracción de estos compuestos precipite en el medio etanólico y se contabilice como parte de la fibra dietética total, contribuyendo al valor observado. Esta interferencia constituye una limitación reconocida del método gravimétrico cuando se aplica a matrices ricas en compuestos fenólicos (McCleary, 2023), por lo que el valor reportado debe interpretarse como fibra dietética total aparente.

4.1.4. Consideraciones generales de la caracterización

No se dispone de estudios previos que reporten el contenido de fibra dietética total, humedad o cenizas para la raíz de *Krameria lappacea*, dado que la investigación sobre la especie se ha orientado tradicionalmente hacia la caracterización de sus extractos con fines farmacológicos, y no hacia su análisis proximal como materia prima alimentaria (ESCOP, 2017). Esta ausencia de referentes directos, lejos de constituir una limitación del presente trabajo, subraya su aporte como una de las primeras caracterizaciones físicoquímicas de la ratania orientada a su aprovechamiento en la industria de infusiones filtrantes funcionales.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que la materia prima empleada reunió las condiciones requeridas para su procesamiento. El contenido de humedad garantizó la estabilidad del material durante el almacenamiento previo, el nivel de cenizas evidenció una baja proporción de impurezas minerales en el material recepcionado, y el elevado contenido de fibra dietética resulta coherente con la naturaleza radicular del material. Sobre esta base se aplicaron los tratamientos de secado y molienda correspondientes al diseño experimental, cuyos efectos sobre las propiedades de la infusión se presentan en los apartados siguientes.

4.2. Obtención de la infusión filtrante

La elaboración de la infusión filtrante de ratania se desarrolló conforme al flujo de operaciones descrito en el apartado metodológico, comprendiendo la recepción, selección y clasificación, lavado y desinfección, reducción de tamaño, secado, molienda, tamizado, pesado, enfundado y almacenamiento. La totalidad del proceso se ejecutó en una sola jornada y a partir de un único lote de materia prima, con el objeto de eliminar la variabilidad atribuible a diferencias de procedencia o a condiciones ambientales de

almacenamiento entre jornadas. En el presente apartado se reportan el balance de materia de cada operación, el rendimiento alcanzado y las características del producto obtenido, información que responde al segundo objetivo específico de la investigación.

4.2.1. Balance de materia del proceso

Se procesó un lote de 2,347 kg de raíz seca de ratania, adquirida en estado deshidratado conforme a la modalidad habitual de comercialización de la especie, cuyo mercado nacional e internacional opera exclusivamente sobre raíz seca (Brokamp et al., 2012). El balance de materia correspondiente a las operaciones previas al secado se presenta en la tabla siguiente.

Tabla 15

Balance de materia de las operaciones de acondicionamiento de la materia prima

Operación	Entrada (g)	Salida (g)	Merma (g)	Merma (%)	Naturaleza de la merma
Recepción	2347,0	2347,0	0,0	0,00	Sin merma
Selección y clasificación	2347,0	2206,2	140,8	6,00	Material extraño y fragmentos no conformes
Lavado y desinfección	2206,2	2206,2	0,0	0,00	Sin merma cuantificable
Reducción de tamaño	2206,2	2182,0	24,2	1,10	Finos y partículas dispersadas

Nota. Los valores corresponden a un único lote procesado en una sola jornada. La operación de lavado y desinfección se realizó por inmersión en solución de hipoclorito de sodio de 100 ppm de cloro activo durante 5 a 10 minutos, seguida de escurrido; el material se pesó una vez eliminada el agua superficial, razón por la cual no se registró variación de masa atribuible a esta etapa. Elaboración propia.

La operación de selección y clasificación concentró la mayor merma de esta fase, con un 6,00 % de la masa recepcionada, correspondiente a restos de otras especies vegetales, fragmentos deteriorados y material extraño adherido. Esta proporción resulta esperable en materia prima procedente de recolección silvestre, condición que caracteriza a la

totalidad del abastecimiento comercial de la especie (Brokamp et al., 2012), y constituye una etapa indispensable para garantizar la homogeneidad del lote.

La reducción de tamaño generó una merma menor, del 1,10 %, atribuible a fragmentos finos dispersados durante el fraccionamiento manual. El material acondicionado, con una masa de 2182,0 g, fue dividido en cuatro porciones iguales de 545,5 g, cada una destinada a una de las combinaciones de temperatura y tiempo de secado establecidas en el diseño experimental.

El comportamiento del material durante el secado se presenta en la tabla siguiente.

Tabla 16

Balance de materia y pérdida de humedad durante la operación de secado

Condición de secado	Entrada (g)	Salida (g)	Agua evaporada (g)	Pérdida (%)	Humedad final (%)
40 °C, 3 h	545,5	528,9	16,6	3,04	8,37
40 °C, 6 h	545,5	524,5	21,0	3,85	7,60
60 °C, 3 h	545,5	521,8	23,7	4,34	7,12
60 °C, 6 h	545,5	517,4	28,1	5,15	6,33

Nota. La humedad final se calculó a partir del contenido de materia seca del material recepcionado, determinado sobre la base de su humedad inicial. Elaboración propia.

La pérdida de masa durante el secado osciló entre el 3,04 % y el 5,15 %, magnitudes coherentes con la condición deshidratada de la materia prima recepcionada. El comportamiento observado responde al efecto conjunto de la temperatura y del tiempo: la combinación más severa, correspondiente a 60 °C durante 6 h, produjo la mayor pérdida de agua y el menor contenido de humedad final, mientras que la menos intensa, de 40 °C durante 3 h, generó la pérdida más reducida.

La totalidad de los tratamientos alcanzó valores de humedad final comprendidos entre 6,33 % y 8,37 %, situándose por debajo del límite máximo del 9 al 12 % establecido por la normativa para infusiones filtrantes (INACAL, 2021) y del criterio general del 12 % fijado por la Organización Mundial de la Salud para materiales vegetales medicinales (WHO, 2011). Este resultado confirma que la totalidad de los tratamientos generó

material microbiológicamente estable, condición indispensable para su conservación durante el almacenamiento.

Las operaciones de molienda y tamizado se presentan de manera conjunta, dado que constituyen etapas consecutivas realizadas sobre el mismo material sin pesaje intermedio.

Tabla 17

Balance de materia de las operaciones de molienda y tamizado

Condición de secado	Entrada (g)	Fracción 2000 μm (g)	Fracción 850 μm (g)	Merma granulométrica (g)	Merma (%)
40 °C, 3 h	528,9	205,4	181,8	141,7	26,79
40 °C, 6 h	524,5	177,8	148,6	198,1	37,77
60 °C, 3 h	521,8	220,1	107,6	194,1	37,20
60 °C, 6 h	517,4	217,7	148,7	151,0	29,18

Nota. La molienda se realizó en molino manual de laboratorio y el tamizado mediante tamices normalizados de 850 y 2000 μm dispuestos en tamizador eléctrico, con tiempos de operación de 5 a 8 minutos por lote. La merma granulométrica corresponde a las fracciones que no quedaron retenidas en el intervalo de tamaño establecido por el diseño experimental. Elaboración propia.

La merma granulométrica osciló entre el 26,79 % y el 37,77 %, constituyendo la mayor pérdida del proceso. Esta magnitud resulta esperable en el fraccionamiento de material leñoso, dado que la molienda genera una distribución continua de tamaños de la cual solo se aprovechan las dos fracciones definidas por el diseño experimental.

Resulta destacable que la proporción de merma no fue uniforme entre los lotes. Los materiales secados durante 6 h a 40 °C y durante 3 h a 60 °C registraron las mermas más elevadas, superiores al 37 %, mientras que los secados a 40 °C durante 3 h y a 60 °C durante 6 h se mantuvieron por debajo del 30 %. Esta variación sugiere que las condiciones de secado modifican la fragilidad del material y, con ello, su comportamiento durante la reducción de tamaño, aspecto coherente con lo señalado por Beigi et al. (2025) respecto de que la deshidratación altera la porosidad y la estructura del tejido vegetal, condicionando su respuesta a las operaciones mecánicas posteriores.

4.2.2. Rendimiento del proceso

El rendimiento se calculó como la relación porcentual entre la masa de producto envasable obtenido y la masa de materia prima recepcionada. Los resultados por tratamiento se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 18

Rendimiento del proceso y número de unidades obtenidas por tratamiento

Tratamiento	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Tamaño de partícula (µm)	Masa obtenida (g)	Rendimiento (%)	Sobres de 2 g
T1	40	3	850	181,8	7,75	90
T2	40	3	2000	205,4	8,75	102
T3	40	6	850	148,6	6,33	74
T4	40	6	2000	177,8	7,58	88
T5	60	3	850	107,6	4,58	53
T6	60	3	2000	220,1	9,38	110
T7	60	6	850	148,7	6,34	74
T8	60	6	2000	217,7	9,28	108
Total				1407,7	59,98	699

Nota. El rendimiento se expresa respecto de la masa de materia prima recepcionada (2347,0 g). El número de sobres corresponde al cociente entre la masa obtenida y la dosificación de 2 g por unidad, redondeado al entero inferior. Elaboración propia.

El rendimiento global del proceso alcanzó el 59,98 %, lo que significa que de cada kilogramo de raíz seca recepcionada se obtuvieron aproximadamente 600 g de producto envasable. Del lote completo de 2,347 kg se obtuvieron 699 unidades distribuidas entre los ocho tratamientos.

La distribución del rendimiento entre tratamientos evidencia el efecto de la granulometría sobre el aprovechamiento del material. Las cuatro fracciones de 2000 µm concentraron el 58,3 % del producto total, con rendimientos individuales comprendidos entre 7,58 % y

9,38 %, mientras que las fracciones de 850 μm oscilaron entre 4,58 % y 7,75 %. Este comportamiento resulta esperable, dado que la molienda manual genera una proporción mayor de partículas gruesas que de partículas finas dentro del rango de interés.

El tratamiento T5 registró el menor rendimiento del conjunto, con 4,58 %, circunstancia atribuible a que el lote secado a 60 °C durante 3 h presentó simultáneamente una elevada merma granulométrica y la menor proporción de fracción fina.

Desde la perspectiva de la sostenibilidad del recurso, el rendimiento obtenido adquiere una relevancia que trasciende el ámbito productivo, dado el volumen de recolección destructiva que sostiene el abastecimiento comercial de la especie, descrito en el marco teórico (Brokamp et al., 2012). La optimización del aprovechamiento de cada unidad de materia prima recolectada constituye, en consecuencia, una contribución directa a la reducción de la presión de extracción sobre una especie catalogada como amenazada. Cabe señalar, además, que la merma granulométrica no constituye material perdido en términos absolutos, dado que las fracciones excluidas conservan íntegramente su composición fenólica y resultan susceptibles de reprocesamiento o de aprovechamiento en la obtención de extractos concentrados.

4.2.3. Características del producto obtenido

El producto terminado consistió en sobres filtrantes de tela con una dosificación de 2 g de material molido, cerrados manualmente mediante el cordón incorporado en el propio sobre y almacenados en bolsas selladas. La selección de un material textil para el sobre responde a la necesidad de garantizar la permeabilidad al agua caliente y la retención de las partículas sólidas, evitando el empleo de materiales plásticos susceptibles de liberar microplásticos y ésteres de ftalato durante la infusión (Sadat et al., 2023).

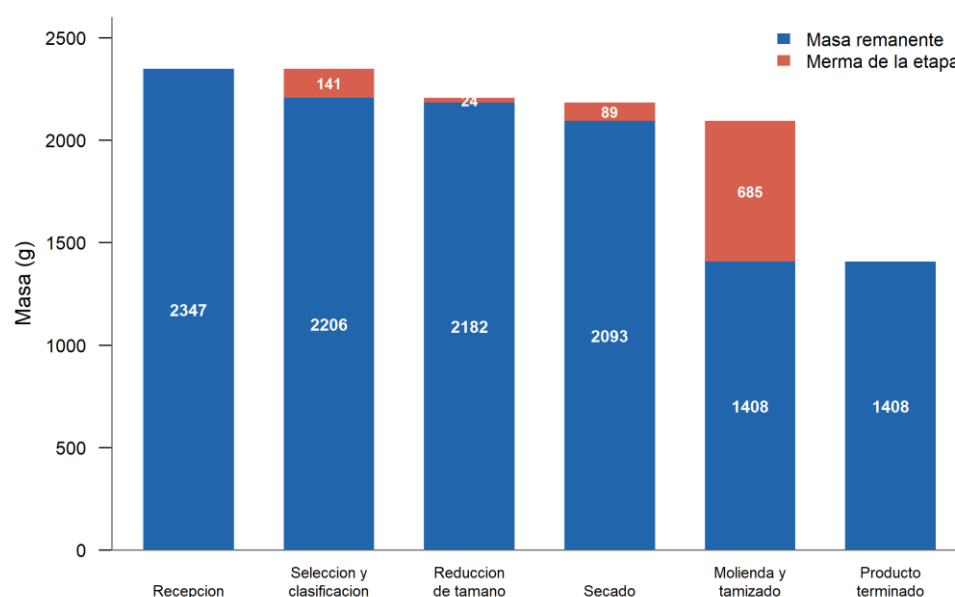
El material molido presentó la coloración pardo-rojiza característica de la corteza radicular de la especie, atribuible a su elevado contenido de taninos y proantocianidinas. Las dos fracciones granulométricas obtenidas mostraron diferencias apreciables en apariencia y comportamiento: la fracción de 850 μm presentó un aspecto de polvo fino y homogéneo, mientras que la de 2000 μm conservó una textura granular con fragmentos visibles del tejido leñoso.

Esta diferencia física reviste importancia tecnológica directa. La normativa aplicable establece que la granulometría del material contenido en el sobre filtrante debe impedir el paso de partículas excesivamente finas a través del papel o tejido, dado que ello generaría turbidez en la bebida (ISO, 2011). En el presente estudio, ninguna de las dos fracciones evaluadas presentó dicho inconveniente durante la preparación de las infusiones destinadas al análisis fisicoquímico y sensorial, lo que confirma que ambos niveles granulométricos resultan compatibles con el formato de sobre filtrante empleado.

Las unidades terminadas fueron almacenadas en ambiente limpio, seco y ventilado, protegidas de la exposición directa a la radiación solar, condiciones orientadas a preservar las propiedades del producto hasta el momento de su evaluación.

Figura 3

Distribución de la masa a lo largo del proceso de elaboración de la infusión filtrante de ratania



Nota. Los valores corresponden al procesamiento de un lote de 2347,0 g de raíz seca de ratania. Las barras representan la masa remanente tras cada operación y los segmentos superiores las mermas acumuladas. Elaboración propia.

4.3. Caracterización fisicoquímica de las infusiones filtrantes

La caracterización fisicoquímica de la infusión constituye el primer nivel de evaluación del producto obtenido, por cuanto los parámetros que la integran reflejan de manera directa la magnitud y la naturaleza de la extracción alcanzada durante la preparación de la bebida. El pH condiciona la estabilidad de los compuestos fenólicos y la percepción gustativa, los sólidos solubles totales constituyen un indicador global del rendimiento de extracción, y la acidez titulable cuantifica la totalidad de los compuestos de carácter ácido transferidos al medio acuoso. En los apartados siguientes se presentan los resultados obtenidos para cada uno de estos parámetros en las ocho combinaciones experimentales del diseño factorial 2³, cuyos valores se resumen en la tabla siguiente.

Tabla 19

Propiedades fisicoquímicas de las infusiones filtrantes de Krameria lappacea

Tratamiento	Propiedades		
	pH	°Brix	Acidez (% p/v)
T1	5,75 ± 0,02	1,74 ± 0,04	0,0170 ± 0,0002
T2	5,98 ± 0,01	1,43 ± 0,03	0,0128 ± 0,0001
T3	4,99 ± 0,02	1,40 ± 0,08	0,0137 ± 0,0002
T4	4,88 ± 0,02	1,41 ± 0,04	0,0162 ± 0,0002
T5	5,74 ± 0,02	2,21 ± 0,08	0,0196 ± 0,0002
T6	5,87 ± 0,04	1,71 ± 0,20	0,0187 ± 0,0002
T7	5,72 ± 0,02	1,95 ± 0,08	0,0222 ± 0,0003
T8	5,97 ± 0,02	1,18 ± 0,17	0,0179 ± 0,0002

Nota. Valores expresados como media ± desviación estándar de tres repeticiones (n = 3). El pH se determinó según el método AOAC 981.12, los sólidos solubles totales mediante refractometría directa según el método AOAC 932.12, y la acidez titulable mediante titulación ácido-base según los fundamentos del método AOAC 942.15, expresada como ácido gálico. Elaboración propia.

En los tres parámetros se aplicó el mismo procedimiento estadístico, consistente en un análisis de varianza correspondiente al diseño factorial completo 2³, que incorpora los efectos principales de la temperatura de secado (A), el tiempo de secado (B) y el

tamaño de partícula (C), las tres interacciones dobles y la interacción triple, con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

4.3.1. pH

El pH constituye uno de los parámetros fisicoquímicos de mayor relevancia en la caracterización de infusiones filtrantes, ya que condiciona la estabilidad de los compuestos fenólicos, la percepción sensorial de la bebida y su comportamiento frente al deterioro microbiológico.

Los valores de pH de las infusiones filtrantes oscilaron entre 4,883 y 5,977 unidades. El tratamiento T4, correspondiente a 40 °C, 6 h y 2000 μm , presentó el valor más bajo, mientras que el tratamiento T2, correspondiente a 40 °C, 3 h y 2000 μm , alcanzó el valor más elevado. Todos los tratamientos se ubicaron en el rango ligeramente ácido característico de las infusiones de hierbas. Los coeficientes de variación fueron inferiores al 0,75 % en las ocho combinaciones, lo que evidencia una elevada repetibilidad de la medición.

4.3.1.1. Análisis de varianza

Los resultados del análisis de varianza se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 20*Análisis de varianza del pH de las infusiones filtrantes*

Fuente	SC	gl	CM	F	p	Contribución (%)	Sig.
Modelo	3,864029	7	0,552004	1068,395	3,813E-20	99,79	***
A:							
Temperatura (°C)	1,079504	1	1,079504	2089,363	2,192E-18	27,88	***
B: Tiempo (h)	1,192604	1	1,192604	2308,266	9,934E-19	30,80	***
C: Tamaño de partícula (µm)	0,092504	1	0,092504	179,040	4,183E-10	2,39	***
AB	1,377604	1	1,377604	2666,331	3,156E-19	35,58	***
AC	0,026004	1	0,026004	50,331	2,540E-06	0,67	***
BC	0,017604	1	0,017604	34,073	2,524E-05	0,45	***
ABC	0,078204	1	0,078204	151,363	1,432E-09	2,02	***
Residual	0,008267	16	0,000517			0,21	
Total	3,872296	23				100	

Nota. SC: suma de cuadrados; gl: grados de libertad; CM: cuadrado medio. A: temperatura de secado; B: tiempo de secado; C: tamaño de partícula; AB, AC, BC: interacciones dobles; ABC: interacción triple. $R^2 = 0,9979$; R^2 ajustado = 0,9969; coeficiente de variación experimental = 0,40 %. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns: no significativo.

El modelo resultó altamente significativo ($F = 1068,395$; $p < 0,001$) y explicó el 99,79 % de la variabilidad total observada, con un coeficiente de variación experimental de 0,40 %, lo que evidencia una elevada precisión experimental. La totalidad de los efectos evaluados, tanto principales como interacciones, resultó estadísticamente significativa. Un resultado que merece atención particular es que la interacción entre temperatura y tiempo constituyó la fuente de variación con mayor contribución individual, con un 35,58 %, superando a cualquiera de los efectos principales considerados de forma aislada.

Los supuestos del modelo se verificaron satisfactoriamente. La prueba de Shapiro-Wilk no rechazó la hipótesis de normalidad de los residuales ($W = 0,9627$; $p = 0,4954$)

y la prueba de Levene confirmó la homogeneidad de varianzas entre las ocho combinaciones experimentales ($F = 0,349$; $p = 0,9185$). El análisis gráfico complementario, presentado en los Anexos 2 y 3, no evidenció desviaciones sistemáticas en el gráfico cuantil-cuantil ni patrones en la dispersión de los residuales frente a los valores ajustados. Los resultados del análisis de varianza se consideran, por tanto, estadísticamente válidos.

4.3.1.2. Efecto de los factores

Los tres factores evaluados ejercieron efectos significativos sobre el pH de la infusión, si bien de magnitud desigual. El tiempo de secado presentó la mayor contribución individual entre los efectos principales, con un 30,80 % de la variabilidad total: las infusiones elaboradas con materia prima secada durante 3 h alcanzaron un pH promedio de 5,836 unidades, frente a 5,390 unidades en las secadas durante 6 h, lo que representa una disminución de 0,446 unidades al prolongar el secado. La temperatura de secado aportó el 27,88 % de la variabilidad, con un pH promedio de 5,401 unidades a 40 °C y de 5,825 unidades a 60 °C. El tamaño de partícula, aunque significativo, presentó una contribución considerablemente menor, de 2,39 %, con valores promedio de 5,551 y 5,675 unidades para 850 y 2000 μm , respectivamente.

No obstante, la interpretación aislada de estos efectos principales no resulta apropiada, dado que la totalidad de las interacciones alcanzó significancia estadística. La interacción entre temperatura y tiempo constituyó la fuente de variación dominante del modelo, con un 35,58 % de la variabilidad, seguida por la interacción triple con un 2,02 %, en tanto que las interacciones entre temperatura y tamaño de partícula, y entre tiempo y tamaño de partícula, aportaron 0,67 % y 0,45 %, respectivamente.

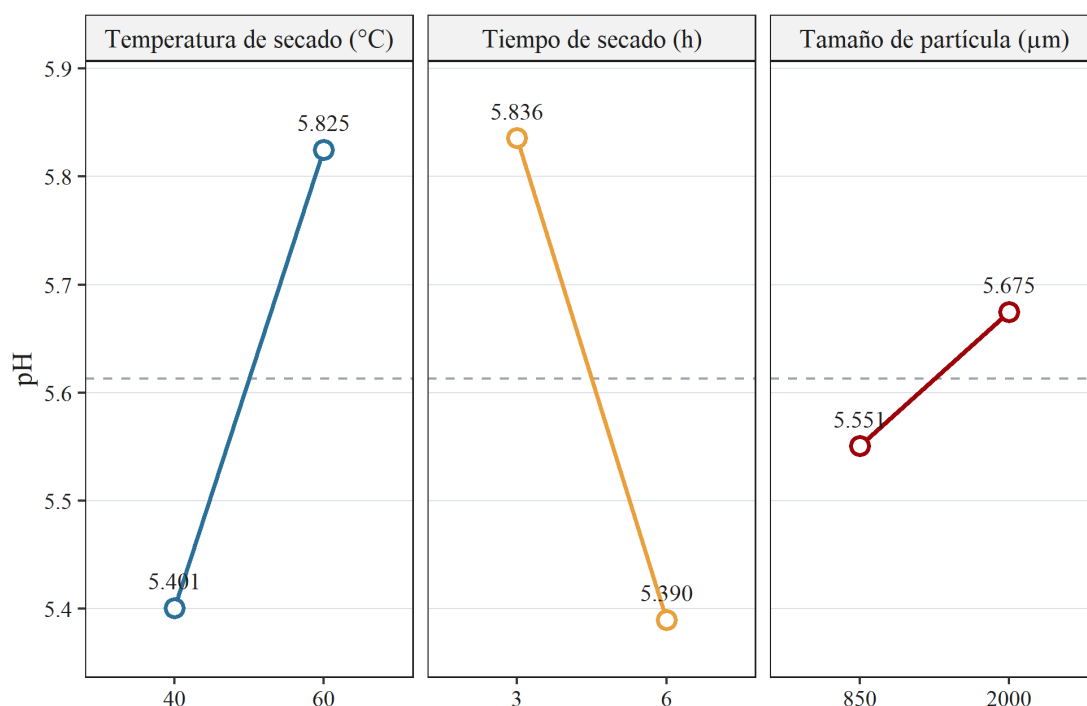
El análisis de efectos simples, cuyos resultados completos se presentan en el Anexo 4, permitió precisar el comportamiento condicional de cada factor. La temperatura no modificó significativamente el pH cuando el secado se realizó durante 3 h con partículas de 850 μm ($p = 0,7241$), pero produjo una diferencia de 1,083 unidades cuando el secado se prolongó a 6 h con partículas de 2000 μm . De forma análoga, el tiempo de secado careció de efecto significativo a 60 °C con partículas de 850 μm ($p = 0,1700$), mientras que a 40 °C provocó descensos de 0,757 y 1,093 unidades según la granulometría. El tamaño de partícula, por su parte, invirtió el sentido de su efecto: a 40 °C durante 6 h el

tamaño de 850 μm produjo un pH superior al de 2000 μm , mientras que en las tres condiciones restantes ocurrió lo contrario.

En síntesis, la prolongación del tiempo de secado produjo una acidificación pronunciada de la infusión únicamente cuando el secado se realizó a la temperatura más baja, en tanto que a 60 °C el pH se mantuvo estable con independencia del tiempo aplicado.

Figura 4

Efecto de los factores sobre el pH de la infusión filtrante de ratania



Nota. Cada panel representa la media del pH en los dos niveles del factor correspondiente. Las barras verticales indican el error estándar de la media ($n = 12$). La línea discontinua horizontal señala la media general del experimento. La pendiente de cada segmento expresa la magnitud del efecto principal. Elaboración propia.

4.3.1.3. Comparación de tratamientos

Dada la significancia de la interacción triple, se realizó la comparación múltiple de las ocho combinaciones experimentales mediante la prueba de Tukey, cuyos resultados se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 21

Comparación múltiple de las combinaciones experimentales para el pH mediante la prueba de Tukey

Tratamiento	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Tamaño de partícula (µm)	pH estimado	DE	Grupo
T4	40	6	2000	4,883	0,015	a
T3	40	6	850	4,993	0,023	b
T7	60	6	850	5,717	0,021	c
T5	60	3	850	5,743	0,021	c
T1	40	3	850	5,750	0,020	c
T6	60	3	2000	5,873	0,042	d
T8	60	6	2000	5,967	0,015	e
T2	40	3	2000	5,977	0,012	e

Nota. Las medias que comparten la misma letra no presentan diferencias estadísticamente significativas según la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$). Error estándar de cada media estimada = 0,013; gl = 16. DE: desviación estándar de las tres repeticiones.

La prueba de Tukey permitió identificar cinco grupos estadísticamente diferenciados. El tratamiento T4, correspondiente a 40 °C, 6 h y 2000 µm, conformó en solitario el grupo a con el menor pH del diseño experimental (4,883 unidades), seguido por T3, correspondiente a 40 °C, 6 h y 850 µm, que integró el grupo b con 4,993 unidades. El grupo c reunió los tratamientos T7, T5 y T1, con valores comprendidos entre 5,717 y 5,750 unidades, coincidentes los tres en el tamaño de partícula de 850 µm. El tratamiento T6 ocupó en solitario el grupo d con 5,873 unidades, mientras que el grupo e estuvo constituido por T8 y T2, con 5,967 y 5,977 unidades, correspondientes a los valores más elevados del diseño.

El ordenamiento obtenido evidencia con claridad la interacción entre los factores. Los tratamientos secados a 40 °C durante 6 h ocuparon las dos posiciones más bajas con independencia de la granulometría, mientras que la misma combinación de tiempo y tamaño de partícula aplicada a 60 °C (T8) se ubicó en el extremo opuesto del ordenamiento. La diferencia entre T4 y T8, de 1,083 unidades, constituyó la mayor registrada entre dos tratamientos del diseño y resultó altamente significativa ($p < 0,0001$).

En contraste, la comparación entre T2 y T6, que difieren únicamente en la temperatura manteniendo 3 h de secado y 2000 μm , arrojó una diferencia de apenas 0,103 unidades y en sentido inverso.

Desde la perspectiva del proceso, la combinación de 40 °C con 6 h de secado favoreció la acidificación de la infusión, mientras que el secado a 60 °C mantuvo el pH estable con independencia del tiempo aplicado. En consecuencia, la selección de la condición experimental óptima en función de este parámetro debe realizarse considerando simultáneamente los tres factores y no sus efectos aislados.

4.3.1.4. Discusión

Los valores de pH obtenidos, comprendidos entre 4,88 y 5,98 unidades, indican un carácter ligeramente ácido, comportamiento consistente con el de infusiones filtrantes elaboradas a partir de material vegetal rico en compuestos fenólicos y taninos. Estos valores resultan comparables con los reportados para infusiones filtrantes de otras especies vegetales evaluadas bajo metodologías similares: Vargas (2012) determinó un pH de 6,51 en un té aromático a base de cedrón (*Aloysia citrodora*) y toronjil (*Melissa officinalis*) procesado mediante deshidratación, mientras que Sosa-León y Martínez-Zurita (2023) reportaron un pH de 7,8 en una bebida funcional filtrante a base de culén y menta. En contraste, las infusiones elaboradas a partir de materia prima ácida presentan valores marcadamente inferiores, como el pH de 3,47 obtenido por Vela (2012) en un filtrante de cáscara de camu camu (*Myrciaria dubia*), fruto caracterizado por su elevado contenido de ácido ascórbico.

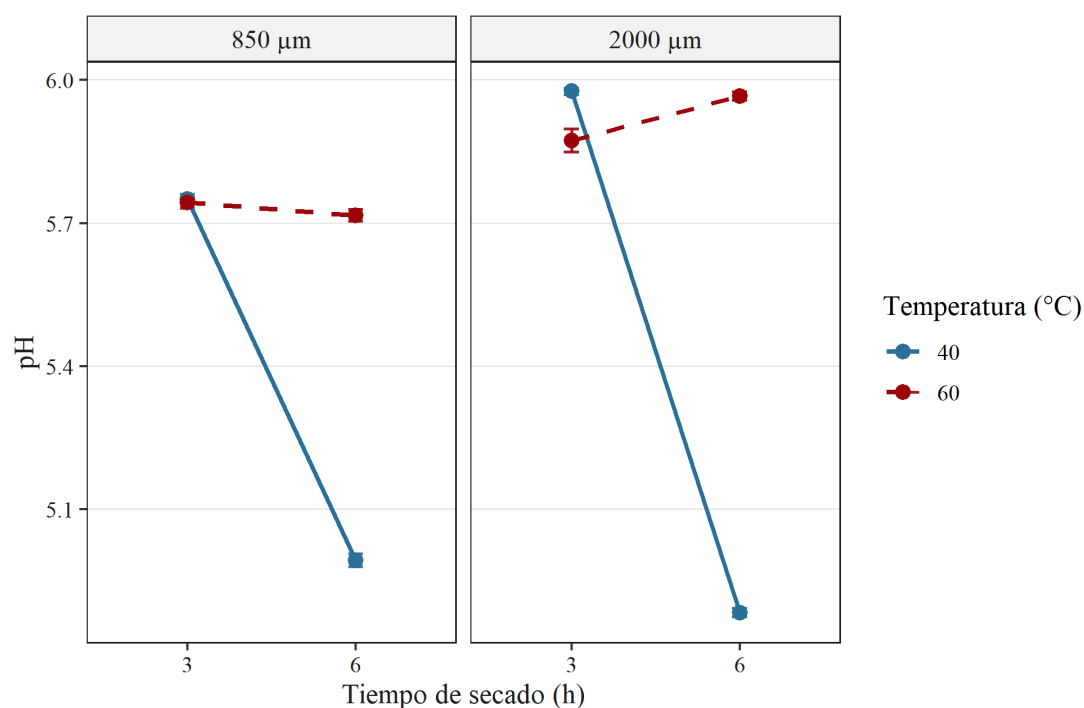
El pH intermedio obtenido para la ratania se ubica, por tanto, entre las infusiones de hierbas aromáticas de reacción cercana a la neutralidad y las infusiones de frutos ácidos, lo que resulta coherente con una matriz radicular cuya acidez proviene principalmente de ácidos fenólicos y de los grupos hidroxilo de los taninos y proantocianidinas, y no de ácidos orgánicos libres.

En cuanto al efecto de las variables de proceso, los valores de pH más bajos se registraron en los tratamientos secados a 40 °C durante 6 h, comportamiento que sugiere que el secado prolongado a baja temperatura favorece la conservación de los compuestos ácidos termolábiles, posteriormente extraídos durante la infusión. Dicha observación resulta

coherente con lo reportado por ElGamal et al. (2023), quienes señalan que las temperaturas de secado más elevadas inducen la degradación de ácidos orgánicos y compuestos fenólicos sensibles al calor, así como modificaciones estructurales del tejido que reducen su extractabilidad posterior. En contraste, los tratamientos secados a 60 °C mantuvieron valores de pH más elevados, comprendidos entre 5,72 y 5,97 unidades, lo que indica una menor disponibilidad de compuestos ácidos tras el tratamiento térmico más intenso.

Figura 5

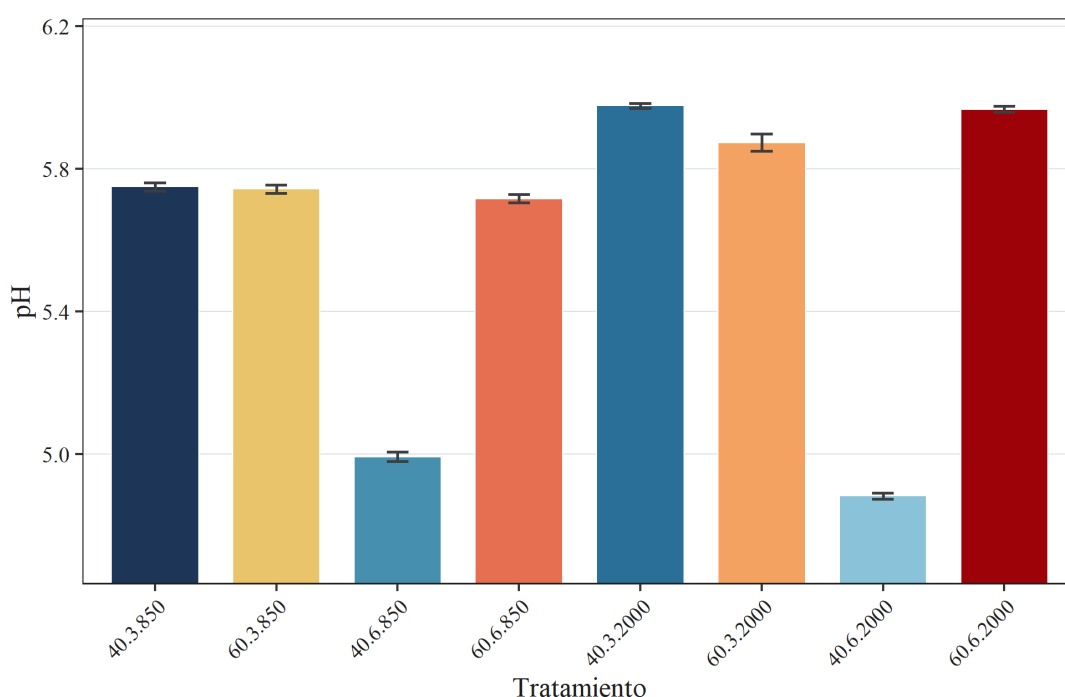
Interacción triple de los factores sobre el pH de la infusión filtrante de ratania



Nota. Los paneles corresponden a los tamaños de partícula de 850 y 2000 μm. La línea continua representa 40 °C y la línea discontinua 60 °C. Las barras verticales indican el error estándar de la media (n = 3).

Figura 6

pH de la infusión filtrante de ratania según combinación experimental



Nota. Las barras representan la media de tres repeticiones y las barras verticales el error estándar. Las etiquetas del eje horizontal indican temperatura, tiempo y tamaño de partícula de cada combinación. El eje vertical se presenta truncado para facilitar la visualización de las diferencias.

La magnitud y el sentido de los efectos principales de los tres factores se representan de manera conjunta en la figura siguiente.

4.3.2. Sólidos solubles totales (°Brix)

Los sólidos solubles totales constituyen un indicador del contenido de compuestos hidrosolubles extraídos durante la preparación de la infusión, entre los que se incluyen azúcares, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos y minerales. Su determinación permite estimar el rendimiento de extracción alcanzado por cada combinación de condiciones de secado y granulometría.

El contenido de sólidos solubles totales de las infusiones filtrantes osciló entre 1,177 y 2,207 °Brix. El tratamiento T5, correspondiente a 60 °C, 3 h y 850 µm, presentó el valor

más elevado, mientras que el tratamiento T8, correspondiente a 60 °C, 6 h y 2000 µm, registró el valor más bajo. Los coeficientes de variación fueron inferiores al 6 % en seis de los ocho tratamientos; los tratamientos T6 y T8 presentaron valores superiores, de 11,44 % y 14,08 % respectivamente, atribuibles a la menor concentración de sólidos solubles en estas muestras, condición en la cual pequeñas diferencias absolutas de lectura representan una proporción mayor respecto de la media.

4.3.2.1. Análisis de varianza

Los resultados del análisis de varianza se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 22

Análisis de varianza de los sólidos solubles totales de las infusiones filtrantes

Fuente	SC	gl	CM	F	p	Contribución (%)	Sig.
Modelo	2,4085	7	0,3441	31,518	3,324E-08	93,24	***
A: Temperatura (°C)	0,4267	1	0,4267	39,084	1,156E-05	16,52	***
B: Tiempo (h)	0,4988	1	0,4988	45,693	4,584E-06	19,31	***
C: Tamaño de partícula (µm)	0,9362	1	0,9362	85,754	7,914E-08	36,24	***
AB	0,0704	1	0,0704	6,450	0,0219	2,73	*
AC	0,3408	1	0,3408	31,220	4,085E-05	13,19	***
BC	0,0006	1	0,0006	0,055	0,8176	0,02	ns
ABC	0,1350	1	0,1350	12,366	0,0029	5,23	**
Residual	0,1747	16	0,0109			6,76	
Total	2,5831	23				100	

Nota. SC: suma de cuadrados; gl: grados de libertad; CM: cuadrado medio. A: temperatura de secado; B: tiempo de secado; C: tamaño de partícula; AB, AC, BC: interacciones dobles; ABC: interacción triple. $R^2 = 0,9324$; R^2 ajustado = 0,9028; coeficiente de variación experimental = 6,42 %. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns: no significativo.

El modelo resultó altamente significativo ($F = 31,518$; $p < 0,001$) y explicó el 93,24 % de la variabilidad total observada, con un coeficiente de variación experimental de 6,42 %.

Los tres efectos principales resultaron estadísticamente significativos, al igual que la interacción entre temperatura y tamaño de partícula, la interacción entre temperatura y tiempo, y la interacción triple. La única fuente de variación no significativa del modelo fue la interacción entre tiempo y tamaño de partícula ($F = 0,055$; $p = 0,8176$), cuya contribución a la variabilidad total fue de apenas 0,02 %.

Los supuestos del modelo se verificaron satisfactoriamente. La prueba de Shapiro-Wilk no rechazó la hipótesis de normalidad de los residuales ($W = 0,9454$; $p = 0,2148$) y la prueba de Levene confirmó la homogeneidad de varianzas entre las ocho combinaciones experimentales ($F = 1,228$; $p = 0,3438$). El análisis gráfico complementario, presentado en los Anexos 5 y 6, no evidenció desviaciones sistemáticas en el gráfico cuantil-cuantil ni patrones en la dispersión de los residuales frente a los valores ajustados. Los resultados del análisis de varianza se consideran, por tanto, estadísticamente válidos.

4.3.2.2. Efecto de los factores

El tamaño de partícula fue el factor que presentó el mayor efecto individual sobre el contenido de sólidos solubles totales, con una contribución del 36,24 % a la variabilidad total, la más elevada entre todos los efectos evaluados. Las infusiones elaboradas con un tamaño de partícula de 850 μm presentaron en promedio 1,826 °Brix, frente a 1,431 °Brix en las elaboradas con 2000 μm , lo que representa una diferencia de 0,395 °Brix a favor de la granulometría más fina. El tiempo de secado aportó el 19,31 % de la variabilidad, con valores promedio de 1,773 °Brix para 3 h y 1,484 °Brix para 6 h, es decir, una reducción de 0,289 °Brix al prolongar el secado. La temperatura de secado contribuyó con el 16,52 %, registrando 1,495 °Brix a 40 °C y 1,762 °Brix a 60 °C.

La interpretación aislada de estos efectos principales requiere cautela, dado que dos de las tres interacciones dobles y la interacción triple resultaron significativas. La interacción entre temperatura y tamaño de partícula constituyó la de mayor contribución, con un 13,19 % de la variabilidad, seguida por la interacción triple con un 5,23 % y por la interacción entre temperatura y tiempo con un 2,73 %. La interacción entre tiempo y tamaño de partícula no alcanzó significancia, lo que indica que, promediando sobre los niveles de temperatura, el efecto del tiempo de secado no dependió de la granulometría empleada. Cabe precisar que este resultado no contradice la significancia de la interacción

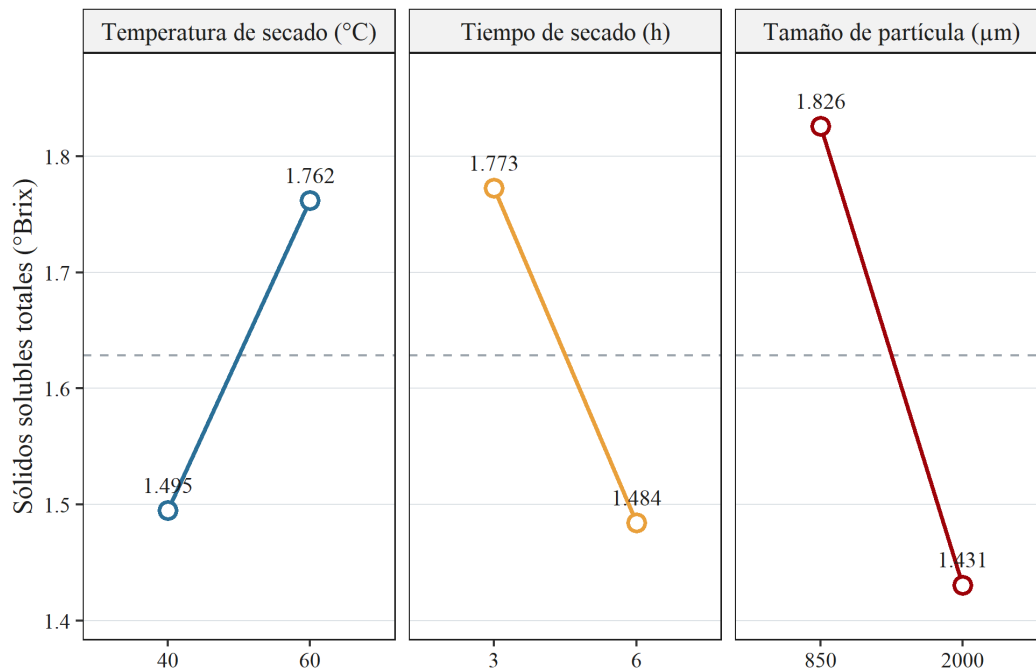
triple, dado que esta última evidencia que la relación entre tiempo y granulometría sí se modifica al considerar de manera separada cada nivel de temperatura.

El análisis de efectos simples, cuyos resultados completos se presentan en el Anexo 7, permitió precisar el comportamiento condicional de cada factor. El incremento de la temperatura de 40 a 60 °C aumentó el contenido de sólidos solubles en tres de las cuatro combinaciones de tiempo y granulometría, con diferencias comprendidas entre 0,287 y 0,547 °Brix; sin embargo, en la combinación de 6 h con partículas de 2000 µm el efecto se invirtió, resultando el contenido significativamente mayor a 40 °C que a 60 °C, con una diferencia de 0,230 °Brix. Esta inversión del sentido del efecto constituye la manifestación directa de la interacción triple. De manera análoga, el tiempo de secado redujo significativamente el contenido de sólidos solubles en tres de las cuatro combinaciones, mientras que a 40 °C con partículas de 2000 µm no produjo efecto apreciable. Finalmente, el tamaño de partícula de 850 µm produjo un contenido significativamente superior al de 2000 µm en tres de las cuatro combinaciones, con una diferencia máxima de 0,773 °Brix a 60 °C durante 6 h; en cambio, a 40 °C durante 6 h ambas granulometrías resultaron estadísticamente equivalentes.

La magnitud y el sentido de los efectos principales de los tres factores se representan de manera conjunta en la figura siguiente.

Figura 7

Efecto de los factores sobre los sólidos solubles totales de la infusión filtrante de ratania



Nota. Cada panel representa la media de sólidos solubles totales en los dos niveles del factor correspondiente. Las barras verticales indican el error estándar de la media ($n = 12$). La línea discontinua horizontal señala la media general del experimento. La pendiente de cada segmento expresa la magnitud del efecto principal. Elaboración propia.

4.3.2.3. Comparación de tratamientos

Dada la significancia de la interacción triple, se realizó la comparación múltiple de las ocho combinaciones experimentales mediante la prueba de Tukey, cuyos resultados se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 23

Comparación múltiple de las combinaciones experimentales para los sólidos solubles totales mediante la prueba de Tukey

Tratamiento	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Tamaño de partícula (µm)	°Brix estimado	DE	Grupo
T8	60	6	2000	1,177	0,166	a
T3	40	6	850	1,403	0,075	a
T4	40	6	2000	1,407	0,040	a
T2	40	3	2000	1,427	0,031	ab
T6	60	3	2000	1,713	0,196	bc
T1	40	3	850	1,743	0,042	c
T7	60	6	850	1,950	0,075	cd
T5	60	3	850	2,207	0,076	d

Nota. Las medias que comparten al menos una letra no presentan diferencias estadísticamente significativas según la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$). Error estándar de cada media estimada = 0,060; gl = 16. DE: desviación estándar de las tres repeticiones.

La prueba de Tukey permitió identificar cuatro grupos estadísticos. A diferencia de lo observado en el pH, varios tratamientos compartieron letras con más de un grupo, lo que indica que no pudieron diferenciarse de los tratamientos situados a ambos lados en el ordenamiento. El grupo a reunió los tratamientos T8, T3 y T4, con valores comprendidos entre 1,177 y 1,407 °Brix, coincidentes los tres en un tiempo de secado de 6 h. En el extremo superior, el grupo d estuvo constituido por T5 y T7, con 2,207 y 1,950 °Brix respectivamente, ambos elaborados con granulometría de 850 µm.

El tratamiento T5, correspondiente a 60 °C, 3 h y 850 µm, alcanzó el mayor contenido de sólidos solubles del diseño experimental, resultando estadísticamente superior a las combinaciones de los grupos a, b y c. Este resultado adquiere relevancia al constatar que la misma combinación de temperatura y tiempo no produjo el mismo efecto con granulometría de 2000 µm: en ese caso, el tratamiento T6 registró 1,713 °Brix, y la

diferencia de 0,493 °Brix entre ambas granulometrías resultó estadísticamente significativa ($p = 0,0006$).

La comparación entre T7 y T8 resulta igualmente ilustrativa. Ambos comparten temperatura y tiempo de secado, difiriendo únicamente en la granulometría, y presentaron una diferencia de 0,773 °Brix, la mayor atribuible al tamaño de partícula en todo el diseño ($p < 0,0001$). En contraste, la comparación entre T3 y T4, que difieren en la misma variable, pero bajo condiciones de 40 °C y 6 h, arrojó una diferencia de apenas 0,003 °Brix, sin significancia estadística ($p = 0,9693$).

En consecuencia, la granulometría fina de 850 μm favoreció la extracción de sólidos solubles en la mayoría de las condiciones evaluadas, si bien su efecto dependió críticamente de la temperatura y del tiempo de secado aplicados. La combinación de 60 °C con un tiempo corto de 3 h y granulometría de 850 μm resultó la más favorable para maximizar este parámetro.

4.3.2.4. Discusión

Los valores de sólidos solubles totales obtenidos, comprendidos entre 1,18 y 2,21 °Brix, se encuentran dentro de los rangos reportados para infusiones herbales sin azúcares añadidos. Estos valores resultan comparativamente bajos frente a los de infusiones que incorporan edulcorantes o materias primas azucaradas: Sosa-León y Martínez-Zurita (2023) reportaron 8,7 °Brix en una bebida filtrante de culén y menta edulcorada con esteviósido, mientras que Vargas (2012) obtuvo un valor considerablemente superior, de 37,11 °Brix, en un té aromático edulcorado con stevia. La diferencia se explica porque dichos productos incorporan hojas de stevia y otros componentes que aportan sólidos solubles adicionales, en tanto que la infusión de ratania se elabora a partir de una única materia prima radicular sin edulcorar, cuya extracción de sólidos solubles es intrínsecamente menor y proviene de la naturaleza leñosa del tejido.

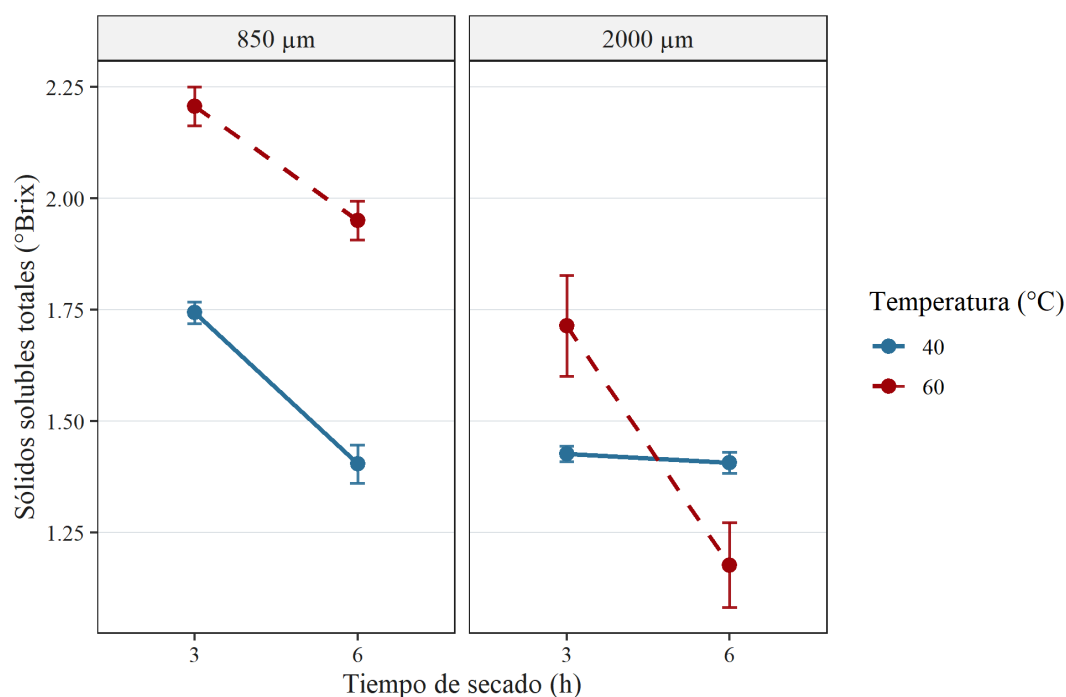
El efecto consistente del tamaño de partícula sobre este parámetro encuentra explicación en el mecanismo de extracción sólido-líquido. Al comparar los tratamientos que compartían idénticas condiciones de temperatura y tiempo de secado, las formulaciones elaboradas con menor tamaño de partícula presentaron sistemáticamente valores superiores, comportamiento atribuible al incremento de la superficie específica de

contacto entre el material vegetal y el solvente, lo que acelera la transferencia de masa y favorece la difusión de los compuestos solubles. Dicho efecto ha sido demostrado experimentalmente por Farakte et al. (2016), quienes reportaron que la reducción del tamaño de partícula incrementó las constantes de velocidad de extracción y los coeficientes de difusión de los sólidos solubles, y por Senawong et al. (2023), quienes verificaron que el rendimiento de extracción de compuestos vegetales aumenta a medida que disminuye el tamaño de partícula, como consecuencia del incremento del área de contacto con el solvente.

Respecto del tiempo de secado, la prolongación de 3 a 6 h tendió a reducir el contenido de sólidos solubles en la mayoría de las combinaciones evaluadas, lo que sugiere una pérdida o degradación de compuestos hidrosolubles durante el secado prolongado. Este comportamiento resulta coherente con lo señalado por ElGamal et al. (2023) respecto de la degradación térmica de los compuestos bioactivos, cuya magnitud depende tanto de la intensidad como de la duración de la exposición al calor.

Figura 8

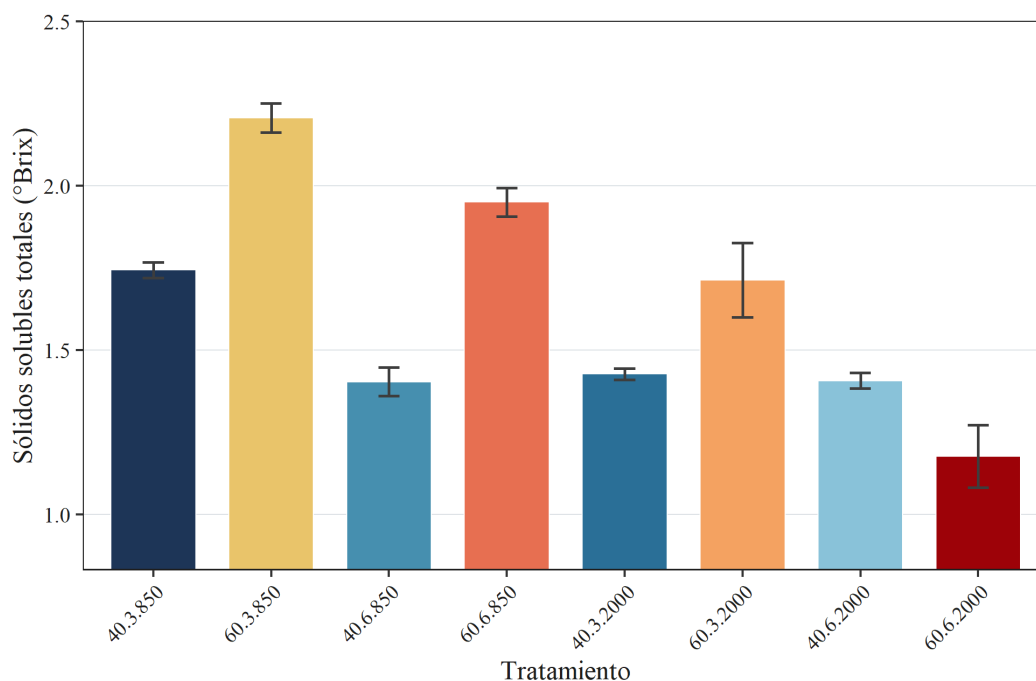
Interacción triple de los factores sobre los sólidos solubles totales de la infusión filtrante de ratania



Nota. Los paneles corresponden a los tamaños de partícula de 850 y 2000 μm . La línea continua representa 40 °C y la línea discontinua 60 °C. Las barras verticales indican el error estándar de la media ($n = 3$).

Figura 9

Sólidos solubles totales de la infusión filtrante de ratania según combinación experimental



Nota. Las barras representan la media de tres repeticiones y las barras verticales el error estándar. Las etiquetas del eje horizontal indican temperatura, tiempo y tamaño de partícula de cada combinación. El eje vertical se presenta truncado para facilitar la visualización de las diferencias entre tratamientos.

4.3.3. Acidez titulable

La acidez titulable constituye un indicador del contenido de compuestos de carácter ácido presentes en la infusión y complementa la información aportada por el pH, dado que mientras este último refleja la concentración de iones hidrógeno libres, la acidez titulable cuantifica la totalidad de los protones disponibles para ser neutralizados. Los resultados se expresaron como porcentaje peso a volumen de ácido gálico, compuesto fenólico de referencia en la matriz evaluada.

La acidez titulable de las infusiones filtrantes osciló entre 0,01275 y 0,02221 % p/v, equivalentes a 12,75 y 22,21 mg de ácido gálico por 100 mL de infusión, correspondientes a gastos de hidróxido de sodio comprendidos entre 7,500 y 13,067 μL . El tratamiento T7, correspondiente a 60 °C, 6 h y 850 μm , presentó el valor más elevado, mientras que el tratamiento T2, correspondiente a 40 °C, 3 h y 2000 μm , registró el más bajo. Los coeficientes de variación se mantuvieron por debajo del 1,5 % en las ocho combinaciones, lo que evidencia una elevada repetibilidad de la determinación.

4.3.3.1. Análisis de varianza

Los resultados del análisis de varianza se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 24

Análisis de varianza de la acidez titulable de las infusiones filtrantes

Fuente	SC	gl	CM	F	p	Contribución (%)	Sig.
Modelo	202,068	7	28,867	726,437	8,262E-19	99,69	***
A: Temperatura (°C)	133,529	1	133,529	3360,273	5,006E-20	65,87	***
B: Tiempo (h)	1,157	1	1,157	29,121	5,938E-05	0,57	***
C: Tamaño de partícula (μm)	18,815	1	18,815	473,485	2,597E-13	9,28	***
AB	1,013	1	1,013	25,485	1,187E-04	0,50	***
AC	4,779	1	4,779	120,273	7,495E-09	2,36	***
BC	4,192	1	4,192	105,485	1,892E-08	2,07	***
ABC	38,583	1	38,583	970,939	9,438E-16	19,03	***
Residual	0,636	16	0,040			0,31	
Total	202,703	23				100	

Nota. SC: suma de cuadrados; gl: grados de libertad; CM: cuadrado medio. Los valores de SC y CM se expresan en unidades de 10^{-6} (% p/v)². A: temperatura de secado; B:

tiempo de secado; C: tamaño de partícula; AB, AC, BC: interacciones dobles; ABC: interacción triple. $R^2 = 0,9969$; R^2 ajustado = 0,9955; coeficiente de variación experimental = 1,16 %. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns: no significativo.

El modelo resultó altamente significativo ($F = 726,437$; $p < 0,001$) y explicó el 99,69 % de la variabilidad total observada, con un coeficiente de variación experimental de 1,16 %, lo que evidencia una elevada precisión experimental. La totalidad de los efectos evaluados resultó estadísticamente significativa. El análisis de la contribución porcentual resulta especialmente informativo: la temperatura de secado explicó por sí sola el 65,87 % de la variabilidad total, seguida por la interacción triple con un 19,03 % y por el tamaño de partícula con un 9,28 %, mientras que el tiempo de secado, pese a resultar significativo, aportó únicamente el 0,57 %.

En cuanto a los supuestos del modelo, la prueba de Levene confirmó plenamente la homogeneidad de varianzas entre las ocho combinaciones experimentales ($F = 0,114$; $p = 0,9963$). La prueba de Shapiro-Wilk, en cambio, rechazó la hipótesis de normalidad de los residuales ($W = 0,9056$; $p = 0,0283$). El examen detallado permitió identificar el origen de esta desviación: la asimetría fue de $-0,277$, valor próximo a cero, y el gráfico cuantil-cuantil presentado en el Anexo 8 no evidenció valores atípicos ni desviaciones sistemáticas en las colas, lo que descarta tanto el sesgo como la presencia de observaciones extremas. La curtosis de exceso fue de $-1,391$, correspondiente a una distribución aplanada respecto de la normal, configuración característica de una variable registrada con resolución limitada. Los volúmenes de titulante se registraron con aproximación de $0,1 \mu\text{L}$, de modo que los 24 residuales del modelo asumen únicamente ocho valores distintos, todos múltiplos de $0,0333 \mu\text{L}$. Esta discretización de la escala de medición, y no una violación estructural del supuesto, es la responsable del aplanamiento detectado. El gráfico de residuales frente a valores ajustados, presentado en el Anexo 9, confirmó una dispersión constante en todo el rango.

Con el objeto de verificar que las conclusiones no dependieran del supuesto de normalidad, se aplicaron dos procedimientos alternativos. La prueba de Kruskal-Wallis arrojó un valor de chi cuadrado de 22,690 con 7 grados de libertad y $p = 0,0019$, confirmando la existencia de diferencias significativas entre tratamientos. Asimismo, se realizó un análisis de varianza por permutaciones con 10 000 remuestreos, cuyos

resultados completos se presentan en el Anexo 10; en los siete efectos evaluados no se registró ninguna permutación con un valor de F igual o superior al observado, de modo que todos mantuvieron $p < 0,001$. Ambos procedimientos condujeron exactamente a las mismas conclusiones que el análisis paramétrico, por lo que los resultados del análisis de varianza se consideran estadísticamente válidos.

4.3.3.2. Efecto de los factores

La temperatura de secado fue, con amplia diferencia, el factor de mayor incidencia sobre la acidez titulable, aportando el 65,87 % de la variabilidad total, la mayor contribución individual de todo el modelo. Las infusiones obtenidas a partir de materia prima secada a 40 °C presentaron una acidez promedio de 0,01489 % p/v, frente a 0,01961 % p/v en las secadas a 60 °C, lo que representa un incremento de 0,00472 % p/v. El tamaño de partícula contribuyó con el 9,28 % de la variabilidad, registrando 0,01813 % p/v con granulometría de 850 μm y 0,01636 % p/v con 2000 μm . El tiempo de secado, en cambio, presentó la menor contribución de todos los efectos principales, con apenas 0,57 %: las medias fueron de 0,01703 % p/v para 3 h y 0,01747 % p/v para 6 h, con una diferencia de solo 0,00044 % p/v.

Esta aparente contradicción, consistente en un efecto estadísticamente significativo, pero de contribución mínima, encuentra explicación en las interacciones. La interacción triple constituyó la segunda fuente de variación del modelo, con un 19,03 % de la variabilidad, magnitud muy superior a la de cualquiera de las interacciones dobles e incluso a la del tiempo y el tamaño de partícula considerados individualmente. Las interacciones entre temperatura y tamaño de partícula, y entre tiempo y tamaño de partícula, aportaron 2,36 % y 2,07 % respectivamente, mientras que la interacción entre temperatura y tiempo contribuyó con 0,50 %.

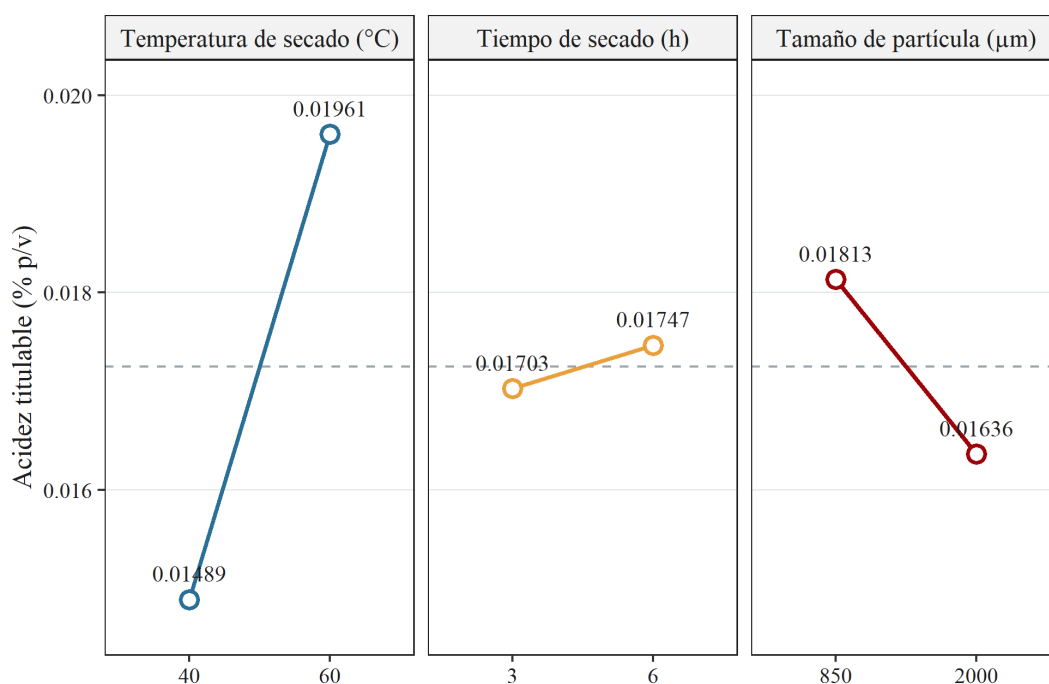
El análisis de efectos simples, cuyos resultados completos se presentan en el Anexo 11, permitió precisar el comportamiento condicional de cada factor. El incremento de la temperatura de 40 a 60 °C aumentó significativamente la acidez en las cuatro combinaciones evaluadas, si bien la magnitud del incremento varió entre 0,00170 y 0,00856 % p/v, esto es, en un factor superior a cinco veces según la combinación. El tiempo de secado presentó el comportamiento más irregular: incrementó la acidez a 40

°C con partículas de 850 μm y a 60 °C con partículas de 2000 μm , pero la disminuyó en las dos combinaciones restantes. Esta inversión del sentido del efecto en la mitad de las condiciones explica por qué su efecto principal, aun siendo significativo, resultó de magnitud tan reducida, dado que al promediar sobre todas las condiciones los efectos de sentido contrario se cancelan parcialmente. Finalmente, el tamaño de partícula de 850 μm produjo mayor acidez que el de 2000 μm en tres de las cuatro combinaciones, con diferencias comprendidas entre 0,00096 y 0,00436 % p/v; la excepción se presentó a 40 °C durante 6 h, condición en la cual el tamaño de 2000 μm produjo una acidez significativamente superior.

La magnitud y el sentido de los efectos principales de los tres factores se representan de manera conjunta en la figura siguiente.

Figura 10

Efecto de los factores sobre la acidez titulable de la infusión filtrante de ratania



Nota. Cada panel representa la media de acidez titulable en los dos niveles del factor correspondiente. Las barras verticales indican el error estándar de la media ($n = 12$). La línea discontinua horizontal señala la media general del experimento. La pendiente de cada segmento expresa la magnitud del efecto principal. Elaboración propia.

4.3.3.3. Comparación de tratamientos

Dada la significancia de la interacción triple, se realizó la comparación múltiple de las ocho combinaciones experimentales mediante la prueba de Tukey, cuyos resultados se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 25

Comparación múltiple de las combinaciones experimentales para la acidez titulable mediante la prueba de Tukey

Tratamiento	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Tamaño de partícula (µm)	Acidez estimada (% p/v)	DE	Grupo
T2	40	3	2000	0,01275	0,00017	a
T3	40	6	850	0,01366	0,00020	b
T4	40	6	2000	0,01615	0,00017	c
T1	40	3	850	0,01700	0,00017	d
T8	60	6	2000	0,01785	0,00017	e
T6	60	3	2000	0,01870	0,00017	f
T5	60	3	850	0,01966	0,00026	g
T7	60	6	850	0,02221	0,00026	h

Nota. Las medias que comparten la misma letra no presentan diferencias estadísticamente significativas según la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$). Error estándar de cada media estimada = 0,000115; gl = 16. DE: desviación estándar de las tres repeticiones.

El resultado más notable de esta comparación es que las ocho combinaciones se ubicaron en ocho grupos estadísticos distintos, identificados de la a a la h, lo que significa que cada tratamiento presentó una acidez titulable estadísticamente diferente de la de todos los demás. Ninguna de las 28 comparaciones por pares resultó no significativa, comportamiento que no se observó en ninguno de los restantes parámetros evaluados.

El ordenamiento revela además un patrón inequívoco: los cuatro tratamientos secados a 40 °C ocuparon las cuatro primeras posiciones, con valores comprendidos entre 0,01275 y 0,01700 % p/v, mientras que los cuatro secados a 60 °C ocuparon las cuatro posiciones

superiores, con valores entre 0,01785 y 0,02221 % p/v. Esta separación completa entre ambos bloques de temperatura, sin ningún solapamiento, constituye la evidencia más directa del efecto dominante de la temperatura de secado, coherente con su contribución del 65,87 % a la variabilidad total.

El tratamiento T7, correspondiente a 60 °C, 6 h y 850 µm, alcanzó la mayor acidez del diseño, con 0,02221 % p/v, equivalente a 22,21 mg de ácido gálico por 100 mL. En el extremo opuesto, T2 registró 0,01275 % p/v, de modo que la diferencia entre ambos extremos fue de 0,00946 % p/v, lo que representa un incremento del 74 % respecto del valor mínimo. Resulta particularmente ilustrativo que la misma combinación de tiempo y granulometría de T7 produjera, al aplicarse a 40 °C (tratamiento T3), uno de los valores más bajos del ordenamiento, con 0,01366 % p/v. La diferencia entre ambos, de 0,00856 % p/v, constituyó la mayor registrada entre dos tratamientos y resultó altamente significativa ($p < 0,0001$). En contraste, la comparación entre T4 y T8, que difieren en la misma variable, pero con granulometría de 2000 µm, arrojó una diferencia de 0,00170 % p/v, cinco veces menor, aunque igualmente significativa.

En consecuencia, el incremento de la temperatura de secado tuvo sobre la acidez un impacto cinco veces mayor cuando se combinó con molienda fina que con molienda gruesa, lo que confirma que el efecto de este factor no es uniforme sino dependiente de las restantes condiciones de proceso.

4.3.3.4. Discusión

Los valores de acidez titulable obtenidos, comprendidos entre 0,0128 y 0,0222 % p/v, resultan congruentes con el carácter ligeramente ácido reflejado por las mediciones de pH. Esta correspondencia, en la que una acidez titulable baja se asocia a valores de pH moderadamente ácidos, confirma la coherencia interna de la caracterización fisicoquímica. Los valores obtenidos son considerablemente inferiores a los reportados para infusiones filtrantes de mezclas edulcoradas, como el 6,9 % determinado por Sosa-León y Martínez-Zurita (2023) en una bebida de culén y menta. Esta diferencia resulta congruente con la condición de bebida de raíz de la infusión de ratania, en la que predominan los taninos condensados por sobre los ácidos orgánicos libres, a diferencia

de las infusiones elaboradas a partir de cáscaras de frutos o de mezclas que incorporan componentes adicionales.

La acidez observada obedece a la composición química de la raíz de la especie, la cual concentra metabolitos de carácter ácido como taninos y ácidos fenólicos que se transfieren al medio acuoso durante la infusión. En este sentido, Safta et al. (2023) determinaron mediante cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas la presencia de ácido clorogénico, ácido cafeico y ácido gálico en el extracto de raíz de *Krameria lappacea*, compuestos que contribuyen directamente a la acidez titulable de la bebida.

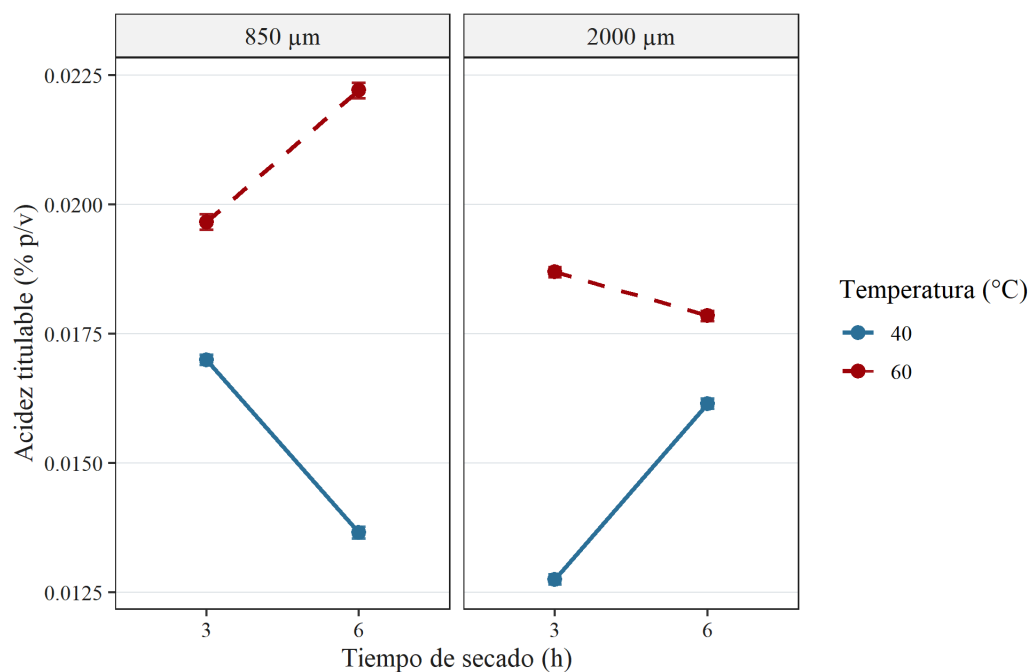
El efecto de la granulometría responde al mismo mecanismo de extracción sólido-líquido descrito para los sólidos solubles totales, en el cual la reducción del tamaño de partícula incrementa el área superficial de contacto entre la matriz sólida y el solvente (Farakte et al., 2016; Senawong et al., 2023).

El hallazgo de mayor relevancia corresponde al efecto de la temperatura de secado, dado que las muestras tratadas a 60 °C alcanzaron niveles de acidez sistemáticamente superiores a las secadas a 40 °C. Este comportamiento indica que la mayor carga térmica incrementa la disponibilidad de compuestos ácidos para su posterior lixiviación. La explicación mecanística la aportan Babaei Rad et al. (2025), quienes señalan que los compuestos fenólicos se encuentran habitualmente ligados en el interior de las células vegetales y que, cuando están unidos y esterificados, el calentamiento rompe dichos enlaces y los convierte en formas más simples y extraíbles, fenómeno reforzado por el colapso de los espacios intercelulares inducido por el calor. En la misma línea, Lim y Eom (2022) determinaron que el secado térmico de tejidos ricos en taninos incrementa el contenido de taninos hidrolizables extraíbles, compuestos de carácter marcadamente ácido.

Este resultado guarda plena coherencia con lo observado en la caracterización funcional de la infusión, en la cual los tratamientos secados a 60 °C presentaron igualmente una mayor capacidad antioxidante, y confirma que el secado a la temperatura más elevada favorece la liberación de compuestos fenólicos desde la matriz radicular.

Figura 11

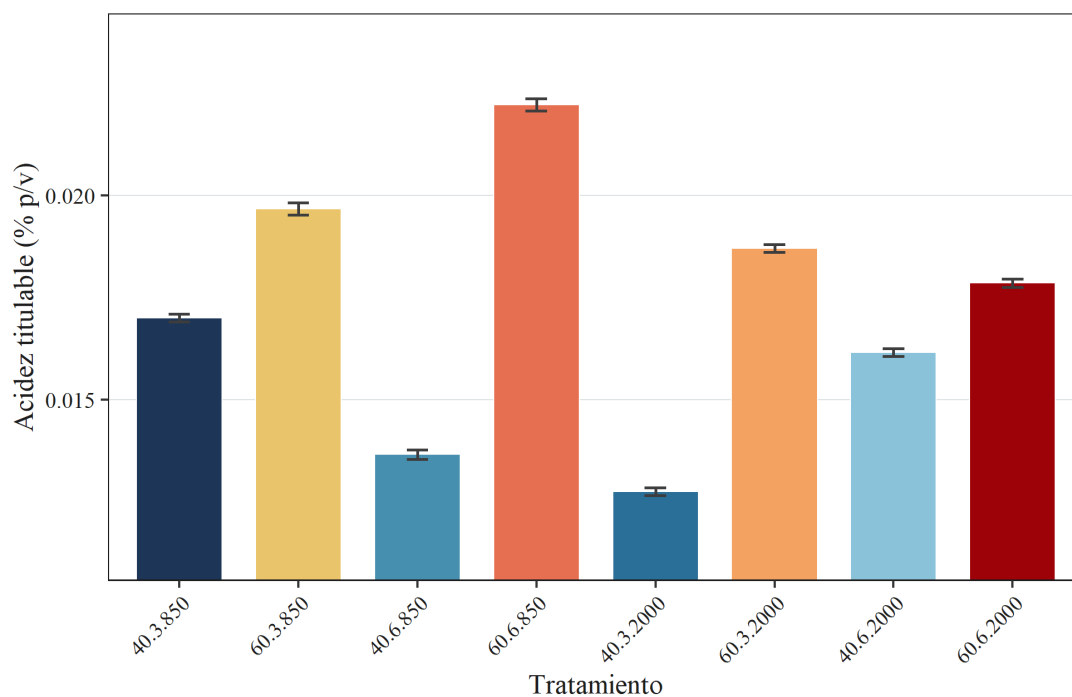
Interacción triple de los factores sobre la acidez titulable de la infusión filtrante de ratania



Nota. Los paneles corresponden a los tamaños de partícula de 850 y 2000 μm. La línea continua representa 40 °C y la línea discontinua 60 °C. Las barras verticales indican el error estándar de la media (n = 3). El cruce de las pendientes entre ambos paneles evidencia la interacción triple entre los factores.

Figura 12

Acidez titulable de la infusión filtrante de ratania según combinación experimental



Nota. Las barras representan la media de tres repeticiones y las barras verticales el error estándar. Las etiquetas del eje horizontal indican temperatura, tiempo y tamaño de partícula de cada combinación. El eje vertical se presenta truncado para facilitar la visualización de las diferencias entre tratamientos.

4.4. Caracterización funcional de las infusiones filtrantes

4.4.1. Capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante constituye la principal propiedad funcional evaluada en el presente estudio, por cuanto refleja la capacidad de los compuestos bioactivos de la ratania, principalmente de naturaleza fenólica, para neutralizar radicales libres, y determina el valor de la bebida como alimento funcional. Su determinación permite establecer en qué medida las condiciones de secado y la granulometría preservan o modifican el potencial funcional del producto terminado.

Tabla 26

Capacidad antioxidante de las infusiones filtrantes de Krameria lappacea

Tratamiento	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Tamaño de partícula (µm)	Capacidad antioxidante (µmol ET/L)	CV (%)
T1	40	3	850	10 592,66 ± 269,88	2,55
T2	40	3	2000	10 332,96 ± 495,47	4,80
T3	40	6	850	13 310,80 ± 482,60	3,63
T4	40	6	2000	10 332,96 ± 51,94	0,50
T5	60	3	850	14 938,23 ± 196,64	1,32
T6	60	3	2000	11 008,17 ± 476,03	4,32
T7	60	6	850	14 955,54 ± 905,59	6,06
T8	60	6	2000	19 422,30 ± 1269,06	6,53

Nota. Valores expresados como media ± desviación estándar de tres repeticiones (n = 3).

CV: coeficiente de variación. La determinación se realizó mediante el método del radical DPPH, con resultados expresados como micromoles de equivalentes de Trolox por litro de infusión (µmol ET/L). Elaboración propia.

La capacidad antioxidante de las infusiones filtrantes osciló entre 10 332,96 y 19 422,30 µmol ET/L. El tratamiento T8, correspondiente a 60 °C, 6 h y 2000 µm, presentó el valor más elevado, mientras que los tratamientos T2 y T4, ambos secados a 40 °C con granulometría de 2000 µm, registraron los valores más bajos. Esta amplitud, que supone una variación cercana al 88 % entre el valor mínimo y el máximo, evidencia que las

condiciones de proceso ejercen una influencia determinante sobre la funcionalidad de la infusión y confirma la pertinencia de evaluar el secado y la granulometría como variables independientes. Los coeficientes de variación oscilaron entre 0,50 y 6,53 %, manteniéndose dentro de los rangos aceptables para determinaciones espectrofotométricas de capacidad antioxidante.

4.4.1.1. Análisis de varianza

Los resultados del análisis de varianza, realizado conforme al procedimiento descrito para los parámetros fisicoquímicos, se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 27

Análisis de varianza de la capacidad antioxidante de las infusiones filtrantes

Fuente	SC	gl	CM	F	p	Contribución (%)	Sig.
Modelo	218 437 191	7	31 205 313	76,818	4,044E-11	97,11	***
A:							
Temperatura (°C)	93 080 709	1	93 080 709	229,137	6,665E-11	41,38	***
B: Tiempo (h)	46 617 463	1	46 617 463	114,758	1,046E-08	20,72	***
C: Tamaño de partícula (µm)	2 735 433	1	2 735 433	6,734	0,0195	1,22	*
AB	12 240 658	1	12 240 658	30,133	4,948E-05	5,44	***
AC	5 341 828	1	5 341 828	13,150	0,0023	2,37	**
BC	12 092 736	1	12 092 736	29,769	5,281E-05	5,38	***
ABC	46 328 363	1	46 328 363	114,046	1,093E-08	20,60	***
Residual	6 499 576	16	406 224			2,89	
Total	224 936 767	23				100	

Nota. SC: suma de cuadrados; gl: grados de libertad; CM: cuadrado medio. Los valores de SC y CM se expresan en unidades de (µmol ET/L)². A: temperatura de secado; B: tiempo de secado; C: tamaño de partícula; AB, AC, BC: interacciones dobles; ABC:

interacción triple. $R^2 = 0,9711$; R^2 ajustado = 0,9585; coeficiente de variación experimental = 4,86 %. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns: no significativo.

El modelo resultó altamente significativo ($F = 76,818$; $p < 0,001$) y explicó el 97,11 % de la variabilidad total observada, con un coeficiente de variación experimental de 4,86 %. La totalidad de los efectos evaluados resultó estadísticamente significativa. El análisis de la contribución porcentual aporta información especialmente relevante: la temperatura de secado explicó el 41,38 % de la variabilidad total, seguida por el tiempo de secado con un 20,72 % y por la interacción triple con un 20,60 %, valores prácticamente equivalentes entre estos dos últimos. En contraste, el tamaño de partícula, pese a resultar significativo, aportó únicamente el 1,22 % de la variabilidad, la menor contribución de todo el modelo.

Los supuestos del modelo se verificaron satisfactoriamente. La prueba de Shapiro-Wilk no rechazó la hipótesis de normalidad de los residuales ($W = 0,9437$; $p = 0,1972$) y la prueba de Levene confirmó la homogeneidad de varianzas entre las ocho combinaciones experimentales ($F = 0,607$; $p = 0,7421$). El análisis gráfico complementario, presentado en los Anexos 12 y 13, no evidenció valores atípicos, desviaciones sistemáticas en las colas ni patrones en la dispersión de los residuales frente a los valores ajustados. Los resultados del análisis de varianza se consideran, por tanto, estadísticamente válidos.

4.4.1.2. Efecto de los factores

La temperatura de secado fue el factor de mayor incidencia sobre la capacidad antioxidante, aportando el 41,38 % de la variabilidad total, la mayor contribución individual del modelo. Las infusiones obtenidas a partir de materia prima secada a 40 °C presentaron una capacidad antioxidante promedio de 11 142,35 $\mu\text{mol ET/L}$, frente a 15 081,06 $\mu\text{mol ET/L}$ en las secadas a 60 °C, lo que representa un incremento de 3 938,71 $\mu\text{mol ET/L}$. El tiempo de secado aportó el 20,72 % de la variabilidad, con medias de 11 718,01 $\mu\text{mol ET/L}$ para 3 h y 14 505,40 $\mu\text{mol ET/L}$ para 6 h. El tamaño de partícula, en cambio, presentó la menor contribución de todo el modelo, con apenas 1,22 %: las medias fueron de 13 449,31 $\mu\text{mol ET/L}$ con granulometría de 850 μm y 12 774,10 $\mu\text{mol ET/L}$ con 2000 μm .

La interpretación aislada de estos efectos principales resulta inapropiada, dado que la totalidad de las interacciones alcanzó significancia estadística. La interacción triple constituyó la tercera fuente de variación del modelo, con un 20,60 % de la variabilidad, contribución prácticamente idéntica a la del tiempo de secado y superior a la suma de las tres interacciones dobles. Este hecho evidencia que la forma en que los tres factores se combinan entre sí explica una porción de la variabilidad tan importante como el segundo efecto principal más relevante del experimento. Las interacciones entre temperatura y tiempo, y entre tiempo y tamaño de partícula, aportaron 5,44 % y 5,38 % respectivamente, mientras que la interacción entre temperatura y tamaño de partícula contribuyó con 2,37 %.

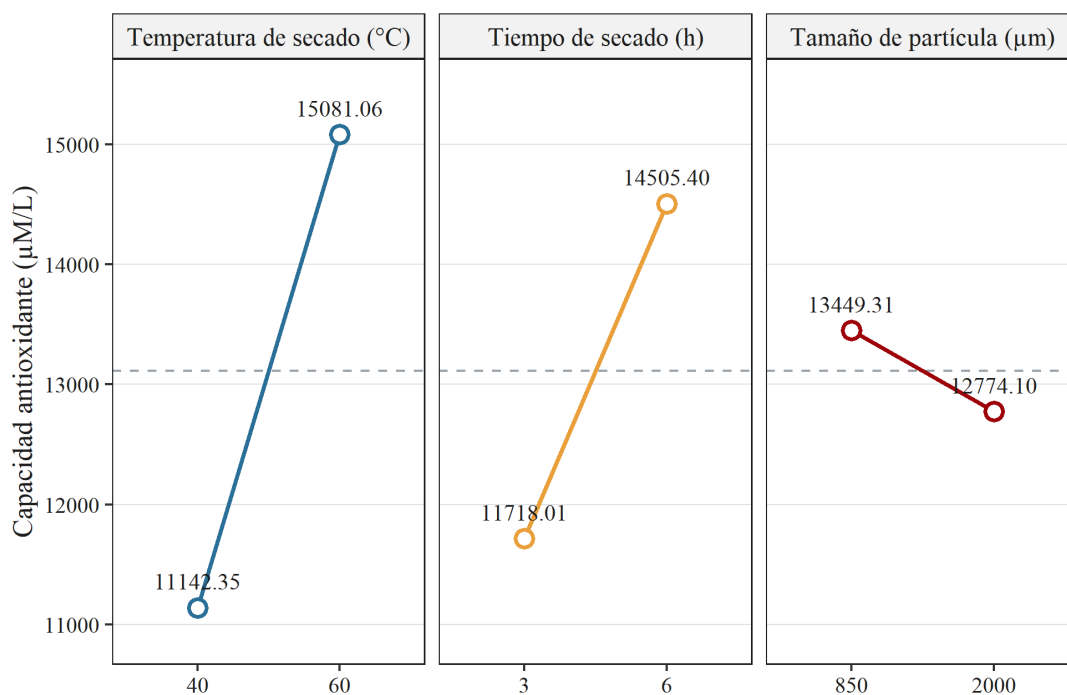
El análisis de efectos simples, cuyos resultados completos se presentan en el Anexo 14, permitió precisar el comportamiento condicional de cada factor, revelando que solo siete de las doce comparaciones resultaron estadísticamente significativas. El incremento de la temperatura de 40 a 60 °C aumentó la capacidad antioxidante en tres de las cuatro combinaciones de tiempo y granulometría, con diferencias comprendidas entre 1 644,74 y 9 089,34 $\mu\text{mol ET/L}$, pero no produjo efecto significativo en la combinación de 3 h con partículas de 2000 μm . El tiempo de secado presentó un comportamiento aún más selectivo, incrementando significativamente la capacidad antioxidante únicamente a 40 °C con partículas de 850 μm y a 60 °C con partículas de 2000 μm , mientras que en las dos combinaciones restantes las medias resultaron prácticamente coincidentes.

El tamaño de partícula mostró el comportamiento más heterogéneo de los tres factores. La molienda de 850 μm produjo una capacidad antioxidante significativamente superior a 40 °C durante 6 h y a 60 °C durante 3 h; no se detectaron diferencias a 40 °C durante 3 h; y, de manera inversa, a 60 °C durante 6 h fue la molienda de 2000 μm la que produjo un valor significativamente superior, con una diferencia de 4 466,76 $\mu\text{mol ET/L}$. Esta inversión del sentido del efecto explica por qué el efecto principal del tamaño de partícula, aun siendo significativo, aportó una contribución tan reducida a la variabilidad total.

La magnitud y el sentido de los efectos principales de los tres factores se representan de manera conjunta en la figura siguiente.

Figura 13

Efecto de los factores sobre la capacidad antioxidante de la infusión filtrante de ratania



Nota. Cada panel representa la media de capacidad antioxidante en los dos niveles del factor correspondiente. Las barras verticales indican el error estándar de la media ($n = 12$). La línea discontinua horizontal señala la media general del experimento, de 13 111,71 $\mu\text{mol ET/L}$. La pendiente de cada segmento expresa la magnitud del efecto principal. Elaboración propia.

4.4.1.3. Comparación de tratamientos

Dada la significancia de la interacción triple, se realizó la comparación múltiple de las ocho combinaciones experimentales mediante la prueba de Tukey, cuyos resultados se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 28

Comparación múltiple de las combinaciones experimentales para la capacidad antioxidante mediante la prueba de Tukey

Tratamiento	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Tamaño de partícula (µm)	Capacidad antioxidante estimada (µmol ET/L)	DE	Grupo
T2	40	3	2000	10 332,96	495,47	a
T4	40	6	2000	10 332,96	51,94	a
T1	40	3	850	10 592,66	269,88	a
T6	60	3	2000	11 008,17	476,03	a
T3	40	6	850	13 310,80	482,60	b
T5	60	3	850	14 938,23	196,64	b
T7	60	6	850	14 955,54	905,59	b
T8	60	6	2000	19 422,30	1269,06	c

Nota. Las medias que comparten la misma letra no presentan diferencias estadísticamente significativas según la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$). Error estándar de cada media estimada = 367,98; gl = 16. DE: desviación estándar de las tres repeticiones.

La prueba de Tukey permitió identificar tres grupos estadísticamente diferenciados. El grupo a reunió las cuatro combinaciones de menor capacidad antioxidante, con valores comprendidos entre 10 332,96 y 11 008,17 µmol ET/L; tres de ellas corresponden a un secado a 40 °C, y la única de 60 °C incluida en este grupo es la que combinó el tiempo de secado más corto con la granulometría más gruesa. El grupo b agrupó tres combinaciones, con valores entre 13 310,80 y 14 955,54 µmol ET/L, todas ellas elaboradas con granulometría de 850 µm.

El tratamiento T8, correspondiente a 60 °C, 6 h y 2000 µm, conformó por sí solo el grupo c, con una capacidad antioxidante de 19 422,30 µmol ET/L, significativamente superior a la de todas las demás combinaciones evaluadas. Este resultado adquiere particular relevancia al constatar que la misma combinación de temperatura y tiempo no produjo el mismo efecto con granulometría de 850 µm: en ese caso, el tratamiento T7 registró 14

955,54 $\mu\text{mol ET/L}$, integrando el grupo b, con una diferencia de 4 466,76 $\mu\text{mol ET/L}$ que resultó altamente significativa ($p < 0,0001$).

La comparación con otras condiciones evidencia la naturaleza condicional de este comportamiento. Bajo condiciones de 40 °C durante 3 h, la diferencia entre ambas granulometrías fue de apenas 259,70 $\mu\text{mol ET/L}$ y careció de significancia estadística ($p = 0,6245$); y bajo condiciones de 40 °C durante 6 h el sentido del efecto se invirtió, resultando la molienda de 850 μm la que produjo el mayor valor. En consecuencia, el efecto favorable del incremento de la temperatura y del tiempo de secado se manifestó de manera diferente según el tamaño de partícula empleado, llegando incluso a invertir el sentido de la ventaja atribuida a la granulometría.

Desde la perspectiva del proceso, la combinación de 60 °C durante 6 h con granulometría de 2000 μm resultó la más favorable para maximizar la capacidad antioxidante de la infusión, y su superioridad estadística respecto de la totalidad de los restantes tratamientos la posiciona como la condición de mayor valor funcional del diseño experimental.

4.4.1.4. Discusión

Al contrastar los resultados obtenidos con los reportados en la literatura para infusiones de otras especies vegetales, expresados en unidades equivalentes, se constata que la infusión de ratania presenta una capacidad antioxidante notablemente elevada. Los valores obtenidos, equivalentes a 10,33 y 19,42 mmol ET/L para los tratamientos extremos, se sitúan en la porción superior del intervalo determinado por Jiménez-Zamora et al. (2016), quienes evaluaron mediante el método ABTS 36 plantas tradicionalmente consumidas como infusión en España y reportaron valores de capacidad antioxidante equivalente a Trolox comprendidos entre 0,11 y 22,89 mmol Trolox/L, correspondientes al cardo mariano y al té verde, respectivamente. La infusión de *K. lappacea* alcanza, por tanto, una capacidad antioxidante del mismo orden de magnitud que el té verde, reconocido como la infusión más antioxidante en dicho estudio, y muy superior a la de la mayoría de las especies evaluadas. Los mismos autores concluyen que la ingesta de una porción de infusión vegetal puede liberar el equivalente a 1500 μmol de Trolox, lo que la convierte en una buena fuente de antioxidantes para la dieta humana.

Resulta igualmente ilustrativa la comparación con productos comerciales de reconocida funcionalidad antioxidante. Jakubczyk et al. (2024) determinaron la capacidad antioxidante de once té matcha disponibles en el mercado polaco, obteniendo valores comprendidos entre 7,26 y 9,54 mmol de equivalentes de Trolox por litro, magnitudes inferiores a las registradas en la totalidad de los tratamientos evaluados en el presente estudio. Esta constatación adquiere especial relevancia comercial, por cuanto el matcha constituye uno de los productos de mayor prestigio en el mercado global de bebidas funcionales, y sitúa a la infusión filtrante de ratania como una alternativa competitiva desde la perspectiva de su aporte antioxidante.

El hallazgo de mayor relevancia corresponde al efecto de la temperatura de secado, dado que los tratamientos procesados a 60 °C presentaron sistemáticamente valores superiores a los secados a 40 °C. Este comportamiento podría parecer contrario a la premisa general según la cual el tratamiento térmico degrada los compuestos bioactivos termolábiles. No obstante, la literatura especializada documenta que el efecto de la temperatura de secado sobre la capacidad antioxidante no es unidireccional, sino que resulta del balance entre fenómenos de degradación y de enriquecimiento, cuya magnitud relativa depende de la matriz vegetal.

Tres mecanismos complementarios explican el comportamiento observado en la ratania. Los dos primeros han sido documentados por Babaei Rad et al. (2025). Por una parte, las temperaturas de secado más elevadas inactivan las enzimas oxidativas, principalmente la polifenoloxidasas y la peroxidasa, previniendo las reacciones oxidativas y preservando mejor los principios activos de la planta; estos autores registraron, al evaluar once métodos de secado en frutos de *Capparis spinosa*, la menor actividad antioxidante precisamente en las muestras secadas en estufa a 50 °C, mientras que las secadas a 70 °C alcanzaron un contenido de fenoles totales de 5,31 mg GAE/g de peso seco. Por otra parte, el calentamiento favorece la liberación de los compuestos fenólicos ligados en el interior de las células vegetales, dado que rompe los enlaces de sus formas unidas y esterificadas y los convierte en formas más simples y extraíbles, fenómeno reforzado por el colapso de los espacios intercelulares inducido por el calor.

En tercer lugar, en matrices ricas en taninos el calor puede incrementar específicamente el contenido de taninos hidrolizables extraíbles. Lim y Eom (2022), al evaluar el secado

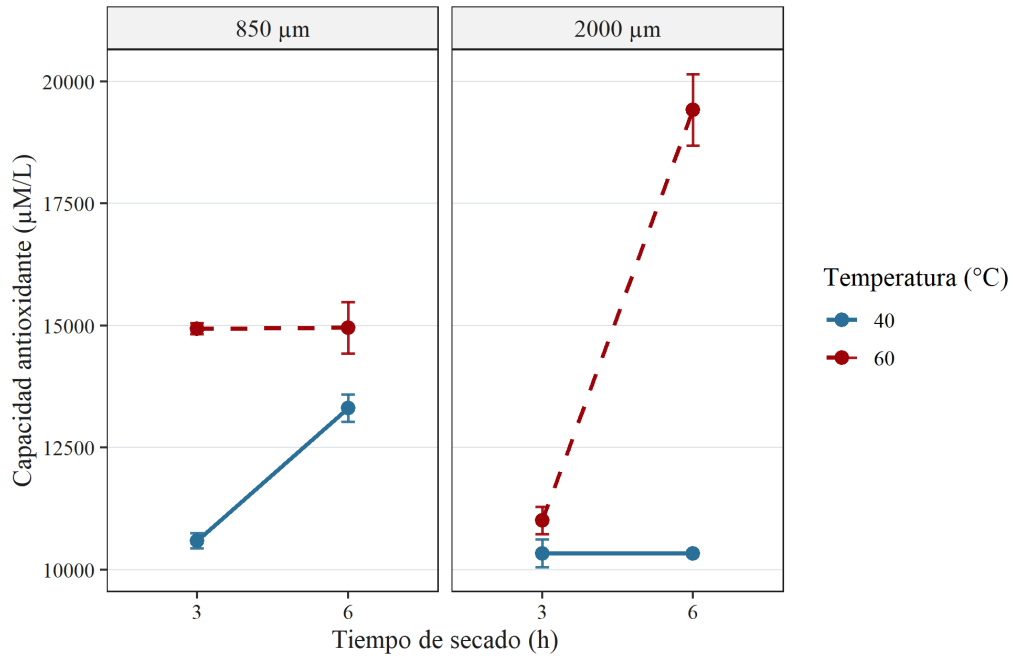
térmico de caqui astringente a 30, 60 y 90 °C, determinaron que el secado incrementó la capacidad antioxidante de la cáscara, atribuyendo dicho aumento principalmente al incremento del contenido de fenoles totales y, de manera especial, de taninos hidrolizables por efecto térmico, con correlaciones de $r^2 = 0,9493$ y $r^2 = 0,9288$ respectivamente. Dado que la corteza radicular de *K. lappacea* se caracteriza por su elevado contenido de taninos, este mecanismo ofrece una explicación coherente para el incremento observado a 60 °C y guarda plena coherencia con lo registrado en la acidez titulable, parámetro en el cual los tratamientos secados a dicha temperatura presentaron igualmente valores superiores.

Respecto del tamaño de partícula, la literatura reporta un efecto favorable de la reducción granulométrica sobre la capacidad antioxidante de las infusiones. Islam et al. (2020), al comparar infusiones preparadas con hierbas medicinales enteras frente a molidas hasta atravesar un tamiz de 40 mallas, equivalente a 425 μm , determinaron que las infusiones elaboradas con material molido presentaron mayores contenidos de compuestos fenólicos y flavonoides, con capacidades de captación del radical DPPH de 2569,21 $\mu\text{mol/L}$ para el clavo de olor, 1727,80 $\mu\text{mol/L}$ para la canela y 487,82 $\mu\text{mol/L}$ para el cardamomo. La comparación de estas magnitudes con las obtenidas en el presente estudio evidencia que la infusión de ratania supera ampliamente la capacidad antioxidante de las infusiones de especias evaluadas. En el presente trabajo, sin embargo, el efecto de la granulometría no siguió el patrón lineal descrito en dicha literatura, sino que apareció modulado por su interacción con las condiciones de secado, observación coherente con la naturaleza multifactorial del proceso, en la que la concentración inicial de compuestos bioactivos, determinada por el secado, y la eficiencia de su extracción, determinada por la granulometría, operan de manera conjunta sobre el resultado final.

En conjunto, los resultados evidencian que la infusión filtrante de *Krameria lappacea* posee una funcionalidad apreciable, comparable e incluso superior a la de infusiones comerciales de reconocido valor antioxidante, y que esta puede ser optimizada mediante la selección adecuada de las condiciones de proceso. El tratamiento T8 se destacó como el de mayor capacidad antioxidante, lo que respalda su consideración como candidato a tratamiento óptimo desde la perspectiva funcional, sin perjuicio de la evaluación conjunta con los atributos sensoriales que se aborda en los apartados siguientes.

Figura 14

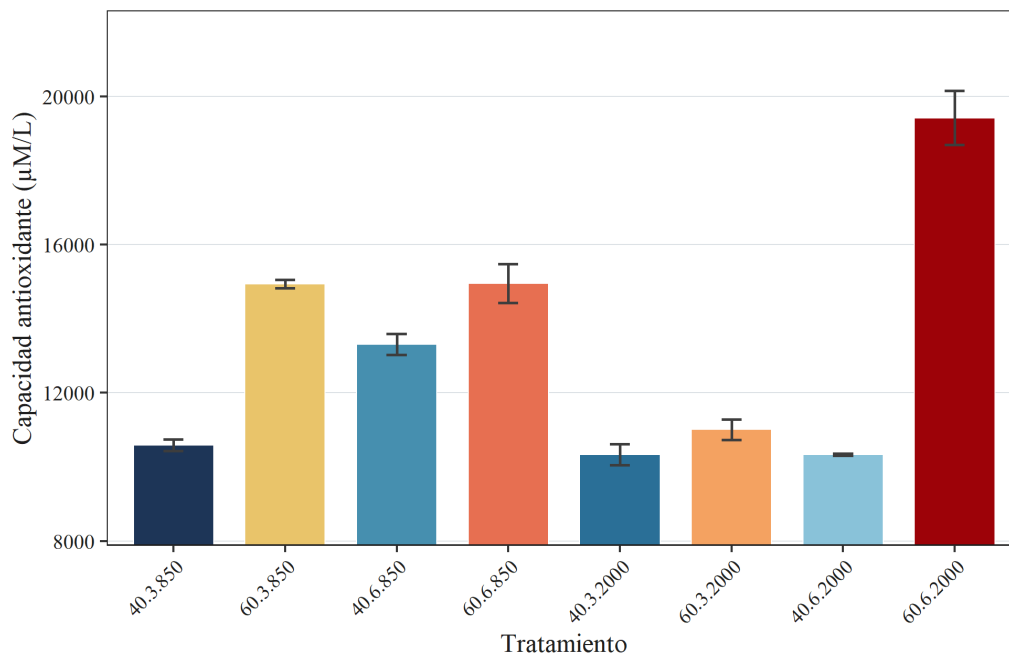
Interacción triple de los factores sobre la capacidad antioxidante de la infusión filtrante de ratania



Nota. Los paneles corresponden a los tamaños de partícula de 850 y 2000 µm. La línea continua representa 40 °C y la línea discontinua 60 °C. Las barras verticales indican el error estándar de la media (n = 3). El contraste entre ambos paneles evidencia la interacción triple entre los factores.

Figura 15

Capacidad antioxidante de la infusión filtrante de ratania según combinación experimental



Nota. Las barras representan la media de tres repeticiones y las barras verticales el error estándar. Las etiquetas del eje horizontal indican temperatura, tiempo y tamaño de partícula de cada combinación. El eje vertical se presenta truncado para facilitar la visualización de las diferencias entre tratamientos.

4.4.1.5. Proyección funcional del aporte antioxidante y estimación de consumo

La caracterización precedente establece la magnitud de la capacidad antioxidante de la infusión y su dependencia de las condiciones de proceso. Corresponde ahora dimensionar dicha magnitud en términos de aporte dietario, contrastarla con la de infusiones de consumo habitual y estimar la frecuencia de consumo asociada a los niveles de ingesta documentados en la literatura epidemiológica. Conviene precisar, conforme a lo desarrollado en el marco teórico, que el valor determinado mediante el método DPPH constituye una medida química obtenida *in vitro* y no una medida directa de efecto fisiológico.

El fundamento de esta proyección reside en la asociación documentada entre la capacidad antioxidante total de la dieta, expresada en milimoles de equivalentes de Trolox por día, y los desenlaces en salud. Parohan et al. (2019), mediante una revisión sistemática y un metaanálisis de dosis-respuesta sobre cinco cohortes prospectivas que reunieron 226 297 individuos, determinaron una asociación inversa significativa entre dicho indicador y la mortalidad por todas las causas, por cáncer y por enfermedades cardiovasculares, con tamaños de efecto combinados de 0,62, 0,81 y 0,71 respectivamente. El análisis de dosis-respuesta estableció que un incremento de 5 mmol por día se asocia con reducciones del riesgo de mortalidad por todas las causas del 7 % según el método FRAP y del 15 % según el método ORAC, magnitud que constituye el patrón cuantitativo de referencia empleado en el presente apartado.

La evidencia biomédica específica de la especie, desarrollada en el marco teórico, respalda el interés de esta caracterización. En el nivel clínico, Shirakawa et al. (2021) demostraron en un ensayo aleatorizado con 74 pacientes mejoras significativas de los índices periodontales con un dentífrico formulado con tintura de ratania; en modelos animales se ha documentado el incremento de las enzimas antioxidantes y la reducción de los marcadores de peroxidación lipídica; y en cultivo celular se han reportado concentraciones inhibitorias medias de 64,81 µg/mL sobre la línea MCF-7 de cáncer de mama. Corresponde reiterar, no obstante, que dicha evidencia procede de extractos en solventes orgánicos ensayados a concentraciones no alcanzables mediante infusión acuosa, por lo que no autoriza extrapolación de dosis alguna hacia el consumo de la bebida.

Con el objeto de dimensionar la magnitud alcanzada, se contrastaron los valores obtenidos con los reportados para infusiones de consumo habitual y para productos comerciales de reconocida funcionalidad antioxidante, conforme se presenta en la tabla siguiente.

Tabla 29

Capacidad antioxidante de la infusión filtrante de ratania y de otras infusiones de consumo habitual

Muestra	Método	Capacidad antioxidante
Infusión de ratania, T8	DPPH	19,42 mmol ET/L
Infusión de ratania, valor mínimo	DPPH	10,33 mmol ET/L
Té verde	ABTS	22,89 mmol Trolox/L ^a
Cardo mariano	ABTS	0,11 mmol Trolox/L ^a
Té matcha comercial		7,26 a 9,54 mmol ET/L ^b
Infusión de clavo de olor	DPPH	2,57 mmol/L ^c
Infusión de canela	DPPH	1,73 mmol/L ^c
Infusión de cardamomo	DPPH	0,49 mmol/L ^c

Nota. ET: equivalentes de Trolox. Los valores sin llamada corresponden al presente estudio y representan el tratamiento de mayor capacidad antioxidante y el de menor valor del diseño experimental, obtenidos con una relación de 1 g de material seco por cada 50 mL de agua. Los métodos analíticos difieren entre las fuentes consultadas, por lo que la comparación debe interpretarse en términos de orden de magnitud. ^a Jiménez-Zamora et al. (2016). ^b Jakubczyk et al. (2024); la fuente no precisa el ensayo empleado y expresa el resultado como equivalentes de Trolox por litro. ^c Islam et al. (2020); los valores se expresan como capacidad de captación del radical DPPH. Elaboración propia.

El tratamiento óptimo alcanzó el 84,9 % de la capacidad antioxidante determinada para el té verde, especie identificada como la más antioxidante entre las 36 evaluadas por Jiménez-Zamora et al. (2016), y resultó entre 2,04 y 2,68 veces superior al té matcha comercial caracterizado por Jakubczyk et al. (2024). Frente a las infusiones de especias evaluadas por Islam et al. (2020) la diferencia alcanzó un orden de magnitud, dado que el clavo de olor, la más activa de aquellas, registró 2,57 mmol/L frente a los 19,42 mmol/L

del tratamiento T8. Incluso el tratamiento de menor capacidad del presente diseño superó a la totalidad de las infusiones de especias y al matcha. Esta comparación exige la advertencia metodológica desarrollada en el marco teórico: los ensayos DPPH, ABTS y FRAP no son intercambiables, y las condiciones de preparación varían entre estudios, por lo que la lectura debe realizarse en términos de orden de magnitud.

Dado que la concentración por litro depende de la relación de preparación empleada, resulta necesario expresar el resultado sobre la unidad real de consumo. El producto desarrollado consiste en un sobre filtrante de 2 g preparado a razón de 1 g de material seco por cada 50 mL de agua, de modo que cada unidad genera 100 mL de infusión.

Tabla 30

Aporte antioxidante de la infusión filtrante de ratania según base de expresión

Base de expresión	Tratamiento óptimo (T8)	Valor mínimo del diseño
Por litro de infusión	19 422,30 ± 1 269,06 µmol ET/L	10 332,96 ± 495,47 µmol ET/L
Por sobre filtrante de 2 g	1 942,23 ± 126,91 µmol ET	1 033,30 ± 49,55 µmol ET
Por gramo de material seco	971,12 µmol ET/g	516,65 µmol ET/g

Nota. ET: equivalentes de Trolox. Los valores por sobre y por gramo se derivan del valor determinado por litro conforme al procedimiento descrito en la metodología. El valor mínimo del diseño corresponde a los tratamientos T2 y T4. Elaboración propia.

Un sobre elaborado bajo las condiciones del tratamiento óptimo aporta 1 942,23 µmol de equivalentes de Trolox. Jiménez-Zamora et al. (2016) establecieron que la ingesta de una porción de infusión vegetal puede liberar el equivalente a 1 500 µmol de Trolox, magnitud que los autores consideran suficiente para calificar a estas bebidas como una buena fuente de antioxidantes para la dieta humana; el sobre de ratania aporta, por tanto, el 129,5 % de dicha porción de referencia, y aun el tratamiento de menor capacidad alcanza el 68,9 %. La diferencia entre ambos extremos supone que la selección de las condiciones de secado y de granulometría determina, por sí sola, una variación cercana al 88 % en el aporte que

recibe el consumidor por unidad de producto, sin modificación alguna de la materia prima ni de la dosificación.

A partir del aporte por unidad y del patrón de referencia de 5 mmol por día, la frecuencia de consumo asociada a dicho incremento se estima conforme se presenta en la tabla siguiente.

Tabla 31

Estimación del aporte antioxidante según frecuencia de consumo de la infusión filtrante de ratania

Frecuencia de consumo	Sobres por semana	Aporte diario (mmol ET)	Aporte semanal (mmol ET)	Proporción del incremento de 5 mmol/día (%)
1 sobre al día	7	1,94	13,60	38,8
2 sobres al día	14	3,88	27,19	77,7
3 sobres al día	21	5,83	40,79	116,5

Nota. ET: equivalentes de Trolox. Los cálculos corresponden al tratamiento óptimo, que aporta 1 942,23 μ mol ET por sobre filtrante de 2 g. La columna final expresa la proporción respecto del incremento de 5 mmol por día reportado por Parohan et al. (2019). Dicho incremento fue estimado en la fuente mediante los métodos FRAP y ORAC, mientras que el presente estudio empleó el método DPPH, por lo que la comparación posee carácter orientativo. Elaboración propia.

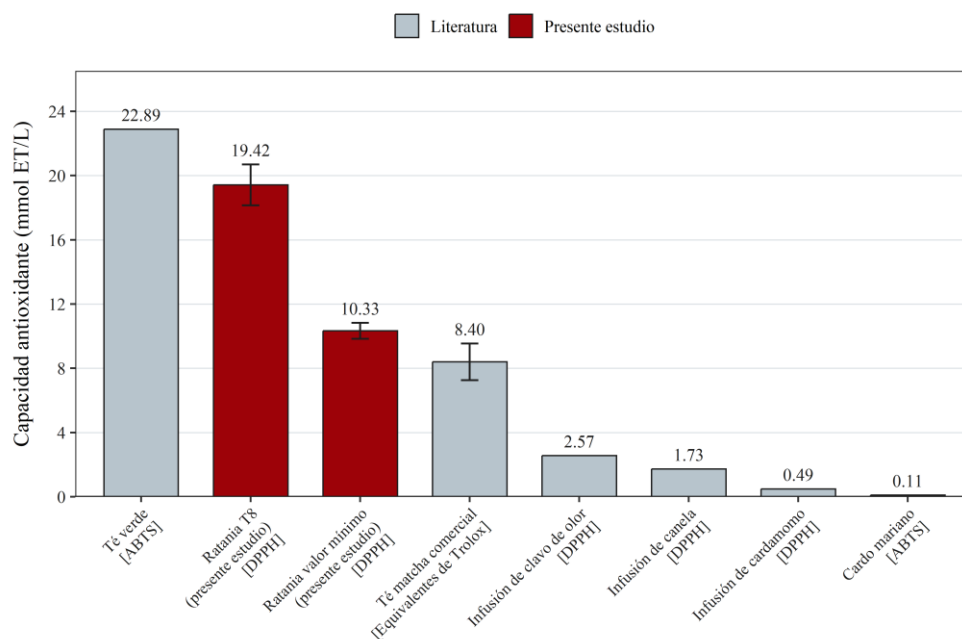
El consumo de un sobre diario aporta 1,94 mmol de equivalentes de Trolox, equivalentes al 38,8 % del incremento de referencia, proporción que asciende al 77,7 % con dos sobres diarios. Para igualar íntegramente dicho incremento se requerirían aproximadamente 2,6 sobres diarios, esto es, 18 sobres a la semana. Conviene precisar el sentido de esta estimación: la cifra de 5 mmol por día corresponde a un incremento sobre la ingesta antioxidante habitual del individuo y no a un requerimiento nutricional establecido, dado que no existen valores de referencia oficiales para la capacidad antioxidante de la dieta. La lectura apropiada es, por tanto, que una unidad diaria de infusión filtrante de ratania aporta una fracción sustantiva del incremento dietario que la evidencia epidemiológica

asocia con reducciones del riesgo de mortalidad, mediante un producto de bajo costo, elevada aceptabilidad cultural y preparación sencilla.

Cuatro limitaciones delimitan el alcance de esta proyección. La capacidad antioxidante determinada mediante DPPH constituye una medida química realizada *in vitro*, de modo que su traducción a beneficio fisiológico es indirecta. Los valores de referencia dietarios fueron estimados en la fuente mediante los métodos FRAP y ORAC, procedimientos no intercambiables con el DPPH, por lo que la comparación conserva carácter orientativo. La capacidad antioxidante presente en la bebida no equivale a la efectivamente absorbida y disponible en el organismo, dado que los compuestos fenólicos experimentan una absorción parcial y una extensa transformación metabólica, aspectos no evaluados en la presente investigación. Y la evidencia citotóxica *in vitro* no admite extrapolación a dosis de consumo humano. En consecuencia, los resultados presentados describen el aporte dietario potencial del producto y no constituyen una declaración de propiedad saludable ni una recomendación de carácter terapéutico; su confirmación requeriría estudios de biodisponibilidad y ensayos de intervención en humanos, líneas de trabajo recogidas en el apartado de recomendaciones.

Figura 16

Capacidad antioxidante de la infusión filtrante de ratania en comparación con otras infusiones de consumo habitual



Nota. Las barras representan la capacidad antioxidante de cada infusión expresada en milimoles de equivalentes de Trolox por litro. Las barras sombreadas corresponden a los tratamientos de la infusión filtrante de ratania del presente estudio. El método analítico se indica bajo cada categoría, dado que difiere entre las fuentes consultadas. Elaboración propia a partir de los datos del presente estudio y de Jiménez-Zamora et al. (2016), Jakubczyk et al. (2024) e Islam et al. (2020).

4.5. Análisis sensorial de la infusión filtrante

La evaluación sensorial se realizó con un panel de 105 evaluadores no entrenados que calificaron los ocho tratamientos mediante una escala visual analógica de tipo hedónico anclada en 1, 5,5 y 10 puntos, con lo que se obtuvieron 840 evaluaciones por atributo; la ficha empleada se presenta en el Anexo 1 y la estructura del registro de datos en el Anexo 15. Como cada panelista evaluó las ocho muestras, sus calificaciones no constituyen mediciones independientes y el panelista se incorporó al modelo como factor de bloqueo, decisión que en cada atributo se justifica comparando el modelo que omite dicho efecto con el que lo incorpora. El análisis corresponde a un diseño factorial completo 2^3 en bloques completos al azar con $\alpha = 0,05$; las medias se compararon mediante la prueba de Tukey empleando el cuadrado medio del error del modelo con bloque, y los supuestos se evaluaron con las pruebas de Levene y de Shapiro-Wilk y se respaldaron con la prueba de Friedman y con un análisis de varianza por permutaciones dentro de bloque de 20 000 remuestreos. Este procedimiento es común a los cuatro atributos y no se reitera en cada uno de ellos.

4.5.1. Evaluación del atributo Color

El color constituye el primer atributo que percibe el consumidor y condiciona la aceptación del producto antes incluso de su consumo. En la infusión de ratania procede de los taninos y proantocianidinas de la corteza radicular, cuya concentración y estado de oxidación dependen de las condiciones de secado y de la granulometría empleada.

Tabla 32*Puntajes del atributo color de las infusiones filtrantes de Krameria lappacea*

Tratamiento	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Tamaño de partícula (µm)	Puntaje de color (media ± DE)	CV (%)
T1	40	3	850	6,32 ± 1,82	28,80
T2	40	3	2000	6,96 ± 1,55	22,30
T3	40	6	850	6,57 ± 1,80	27,36
T4	40	6	2000	6,46 ± 1,76	27,21
T5	60	3	850	6,95 ± 1,68	24,12
T6	60	3	2000	6,72 ± 1,97	29,36
T7	60	6	850	6,75 ± 1,95	28,90
T8	60	6	2000	6,98 ± 2,11	30,20

Nota. Media ± desviación estándar de las evaluaciones de 105 panelistas (n = 105 por tratamiento). CV: coeficiente de variación. La media general del atributo fue de 6,71 puntos. Elaboración propia.

Las puntuaciones medias oscilaron entre 6,32 y 6,98 puntos, correspondientes a T1 y T8, con una media general de 6,71 puntos y una amplitud de 0,66 puntos sobre una escala de diez. La totalidad de los tratamientos superó el punto medio y se situó entre el 63,2 % y el 69,8 % de su valor máximo, lo que evidencia una percepción visual relativamente homogénea de las ocho formulaciones. Los coeficientes de variación, de 22,30 % a 30,20 %, y el empleo de 83 valores distintos en un recorrido de 1,8 a 10,0 puntos confirman la heterogeneidad de criterio propia de un panel de consumidores no entrenados.

4.5.1.1. Análisis de varianza

Con la finalidad de verificar la pertinencia del bloqueo se ajustaron y compararon ambos modelos, cuya comparación se presenta en la tabla siguiente.

Tabla 33*Ajuste del modelo con panelista como bloque para el atributo color*

Aspecto	Modelo con bloque
Grados de libertad del error	728
Suma de cuadrados del error	1 093,686
Cuadrado medio del error	1,5023
R ² del modelo	0,6165
Coefficiente de variación experimental (%)	18,26
Efectos significativos	Panelista, A y ABC

Nota. El panelista concentró el 60,07 % de la variabilidad total del atributo. Elaboración propia.

Sin el bloque, el error experimental se duplica y el coeficiente de determinación caería a 0,0157, de manera que el arreglo factorial explicaría menos del 2 % de la variabilidad observada y el resto quedaría confundido dentro del error. Los dos efectos significativos se mantienen en ambos modelos, pero su detección se refuerza al controlar el bloque, pues la temperatura de secado pasa de $p = 0,0344$ a $p = 0,0016$ y la interacción triple de $p = 0,0166$ a $p = 0,0003$. Los resultados reportados corresponden, por tanto, al modelo que incorpora al panelista como bloque.

Tabla 34*Análisis de varianza en bloques completos al azar del atributo color*

Fuente	SC	gl	CM	F	p	Contribución (%)	Sig.
Panelista (bloque)	1 713,015	104	16,4713	10,9639	< 0,001	60,07	***
A: Temperatura (°C)	15,147	1	15,1474	10,0827	0,0016	0,53	**
B: Tiempo (h)	0,495	1	0,4954	0,3298	0,5660	0,02	ns
C: Tamaño de partícula (µm)	3,707	1	3,7067	2,4673	0,1167	0,13	ns
AB	1,204	1	1,2039	0,8013	0,3710	0,04	ns
AC	3,627	1	3,6274	2,4146	0,1206	0,13	ns
BC	1,159	1	1,1589	0,7714	0,3801	0,04	ns
ABC	19,444	1	19,4439	12,9426	0,0003	0,68	***
Error	1 093,686	728	1,5023			38,36	
Total	2 851,485	839				100,00	

Nota. SC: suma de cuadrados; gl: grados de libertad; CM: cuadrado medio. A: temperatura de secado; B: tiempo de secado; C: tamaño de partícula; AB, AC y BC: interacciones dobles; ABC: interacción triple. La contribución porcentual se calculó como la razón entre la suma de cuadrados de cada fuente y la suma de cuadrados total, por lo que la columna suma 100 %; descontada la variabilidad del panelista, el arreglo factorial explica el 3,93 % y el error el 96,07 %. $R^2 = 0,6165$; R^2 ajustado = 0,5580; coeficiente de variación experimental = 18,26 %. Valores p exactos: $1,14 \times 10^{-94}$ para el panelista, $1,56 \times 10^{-3}$ para la temperatura y $3,43 \times 10^{-4}$ para la interacción triple. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns: no significativo.

El efecto de bloque resultó altamente significativo ($F = 10,9639$; $p < 0,001$) y explicó por sí solo el 60,07 % de la variabilidad total, lo que confirma que las diferencias de criterio entre evaluadores constituyen la principal fuente de variación en la evaluación visual. De los siete efectos del arreglo factorial solo dos alcanzaron significancia, la temperatura de secado ($F = 10,0827$; $p = 0,0016$) y la interacción triple ($F = 12,9426$; $p = 0,0003$), y en

conjunto el arreglo explicó el 1,57 % de la variabilidad, con un coeficiente de variación experimental de 18,26 %.

La prueba de Levene rechazó la homogeneidad de varianzas ($F = 2,5031$; $p = 0,0150$), aunque la heterogeneidad es reducida: la razón entre la mayor y la menor desviación estándar fue de 1,36, equivalente a una razón de varianzas de 1,84, valor con el que el estadístico F conserva su nivel nominal en un diseño balanceado como este, con 105 observaciones por tratamiento. La prueba de Shapiro-Wilk rechazó también la normalidad de los residuales ($W = 0,9705$; $p < 0,001$), resultado esperable con 840 observaciones y con una escala acotada entre 1 y 10 puntos que trunca las colas de la distribución; el rechazo no se debe a la discretización de las respuestas, pues el panel empleó 83 valores distintos, y la distribución solo presenta una asimetría de $-0,54$ y una curtosis en exceso de 1,32, conforme muestran los Anexos 16 y 17.

Ambos procedimientos de respaldo confirmaron las conclusiones. La prueba de Friedman detectó diferencias altamente significativas entre tratamientos ($\chi^2 = 61,3997$; $gl = 7$; $p < 0,001$) y el análisis de varianza por permutaciones dentro de bloque, presentado en el Anexo 18, coincidió con el procedimiento paramétrico en los siete efectos del modelo, con valores de probabilidad que difirieron en menos de 0,005. Los resultados del análisis de varianza se consideran, por tanto, estadísticamente válidos.

4.5.1.2. Efecto de los factores

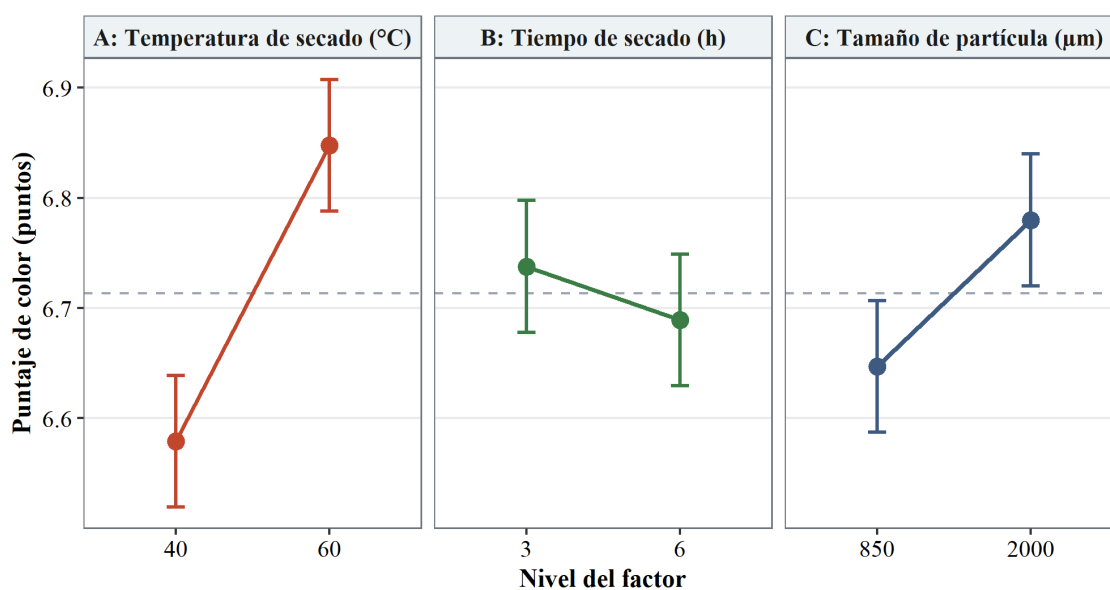
La temperatura de secado fue el único efecto principal significativo, con una contribución de 0,53 % a la variabilidad total: las infusiones secadas a 60 °C alcanzaron 6,85 puntos frente a 6,58 puntos de las secadas a 40 °C, diferencia de 0,27 puntos. El tamaño de partícula aportó el 0,13 % sin alcanzar significancia ($p = 0,1167$), con medias de 6,65 y 6,78 puntos para 850 y 2000 μm , y el tiempo de secado constituyó el efecto de menor magnitud del modelo, con un 0,02 % y medias de 6,74 y 6,69 puntos para 3 y 6 h. Las tres interacciones dobles tampoco resultaron significativas y aportaron en conjunto el 0,21 %.

La interacción triple sí resultó significativa y constituyó el efecto experimental de mayor contribución del modelo, con un 0,68 %, lo que indica que el efecto de la temperatura depende simultáneamente del tiempo de secado y del tamaño de partícula y que los efectos principales no pueden interpretarse de forma aislada. El análisis de efectos

simples, presentado en el Anexo 19, precisa esa dependencia: solo cuatro de las doce comparaciones resultaron significativas y el sentido de cada factor cambia según la combinación en que se evalúe. El aumento de 40 a 60 °C mejoró el puntaje con partícula fina y secado corto, en 0,629 puntos ($p = 0,0002$), y con partícula gruesa y secado prolongado, en 0,517 puntos ($p = 0,0023$), pero no en las dos combinaciones restantes; el tiempo de secado solo actuó a 40 °C con partícula gruesa, y de forma desfavorable, con $-0,503$ puntos ($p = 0,0030$); y el tamaño de partícula únicamente a 40 °C con 3 h, donde la molienda gruesa superó a la fina en 0,643 puntos ($p = 0,0002$). Que cada factor actúe solo dentro de determinadas combinaciones constituye la expresión de la interacción triple.

Figura 17

Efectos principales de la temperatura de secado, el tiempo de secado y el tamaño de partícula sobre la aceptabilidad del color de la infusión filtrante de ratania



Nota. Cada punto representa la media de 420 evaluaciones y las barras verticales el error estándar de la media, de 0,060 puntos. La línea horizontal discontinua corresponde a la media general del atributo, de 6,71 puntos. Elaboración propia.

4.5.1.3. Comparación de tratamientos

La prueba de Tukey se aplicó sobre las ocho combinaciones empleando el cuadrado medio del error del modelo con bloque, con una diferencia mínima significativa resultante de 0,514 puntos. Los resultados se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 35

Comparación múltiple de las combinaciones experimentales para el atributo color mediante la prueba de Tukey

Tratamiento	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Tamaño de partícula (µm)	Media ± DE	Grupo
T1	40	3	850	6,32 ± 1,82	a
T4	40	6	2000	6,46 ± 1,76	ab
T3	40	6	850	6,57 ± 1,80	abc
T6	60	3	2000	6,72 ± 1,97	abc
T7	60	6	850	6,75 ± 1,95	abc
T5	60	3	850	6,95 ± 1,68	bc
T2	40	3	2000	6,96 ± 1,55	bc
T8	60	6	2000	6,98 ± 2,11	c

Nota. Tratamientos ordenados de menor a mayor media. Las medias que comparten al menos una letra no presentan diferencias estadísticamente significativas según la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$). Diferencia mínima significativa = 0,514 puntos. Error estándar de cada media estimada = 0,120; gl = 728. DE: desviación estándar de las 105 evaluaciones. Elaboración propia.

La prueba formó tres grupos con un solapamiento considerable: T1 ocupa en solitario la letra a, con 6,32 puntos, y T8 la letra c, con 6,98 puntos. De las 28 comparaciones por pares, cuatro resultaron significativas y todas involucran a T1 o a T4: T8 frente a T1, con una diferencia de 0,657 puntos y $p = 0,0028$; T2 frente a T1, con 0,643 puntos y $p = 0,0039$; T5 frente a T1, con 0,629 puntos y $p = 0,0053$; y T8 frente a T4, con 0,517 puntos y $p = 0,0475$. Otras dos quedaron próximas al límite de decisión, T2 frente a T4 con $p =$

0,0606 y T5 frente a T4 con $p = 0,0765$, lo que indica que la frontera entre los grupos no es tajante.

El ordenamiento no responde a un único factor, pues los tres tratamientos del extremo superior, T8, T2 y T5, combinan niveles distintos de los tres, mientras que T1 corresponde a la combinación menos intensa del diseño; ello resulta coherente con que el efecto de mayor contribución haya sido la interacción triple. Conviene además situar la magnitud de las diferencias: la mayor de ellas, de 0,657 puntos, equivale al 7,3 % de la amplitud de la escala y es inferior a los 0,9 puntos adoptados como diferencia mínima con relevancia práctica en el cálculo del tamaño de panel, de modo que son estadísticamente demostrables, pero de magnitud moderada.

4.5.1.4. Discusión

La totalidad de los tratamientos se situó entre el 63,2 % y el 69,8 % del valor máximo de la escala, nivel comparable con el reportado por Ehoche et al. (2021), quienes mediante escala hedónica de 7 puntos obtuvieron para el color 5,87 puntos en una infusión de clavo de olor, la mejor valorada, y 4,46 puntos en una de hierba limón, equivalentes al 83,9 % y al 63,7 % de su máximo. La infusión de ratania se ubica, por tanto, dentro del rango documentado para infusiones herbales, próxima a su extremo inferior. La comparación se establece en términos relativos, dado que la escala visual analógica, de naturaleza continua, ofrece pocos referentes directamente comparables, razón por la cual los valores se han normalizado como porcentaje del máximo de cada escala.

El 60,07 % de la variabilidad absorbido por el bloque de panelista y la magnitud de los coeficientes de variación resultan característicos de los paneles integrados por consumidores no entrenados, en los cuales los criterios individuales y la experiencia previa de consumo introducen una dispersión considerablemente mayor que la observada en paneles entrenados. En esta línea, Tannuri et al. (2026) determinaron que la percepción sensorial de infusiones herbales varía principalmente en función del sexo de los panelistas y de sus hábitos previos de consumo.

Desde el punto de vista tecnológico, el efecto favorable de la temperatura resulta coherente con la composición de la materia prima: las condiciones de secado más severas favorecen reacciones de pardeamiento y la modificación oxidativa de los compuestos fenólicos, lo que intensifica la tonalidad pardo-rojiza que aportan los taninos y

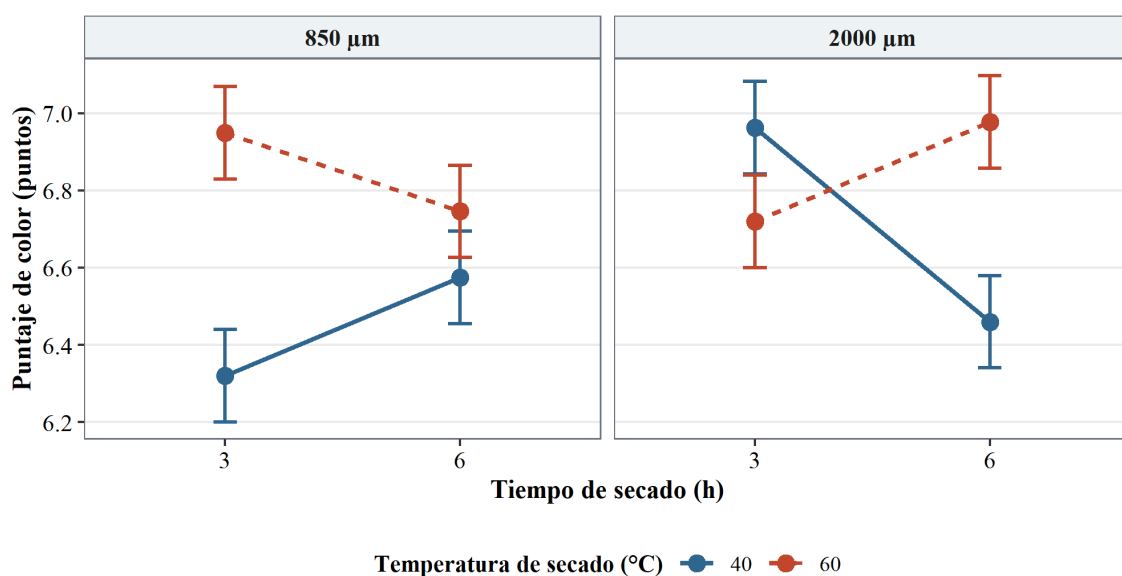
proantocianidinas, intensificación que el panel valoró positivamente, aunque con magnitud reducida. Que el efecto solo se manifieste dentro de determinadas combinaciones de tiempo y granulometría indica que el desarrollo del color no depende de la temperatura de manera aislada, sino de la historia térmica del material y de la superficie expuesta durante el secado.

La consecuencia práctica es favorable para la selección de la condición óptima del proceso, por cuanto el tratamiento T8, correspondiente a 60 °C durante 6 h con granulometría de 2000 µm, alcanzó la mayor puntuación media del conjunto y ocupó en solitario el grupo estadístico superior, de modo que la percepción visual del producto no restringe su elección, sino que la respalda.

El efecto favorable de la temperatura de secado sobre la valoración del color se atribuye al desarrollo de pigmentos pardos derivados de la oxidación y condensación de compuestos fenólicos durante el tratamiento térmico, que generan una infusión de tonalidad más intensa y homogénea, asociada por el consumidor a una bebida de mayor cuerpo.

Figura 18

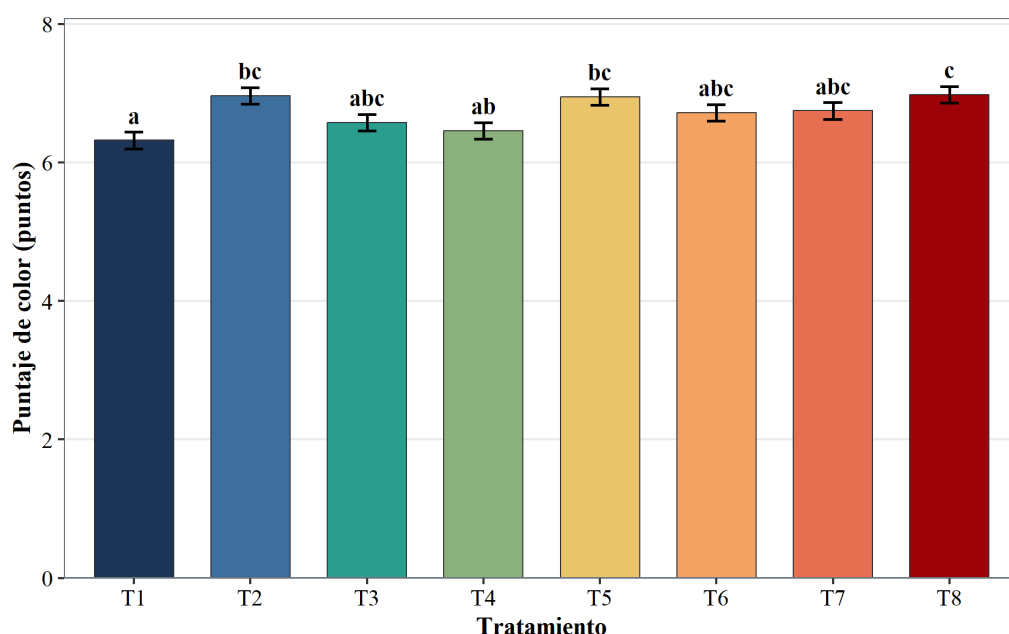
Interacción de los factores sobre la aceptabilidad del color de la infusión filtrante de ratania



Nota. Los paneles corresponden a los tamaños de partícula de 850 y 2000 μm . La línea continua representa el secado a 40 °C y la discontinua el secado a 60 °C. Cada punto es la media de 105 evaluaciones y las barras verticales indican el error estándar de la media, de 0,120 puntos. El cambio de patrón entre ambos paneles corresponde a la interacción triple detectada por el análisis de varianza. Elaboración propia.

Figura 19

Puntaje medio de aceptabilidad del color según tratamiento



Nota. Las barras representan la media de las 105 evaluaciones de cada tratamiento y las barras verticales el error estándar de la media, de 0,120 puntos. Las letras corresponden a los grupos de la prueba de Tukey; los tratamientos que comparten al menos una letra no difieren entre sí ($\alpha = 0,05$). Elaboración propia.

4.5.2. Evaluación del atributo Olor

El olor es uno de los atributos determinantes en la aceptación de las infusiones, por cuanto los compuestos volátiles liberados durante la preparación se perciben antes del consumo y anticipan la experiencia sensorial. En la ratania el perfil aromático depende de los volátiles retenidos en la materia prima, especialmente sensibles a la temperatura y al tiempo aplicados durante el secado.

Tabla 36*Puntajes del atributo olor de las infusiones filtrantes de Krameria lappacea*

Tratamiento	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Tamaño de partícula (µm)	Puntaje de olor (media ± DE)	CV (%)
T1	40	3	850	5,87 ± 2,19	37,27
T2	40	3	2000	6,19 ± 1,96	31,74
T3	40	6	850	6,42 ± 1,84	28,74
T4	40	6	2000	6,25 ± 1,77	28,25
T5	60	3	850	6,20 ± 1,78	28,77
T6	60	3	2000	6,67 ± 1,67	25,00
T7	60	6	850	6,65 ± 1,56	23,38
T8	60	6	2000	6,67 ± 1,72	25,85

Nota. Media ± desviación estándar de las evaluaciones de 105 panelistas (n = 105 por tratamiento). CV: coeficiente de variación. La media general del atributo fue de 6,36 puntos. Elaboración propia.

Las puntuaciones medias oscilaron entre 5,87 y 6,67 puntos, correspondientes a T1 y T6, con una media general de 6,36 puntos y una amplitud de 0,81 puntos. La totalidad de los tratamientos superó el punto medio de la escala, situándose entre el 58,7 % y el 66,7 % de su valor máximo, y los tres mejor valorados correspondieron en su totalidad a un secado a 60 °C. Los coeficientes de variación, de 23,38 % a 37,27 %, mostraron una tendencia decreciente conforme aumentaba la puntuación media, de modo que los tratamientos mejor valorados generaron además mayor consenso entre los evaluadores; el panel empleó 84 valores distintos en un recorrido que abarcó la escala completa, de 1,0 a 10,0 puntos.

4.5.2.1. Análisis de varianza

Con la finalidad de verificar la pertinencia del bloqueo se ajustaron y compararon ambos modelos, cuya comparación se presenta en la tabla siguiente.

Tabla 37*Ajuste del modelo con panelista como bloque para el atributo olor*

Aspecto	Modelo con bloque
Grados de libertad del error	728
Suma de cuadrados del error	781,712
Cuadrado medio del error	1,0738
R ² del modelo	0,7227
Coefficiente de variación experimental (%)	16,28
Efectos significativos	Panelista, A, B, C y BC

Nota. El panelista concentró el 70,07 % de la variabilidad total del atributo. Elaboración propia.

El efecto del bloqueo resulta especialmente ilustrativo en este atributo. Sin él, el modelo explicaría apenas el 2,20 % de la variabilidad y solo la temperatura y el tiempo de secado alcanzan significancia; al incorporar el panelista, el cuadrado medio del error se reduce a menos de la tercera parte y aparecen dos efectos adicionales, el tamaño de partícula, que pasa de $p = 0,1991$ a $p = 0,0243$, y la interacción entre tiempo y tamaño, que pasa de $p = 0,0609$ a $p = 0,0010$. La variabilidad entre evaluadores estaba, por tanto, enmascarando efectos reales de las condiciones de procesamiento. Los resultados reportados corresponden al modelo con bloque.

Tabla 38*Análisis de varianza en bloques completos al azar del atributo olor*

Fuente	SC	gl	CM	F	p	Contribución (%)	Sig.
Panelista (bloque)	1 975,401	104	18,9942	17,6891	< 0,001	70,07	***
A: Temperatura (°C)	28,087	1	28,0869	26,1570	< 0,001	1,00	***
B: Tiempo (h)	14,827	1	14,8269	13,8081	0,0002	0,53	***
C: Tamaño de partícula (µm)	5,472	1	5,4724	5,0964	0,0243	0,19	*
AB	0,386	1	0,3857	0,3592	0,5491	0,01	ns
AC	1,492	1	1,4919	1,3894	0,2389	0,05	ns
BC	11,668	1	11,6679	10,8661	0,0010	0,41	**
ABC	0,004	1	0,0039	0,0036	0,9522	0,00	ns
Error	781,712	728	1,0738			27,73	
Total	2 819,049	839				100,00	

Nota. SC: suma de cuadrados; gl: grados de libertad; CM: cuadrado medio. A: temperatura de secado; B: tiempo de secado; C: tamaño de partícula; AB, AC y BC: interacciones dobles; ABC: interacción triple. La contribución porcentual se calculó como la razón entre la suma de cuadrados de cada fuente y la suma de cuadrados total, y se presenta redondeada a dos decimales, por lo que su suma puede diferir de 100 % en la última cifra; descontada la variabilidad del panelista, el arreglo factorial explica el 7,34 % y el error el 92,66 %. $R^2 = 0,7227$; R^2 ajustado = 0,6804; coeficiente de variación experimental = 16,28 %. Valores p exactos: $2,10 \times 10^{-141}$ para el panelista, $4,03 \times 10^{-7}$ para la temperatura, $2,18 \times 10^{-4}$ para el tiempo y $1,03 \times 10^{-3}$ para la interacción BC. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns: no significativo.

El efecto de bloque resultó altamente significativo ($F = 17,6891$; $p < 0,001$) y explicó por sí solo el 70,07 % de la variabilidad total, lo que confirma que el criterio del evaluador constituye la principal fuente de variación en la percepción olfativa. Del arreglo factorial resultaron significativos la temperatura de secado ($F = 26,1570$; $p < 0,001$), el tiempo de

secado ($F = 13,8081$; $p = 0,0002$), el tamaño de partícula ($F = 5,0964$; $p = 0,0243$) y la interacción entre tiempo y tamaño ($F = 10,8661$; $p = 0,0010$). La interacción triple presentó el menor efecto registrado en toda la evaluación sensorial ($F = 0,0036$; $p = 0,9522$), con una contribución prácticamente nula. En conjunto el arreglo factorial explicó el 2,20 % de la variabilidad, con un coeficiente de variación experimental de 16,28 %.

La prueba de Levene rechazó la homogeneidad de varianzas ($F = 2,1639$; $p = 0,0353$), con una heterogeneidad reducida: la razón entre la mayor y la menor desviación estándar fue de 1,41, equivalente a una razón de varianzas de 1,98, valor con el que el estadístico F conserva su nivel nominal en un diseño balanceado como este, con 105 observaciones por tratamiento. La prueba de Shapiro-Wilk rechazó también la normalidad de los residuales ($W = 0,9551$; $p < 0,001$), resultado esperable con 840 observaciones y con una escala acotada entre 1 y 10 puntos que trunca las colas de la distribución; el rechazo no se debe a la discretización de las respuestas, pues el panel empleó 84 valores distintos, y la distribución es prácticamente simétrica, con una asimetría de $-0,03$ y una curtosis en exceso de 1,84, es decir, colas algo más pesadas que las de una distribución normal, conforme muestran los Anexos 20 y 21.

Ambos procedimientos de respaldo confirmaron las conclusiones. La prueba de Friedman detectó diferencias altamente significativas entre tratamientos ($\chi^2 = 91,5090$; $gl = 7$; $p < 0,001$) y el análisis de varianza por permutaciones dentro de bloque, presentado en el Anexo 22, coincidió con el procedimiento paramétrico en los siete efectos del modelo, con valores de probabilidad que difirieron en menos de 0,005. Los resultados del análisis de varianza se consideran, por tanto, estadísticamente válidos.

4.5.2.2. Efecto de los factores

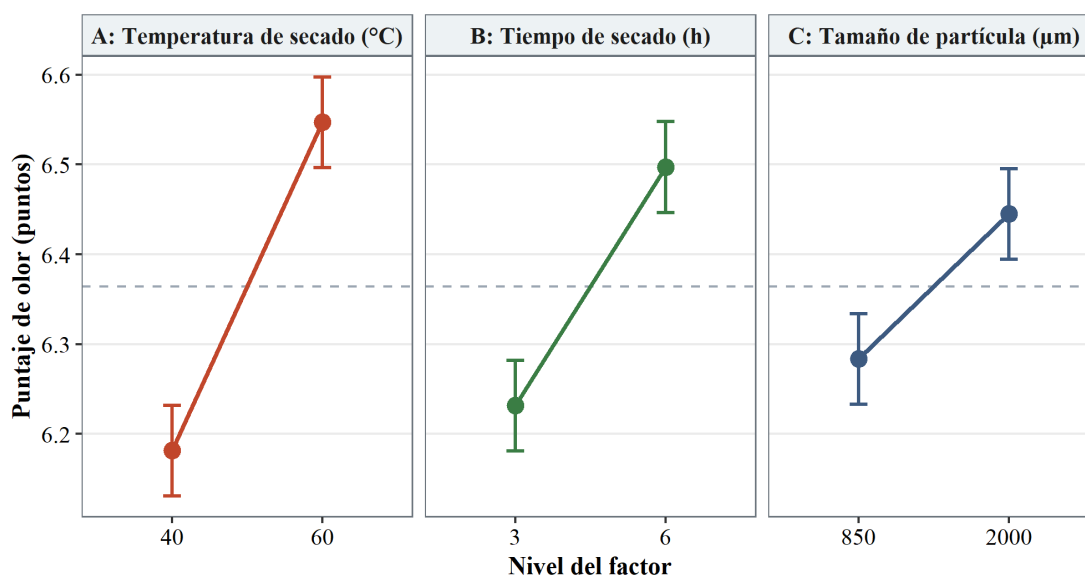
La temperatura de secado fue el efecto experimental de mayor incidencia, con una contribución de 1,00 % a la variabilidad total: las infusiones secadas a 60 °C alcanzaron 6,55 puntos frente a 6,18 puntos de las secadas a 40 °C, diferencia de 0,37 puntos. El tiempo de secado aportó el 0,53 %, con medias de 6,23 y 6,50 puntos para 3 y 6 h, y el tamaño de partícula el 0,19 %, con 6,28 y 6,45 puntos para 850 y 2000 μm . Al no resultar significativa ninguna interacción que involucre a la temperatura, su efecto puede interpretarse de forma directa: el análisis de efectos simples confirma que la diferencia a

favor de los 60 °C fue significativa en las cuatro condiciones evaluadas, con valores comprendidos entre 0,281 y 0,450 puntos.

El tiempo de secado y el tamaño de partícula, en cambio, deben interpretarse conjuntamente, dado que su interacción resultó significativa y aportó el 0,41 % de la variabilidad, la mayor entre las dobles. Los efectos simples, presentados en el Anexo 23, precisan el patrón: la prolongación del secado de 3 a 6 h mejoró el puntaje en 0,501 puntos con molienda fina ($p < 0,001$) y no produjo efecto alguno con molienda gruesa (0,030 puntos; $p = 0,7668$); de forma complementaria, la molienda gruesa superó a la fina en 0,397 puntos con 3 h de secado ($p < 0,001$) y no se diferenció de ella con 6 h (−0,074 puntos; $p = 0,4628$). Ambos factores actúan, por tanto, sobre la misma deficiencia, pues la combinación de secado corto con molienda fina fue la peor valorada del diseño y basta prolongar el secado o engrosar la molienda para corregirla, sin que aplicar ambas medidas a la vez aporte una mejora adicional. La interacción triple, de efecto prácticamente nulo, confirma que este patrón se mantiene en los dos niveles de temperatura.

Figura 20

Efectos principales de la temperatura de secado, el tiempo de secado y el tamaño de partícula sobre la aceptabilidad del olor de la infusión filtrante de ratania



Nota. Cada punto representa la media de 420 evaluaciones y las barras verticales el error estándar de la media, de 0,051 puntos. La línea horizontal discontinua corresponde a la media general del atributo, de 6,36 puntos. Elaboración propia.

4.5.2.3. Comparación de tratamientos

La prueba de Tukey se aplicó sobre las ocho combinaciones empleando el cuadrado medio del error del modelo con bloque, con una diferencia mínima significativa resultante de 0,435 puntos. Los resultados se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 39

Comparación múltiple de las combinaciones experimentales para el atributo olor mediante la prueba de Tukey

Tratamiento	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Tamaño de partícula (µm)	Media ± DE	Grupo
T1	40	3	850	5,87 ± 2,19	a
T2	40	3	2000	6,19 ± 1,96	ab
T5	60	3	850	6,20 ± 1,78	ab
T4	40	6	2000	6,25 ± 1,77	abc
T3	40	6	850	6,42 ± 1,84	bc
T7	60	6	850	6,65 ± 1,56	c
T8	60	6	2000	6,67 ± 1,72	c
T6	60	3	2000	6,67 ± 1,67	c

Nota. Tratamientos ordenados de menor a mayor media. Las medias que comparten al menos una letra no presentan diferencias estadísticamente significativas según la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$). Diferencia mínima significativa = 0,435 puntos. Error estándar de cada media estimada = 0,101; gl = 728. DE: desviación estándar de las 105 evaluaciones. Elaboración propia.

La prueba formó tres grupos. T1 ocupa en solitario la letra a, con 5,87 puntos, y el grupo superior lo integran T7, T8 y T6, con 6,65, 6,67 y 6,67 puntos. De las 28 comparaciones por pares, diez resultaron significativas: los tres tratamientos del grupo superior superaron a T1, a T2 y a T5, con diferencias comprendidas entre 0,454 y 0,806 puntos, y T3 superó igualmente a T1 en 0,549 puntos ($p = 0,0034$). Otras tres comparaciones quedaron

próximas al límite de decisión, todas de T4 frente al grupo superior, con valores de probabilidad de 0,0669 a 0,1024.

El ordenamiento es coherente con los efectos detectados. Los tres tratamientos del grupo superior comparten el secado a 60 °C y ninguno combina el tiempo corto con la molienda fina, que es la condición desfavorable identificada por la interacción, mientras que los tres a los que superan corresponden todos a 3 h de secado. T5 ilustra el punto con claridad, pues pese a secarse a 60 °C no alcanza el grupo superior por combinar el tiempo corto con la molienda fina. La mayor diferencia del conjunto, de 0,806 puntos entre T6 y T1, equivale al 9,0 % de la amplitud de la escala y se aproxima sin alcanzarlos a los 0,9 puntos adoptados como diferencia mínima con relevancia práctica. El tratamiento T8 integra el grupo mejor valorado, sin diferenciarse de T6 ni de T7, de modo que el olor tampoco restringe su elección como condición óptima del proceso.

4.5.2.4. Discusión

El nivel de aceptación, comprendido entre el 58,7 % y el 66,7 % del valor máximo de la escala, resulta moderado frente al reportado para infusiones elaboradas con especies aromáticas. Ehoche et al. (2021) obtuvieron para el aroma una puntuación máxima de 6,07 puntos en una infusión de clavo de olor, equivalente al 86,7 % del máximo de su escala de 7 puntos, valor atribuible al elevado contenido de eugenol y otros volátiles característicos de dicha especie. La ratania, en cambio, es una raíz cuya fracción volátil es comparativamente pobre, dado que sus metabolitos predominantes son taninos, proantocianidinas y neolignanós, compuestos de escasa volatilidad y, por tanto, de limitada contribución al perfil aromático.

El efecto favorable de la temperatura constituye el hallazgo de mayor relevancia, por cuanto podría parecer contrario a la premisa de que el calor provoca la pérdida de compuestos volátiles. Thamkaew et al. (2021) documentan que elevar la temperatura de secado de 40 a 60 °C, precisamente el rango evaluado, redujo en hojas de albahaca el contenido de volátiles totales y el carácter fresco del aroma, a la vez que intensificó las notas especiadas, de heno, dulces, terrosas y amaderadas. Esa transformación del perfil, más que su empobrecimiento, explica el resultado obtenido, dado que las notas que se intensifican resultan congruentes con la naturaleza radicular de la ratania y, presumiblemente, más acordes con lo que el panel espera de una infusión de raíz. Los

mismos autores señalan que el efecto de la temperatura no es unidireccional y documentan casos en los que su incremento elevó la concentración de determinados compuestos aromáticos, como en cedrón, cuya mayor concentración de volátiles se obtuvo a 50 °C frente a 30 y 40 °C.

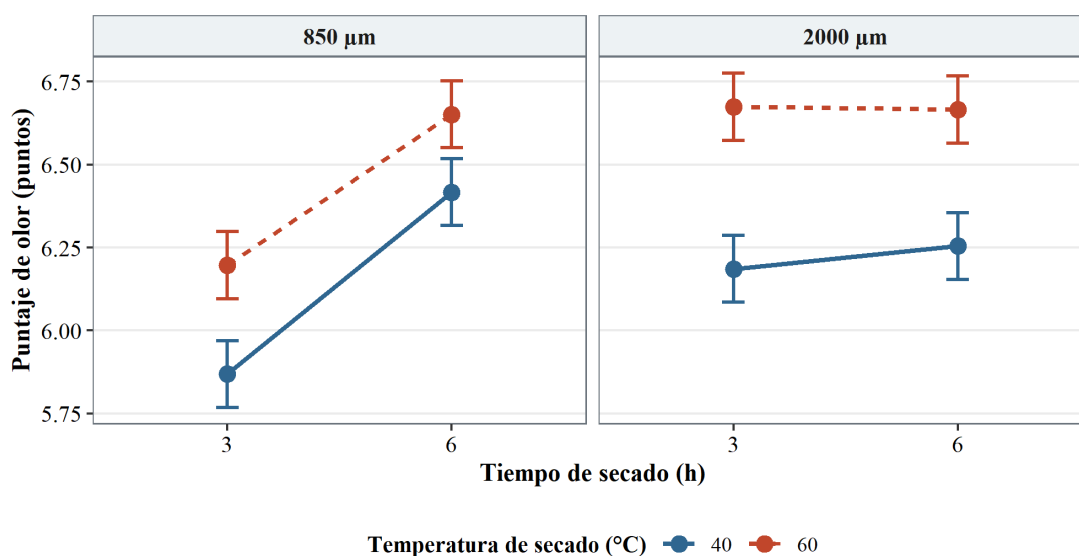
La interacción entre tiempo y granulometría admite una lectura tecnológica consistente: con secado corto el material conserva una fracción volátil menos estabilizada y, en esa condición, la molienda fina resulta penalizada por el panel al multiplicar la superficie expuesta, mientras que con secado prolongado el perfil aromático ya se ha estabilizado y la granulometría deja de diferenciarse. Esta lectura debe presentarse como interpretación y no como mecanismo demostrado, dado que el diseño no incluyó la determinación del perfil de volátiles. Lo que sí queda establecido es que la granulometría influye sobre el aroma únicamente cuando el secado es corto, comportamiento distinto del observado en los sólidos solubles totales, donde constituyó el factor de mayor incidencia, lo que confirma que cada respuesta evaluada obedece a mecanismos propios.

La magnitud de los coeficientes de variación resulta característica de los paneles de consumidores no entrenados y coherente con el carácter subjetivo de la evaluación olfativa, condicionada por la experiencia individual y por la memoria aromática de cada evaluador; en esta línea, Tannuri et al. (2026) determinaron que la percepción sensorial de infusiones herbales varía principalmente en función del sexo de los panelistas y de sus hábitos previos de consumo. Resulta destacable que los tratamientos mejor valorados presentaran los menores coeficientes de variación, lo que indica que las condiciones de secado más intensas no solo elevaron la puntuación media del aroma, sino que generaron mayor consenso entre los evaluadores.

El mejor desempeño de los tratamientos secados a 60 °C concuerda con lo observado por Thamkaew et al. (2021), quienes documentaron que el incremento de la temperatura de secado reduce el contenido total de volátiles, pero incrementa la proporción de notas especiadas, terrosas y amaderadas, perfil más afín a las expectativas del consumidor para una infusión de raíz.

Figura 21

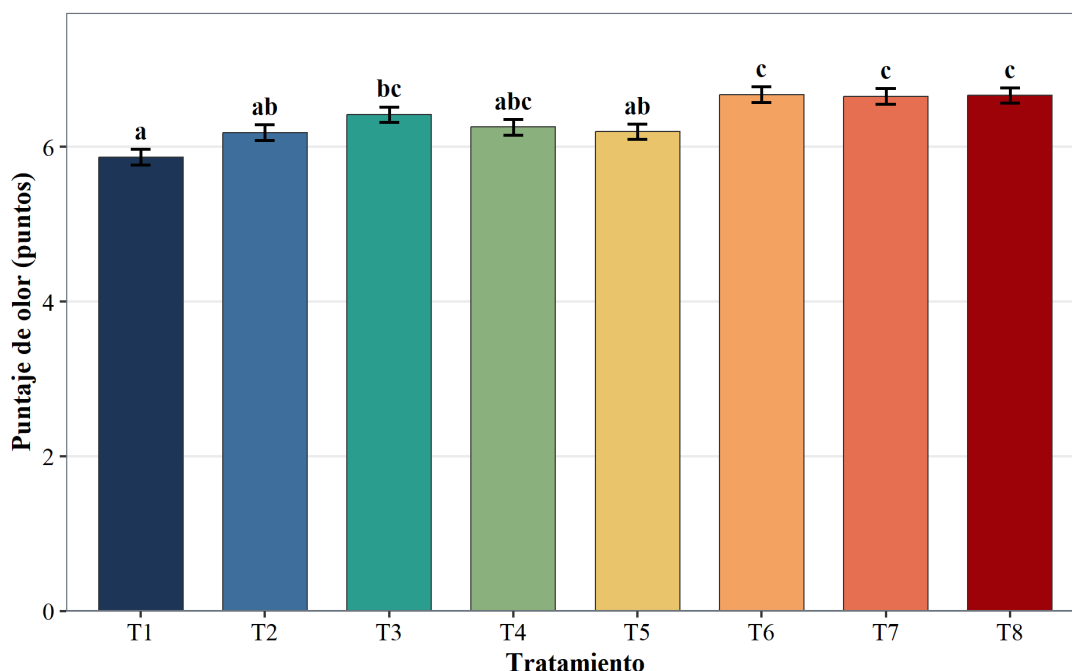
Interacción de los factores sobre la aceptabilidad del olor de la infusión filtrante de ratania



Nota. Los paneles corresponden a los tamaños de partícula de 850 y 2000 µm. La línea continua representa el secado a 40 °C y la discontinua el de 60 °C. Cada punto es la media de 105 evaluaciones y las barras verticales indican el error estándar de la media, de 0,101 puntos. Que ambas líneas asciendan de 3 a 6 h en el panel de 850 µm y permanezcan horizontales en el de 2000 µm corresponde a la interacción entre tiempo y tamaño de partícula, mientras que la separación sostenida entre ambas líneas en los dos paneles refleja el efecto de la temperatura, independiente de los demás factores. Elaboración propia.

Figura 22

Puntaje medio de aceptabilidad del olor según tratamiento



Nota. Las barras representan la media de las 105 evaluaciones de cada tratamiento y las barras verticales el error estándar de la media, de 0,101 puntos. Las letras corresponden a los grupos de la prueba de Tukey; los tratamientos que comparten al menos una letra no difieren entre sí ($\alpha = 0,05$). Elaboración propia.

4.5.3. Evaluación del atributo Sabor

El sabor es, entre los atributos evaluados, el que con mayor peso determina la aceptación final de una infusión filtrante, por cuanto integra las sensaciones gustativas y trigeminales que aportan los compuestos extraídos durante la infusión. En la ratania esta percepción está dominada por su elevado contenido de taninos condensados, responsables de la astringencia característica de la especie, de modo que cualquier condición de proceso que modifique su extracción debería reflejarse en la respuesta del panel.

Tabla 40*Puntajes del atributo sabor de las infusiones filtrantes de Krameria lappacea*

Tratamiento	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Tamaño de partícula (µm)	Puntaje de sabor (media ± DE)	CV (%)
T1	40	3	850	3,98 ± 1,96	49,23
T2	40	3	2000	4,47 ± 1,78	39,78
T3	40	6	850	4,64 ± 2,09	45,15
T4	40	6	2000	4,66 ± 1,82	39,04
T5	60	3	850	5,06 ± 2,09	41,31
T6	60	3	2000	5,69 ± 2,26	39,69
T7	60	6	850	4,79 ± 2,22	46,33
T8	60	6	2000	5,46 ± 2,10	38,41

Nota. Media ± desviación estándar de las evaluaciones de 105 panelistas (n = 105 por tratamiento). CV: coeficiente de variación. La media general del atributo fue de 4,84 puntos. Elaboración propia.

Las puntuaciones medias oscilaron entre 3,98 y 5,69 puntos, correspondientes a T1 y T6, con una media general de 4,84 puntos y una amplitud de 1,71 puntos, magnitud que evidencia una diferenciación entre tratamientos considerablemente mayor que la observada en color y en olor. Siete de los ocho tratamientos se situaron por debajo del punto medio de la escala y únicamente T6 lo superó, de modo que las puntuaciones se ubicaron entre el 39,8 % y el 56,9 % de su valor máximo. El ordenamiento muestra un patrón nítido asociado a la temperatura, pues los cuatro tratamientos secados a 60 °C, con valores entre 4,79 y 5,69 puntos, superaron a los cuatro secados a 40 °C, comprendidos entre 3,98 y 4,66 puntos, sin que ninguno de un grupo se solape con el otro. Los coeficientes de variación, de 38,41 % a 49,23 %, resultaron superiores a los registrados en los atributos anteriores.

4.5.3.1. Análisis de varianza

Con la finalidad de verificar la pertinencia del bloqueo se ajustaron y compararon ambos modelos, cuya comparación se presenta en la tabla siguiente.

Tabla 41*Ajuste del modelo con panelista como bloque para el atributo sabor*

Aspecto	Modelo con bloque
Grados de libertad del error	728
Suma de cuadrados del error	1 518,678
Cuadrado medio del error	2,0861
R ² del modelo	0,5899
Coefficiente de variación experimental (%)	29,83
Efectos significativos	Panelista, A, C, AB y AC

Nota. El panelista concentró el 53,00 % de la variabilidad total del atributo. Elaboración propia.

La incorporación del bloque redujo el cuadrado medio del error a la mitad y elevó el coeficiente de determinación hasta 0,5899, frente al 0,0598 que se habría alcanzado sin él, dejando entonces más del 94 % de la variabilidad confundida dentro del error experimental. Los tres efectos ya significativos se refuerzan y aparece uno adicional, la interacción entre temperatura y tamaño de partícula, que pasa de $p = 0,1584$ a $p = 0,0459$. Los resultados reportados corresponden al modelo con bloque.

Tabla 42*Análisis de varianza en bloques completos al azar del atributo sabor*

Fuente	SC	gl	CM	F	p	Contribución (%)	Sig.
Panelista (bloque)	1 962,554	104	18,8707	9,0459	< 0,001	53,00	***
A: Temperatura (°C)	138,511	1	138,5110	66,3972	< 0,001	3,74	***
B: Tiempo (h)	1,674	1	1,6741	0,8025	0,3706	0,05	ns
C: Tamaño de partícula (µm)	43,475	1	43,4753	20,8405	< 0,001	1,17	***
AB	23,971	1	23,9710	11,4908	0,0007	0,65	***
AC	8,340	1	8,3401	3,9979	0,0459	0,23	*
BC	2,253	1	2,2527	1,0799	0,2991	0,06	ns
ABC	3,357	1	3,3567	1,6091	0,2050	0,09	ns
Error	1 518,678	728	2,0861			41,01	
Total	3 702,813	839				100,00	

Nota. SC: suma de cuadrados; gl: grados de libertad; CM: cuadrado medio. A: temperatura de secado; B: tiempo de secado; C: tamaño de partícula; AB, AC y BC: interacciones dobles; ABC: interacción triple. La contribución porcentual se calculó como la razón entre la suma de cuadrados de cada fuente y la suma de cuadrados total, por lo que la columna suma 100 %; descontada la variabilidad del panelista, el arreglo factorial explica el 12,73 % y el error el 87,27 %. $R^2 = 0,5899$; R^2 ajustado = 0,5273; coeficiente de variación experimental = 29,83 %. Valores p exactos: $1,43 \times 10^{-78}$ para el panelista, $1,61 \times 10^{-15}$ para la temperatura, $5,86 \times 10^{-6}$ para el tamaño de partícula y $7,37 \times 10^{-4}$ para la interacción AB. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns: no significativo.

El efecto de bloque resultó altamente significativo ($F = 9,0459$; $p < 0,001$) y explicó el 53,00 % de la variabilidad total, la menor proporción de los atributos evaluados hasta aquí, lo que indica que en el sabor las condiciones de proceso pesan más frente al criterio individual que en color y en olor. Del arreglo factorial resultaron significativos la temperatura de secado ($F = 66,3972$; $p < 0,001$), el tamaño de partícula ($F = 20,8405$; $p < 0,001$), la interacción entre temperatura y tiempo ($F = 11,4908$; $p = 0,0007$) y la

interacción entre temperatura y tamaño ($F = 3,9979$; $p = 0,0459$). El tiempo de secado como factor principal no alcanzó significancia y fue el efecto de menor magnitud del modelo. En conjunto el arreglo factorial explicó el 5,98 % de la variabilidad, con un coeficiente de variación experimental de 29,83 %, el más alto registrado hasta aquí, lo que refleja que el sabor fue el atributo sobre el que el panel mostró mayor desacuerdo, comportamiento coherente con un producto de perfil astringente en el que la tolerancia individual varía de manera considerable.

La prueba de Levene confirmó la homogeneidad de varianzas entre las ocho combinaciones experimentales ($F = 1,4417$; $p = 0,1851$), único atributo en el que este supuesto se cumple. La prueba de Shapiro-Wilk rechazó, en cambio, la normalidad de los residuales ($W = 0,9765$; $p < 0,001$), resultado esperable con 840 observaciones y con una escala acotada entre 1 y 10 puntos que trunca las colas de la distribución; el rechazo no se debe a la discretización de las respuestas, pues el panel empleó 89 valores distintos, y la distribución muestra una asimetría de 0,29 y una curtosis en exceso de 0,92, es decir, un sesgo leve hacia la derecha acompañado de colas algo más pesadas, producto de que unos pocos panelistas asignaron calificaciones extremas, conforme muestran los Anexos 24 y 25.

Ambos procedimientos de respaldo confirmaron las conclusiones. La prueba de Friedman detectó diferencias altamente significativas entre tratamientos ($\chi^2 = 146,8338$; $gl = 7$; $p < 0,001$) y el análisis de varianza por permutaciones dentro de bloque, presentado en el Anexo 26, coincidió con el procedimiento paramétrico en los siete efectos del modelo, con valores de probabilidad que difirieron en menos de 0,005. Los resultados del análisis de varianza se consideran, por tanto, estadísticamente válidos.

4.5.3.2. Efecto de los factores

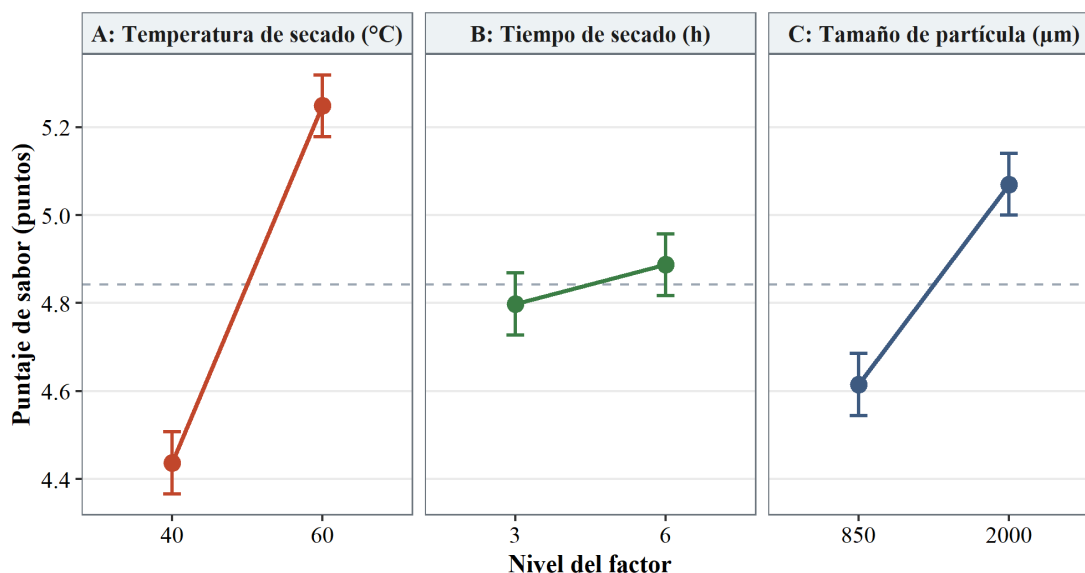
La temperatura de secado fue el efecto más contundente del modelo, con una contribución de 3,74 % a la variabilidad total: el secado a 60 °C produjo una media de 5,25 puntos frente a 4,44 puntos del secado a 40 °C, mejora de 0,81 puntos equivalente a un incremento del 18,3 % respecto del nivel bajo. El tamaño de partícula fue el segundo factor, con un 1,17 %, dado que la molienda gruesa alcanzó 5,07 puntos frente a 4,62 puntos de la fina, diferencia de 0,46 puntos. El tiempo de secado no ejerció efecto

significativo como factor principal, con una contribución de 0,05 % y medias casi idénticas de 4,80 y 4,89 puntos para 3 y 6 h.

Ambos factores significativos participan en interacciones, de modo que su lectura requiere precisión. La interacción entre temperatura y tiempo, con un 0,65 % de contribución, presenta un patrón cruzado: a 40 °C prolongar el secado de 3 a 6 h elevó el puntaje de 4,22 a 4,65 puntos (+0,427; $p = 0,0025$), mientras que a 60 °C el mismo cambio lo redujo de 5,37 a 5,12 puntos (−0,249; $p = 0,0782$). La interacción entre temperatura y tamaño, con un 0,23 %, indica que la ventaja de la molienda gruesa solo se manifiesta con secado a 60 °C, donde alcanzó 0,654 puntos ($p < 0,001$), y no a 40 °C, donde se redujo a 0,256 puntos ($p = 0,0701$). El efecto de la temperatura, por su parte, fue significativo en las cuatro condiciones evaluadas, aunque con magnitud variable, entre 0,474 puntos con 6 h de secado y 1,150 puntos con 3 h. Los resultados completos de los efectos simples se presentan en el Anexo 27.

Figura 23

Efectos principales de la temperatura de secado, el tiempo de secado y el tamaño de partícula sobre la aceptabilidad del sabor de la infusión filtrante de ratania



Nota. Cada punto representa la media de 420 evaluaciones y las barras verticales el error estándar de la media, de 0,070 puntos. La línea horizontal discontinua corresponde a la media general del atributo, de 4,84 puntos. Elaboración propia.

4.5.3.3. Comparación de tratamientos

La prueba de Tukey se aplicó sobre las ocho combinaciones empleando el cuadrado medio del error del modelo con bloque, con una diferencia mínima significativa resultante de 0,606 puntos. Los resultados se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 43

Comparación múltiple de las combinaciones experimentales para el atributo sabor mediante la prueba de Tukey

Tratamiento	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Tamaño de partícula (µm)	Media ± DE	Grupo
T1	40	3	850	3,98 ± 1,96	a
T2	40	3	2000	4,47 ± 1,78	ab
T3	40	6	850	4,64 ± 2,09	b
T4	40	6	2000	4,66 ± 1,82	b
T7	60	6	850	4,79 ± 2,22	b
T5	60	3	850	5,06 ± 2,09	bc
T8	60	6	2000	5,46 ± 2,10	cd
T6	60	3	2000	5,69 ± 2,26	d

Nota. Tratamientos ordenados de menor a mayor media. Las medias que comparten al menos una letra no presentan diferencias estadísticamente significativas según la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$). Diferencia mínima significativa = 0,606 puntos. Error estándar de cada media estimada = 0,141; gl = 728. DE: desviación estándar de las 105 evaluaciones. Elaboración propia.

La prueba formó cuatro grupos. T1 ocupa en solitario la letra a, con 3,98 puntos, y T6 la letra d, con 5,69 puntos. De las 28 comparaciones por pares, quince resultaron significativas, la mayor cantidad registrada hasta aquí. Las diferencias más amplias enfrentan a T6 y a T8 con los tratamientos secados a 40 °C, y alcanzan 1,709 puntos entre T6 y T1 ($p < 0,001$) y 1,483 puntos entre T8 y T1 ($p < 0,001$). Resulta relevante que dos comparaciones significativas se establezcan entre tratamientos secados ambos a 60 °C: T6 superó a T7 en 0,903 puntos ($p = 0,0002$) y T8 lo superó en 0,677 puntos ($p = 0,0164$),

diferencias atribuibles a la granulometría, dado que T7 es el único de los tres que emplea molienda fina.

La mayor diferencia del conjunto, de 1,709 puntos, equivale al 19,0 % de la amplitud de la escala y supera con holgura los 0,9 puntos adoptados como diferencia mínima con relevancia práctica en el cálculo del tamaño de panel, de modo que en este atributo las diferencias entre tratamientos no solo son estadísticamente demostrables sino relevantes en términos prácticos. T6 alcanzó la mayor media del conjunto y T8 comparte con él el grupo superior, sin diferencia significativa entre ambos, de 0,226 puntos. Desde la perspectiva del proceso, T6 emplea además el tiempo de secado más corto y la molienda gruesa, ambas condiciones de menor consumo energético.

4.5.3.4. Discusión

El nivel de aceptación, comprendido entre el 39,8 % y el 56,9 % del valor máximo de la escala, resulta notablemente inferior al reportado para infusiones herbales elaboradas con otras materias primas. Ehoche et al. (2021) obtuvieron para el sabor 5,92 puntos en una infusión de clavo de olor, equivalente al 84,6 % del máximo de su escala de 7 puntos, y Tannuri et al. (2026), en mezclas de infusiones herbales sudamericanas edulcoradas, registraron puntuaciones de 6,5 a 7,0 puntos para este atributo. La diferencia encuentra explicación en la composición química de la materia prima, específicamente en su elevado contenido de taninos y proantocianidinas, compuestos responsables de la sensación de astringencia.

El fundamento fisicoquímico de este comportamiento reside en la interacción de los taninos con las proteínas ricas en prolina presentes en la saliva. Soares et al. (2020) establecen que la astringencia y el amargor constituyen propiedades organolépticas directamente asociadas a los taninos, y que dicha sensación se origina en la precipitación de las glicoproteínas salivales, con la consiguiente reducción de la lubricación oral y la percepción de un tacto bucal seco y rugoso. En la corteza radicular de ratania, que concentra taninos en proporciones cercanas al 40 %, resulta esperable que la astringencia constituya el principal factor limitante de la aceptación del sabor.

El efecto del tamaño de partícula constituye el hallazgo de mayor relevancia del atributo. Al comparar los pares de tratamientos que compartían idénticas condiciones de secado, las formulaciones elaboradas con partícula de 2000 μm superaron a las de 850 μm en los

cuatro casos, sin excepción. Este patrón resulta coherente con el mecanismo de extracción sólido-líquido descrito por Farakte et al. (2016), quienes demostraron que la reducción del tamaño de partícula incrementa la superficie específica de contacto entre el material vegetal y el solvente, acelerando la cinética de extracción y elevando la concentración de compuestos solubles liberados al medio acuoso. La granulometría fina, al favorecer una mayor transferencia de taninos hacia la infusión, intensifica la astringencia percibida y deteriora la aceptación del sabor, mientras que la gruesa modera dicha extracción. Que el efecto solo alcance significancia con secado a 60 °C matiza la lectura, por cuanto la ventaja de la molienda gruesa se vuelve perceptible cuando las restantes condiciones ya favorecen la aceptación.

El sentido de este efecto merece atención particular porque resulta opuesto al observado en los sólidos solubles totales, parámetro en el cual la partícula fina maximizó los grados Brix. La divergencia no constituye una inconsistencia sino un resultado esperable, dado que una mayor extracción de sólidos implica también una mayor extracción de taninos, precisamente los compuestos que el panel penaliza. Se trata de un caso claro en el que el óptimo fisicoquímico y el óptimo sensorial no coinciden, y confirma empíricamente el compromiso tecnológico que fundamenta la presente investigación.

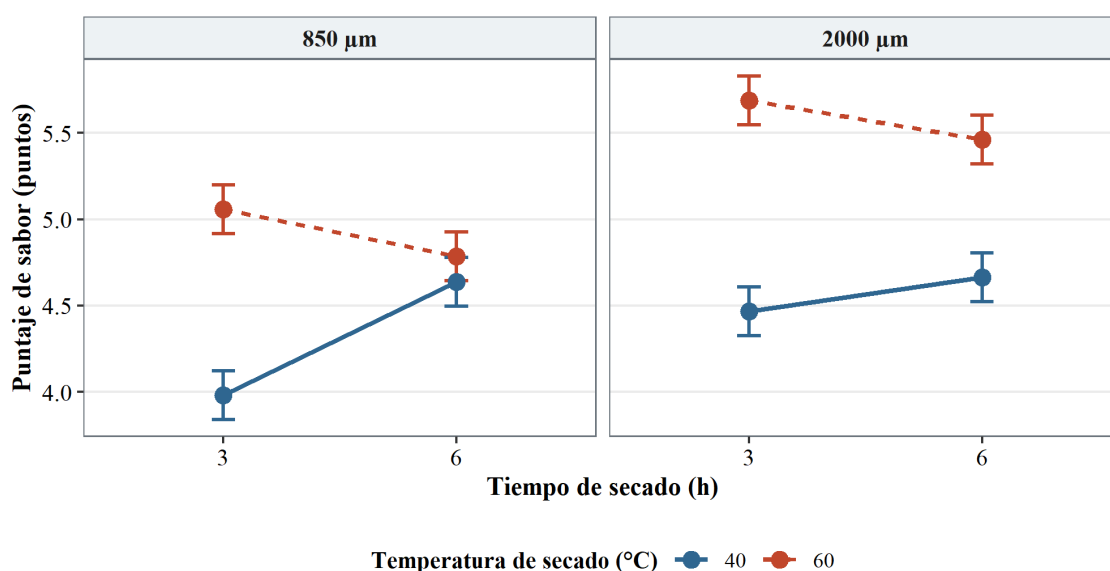
Respecto de la temperatura de secado, el efecto favorable del nivel de 60 °C podría atribuirse a que el secado más rápido reduce el tiempo durante el cual el material permanece húmedo y enzimáticamente activo, lo que limitaría las reacciones de oxidación de los polifenoles que generan notas amargas y astringentes adicionales; esta lectura debe presentarse como interpretación y no como mecanismo demostrado, y guarda coherencia con lo observado en el atributo olor, donde la temperatura favoreció igualmente al nivel de 60 °C. La elevada magnitud de los coeficientes de variación resulta característica de los atributos que suscitan respuestas polarizadas, en los cuales una fracción de los evaluadores acepta favorablemente la astringencia mientras otra la rechaza de manera marcada; en esta línea, Tannuri et al. (2026) determinaron que la percepción sensorial de infusiones herbales varía principalmente en función del sexo de los panelistas y de sus hábitos previos de consumo.

La preferencia del panel por los tratamientos secados a 60 °C con granulometría de 2000 μm responde a dos mecanismos que operan en momentos distintos del proceso. El tratamiento térmico más intenso promueve la condensación y polimerización de las

proantocianidinas hacia formas de mayor peso molecular, cuya capacidad de precipitar las glicoproteínas salivales resulta menor por unidad de masa, de modo que la astringencia percibida disminuye pese al incremento del contenido fenólico extraíble (Soares et al., 2020). La granulometría gruesa, por su parte, reduce la superficie específica disponible y modera la transferencia de taninos hacia la bebida durante los cinco minutos de infusión (Farakte et al., 2016). El resultado es que la concentración de compuestos bioactivos alcanzada en la materia prima no se traslada íntegramente a la taza, lo que desacopla la funcionalidad del producto de su penalización sensorial y explica que el tratamiento de mayor capacidad antioxidante no resultara el de menor aceptación.

Figura 24

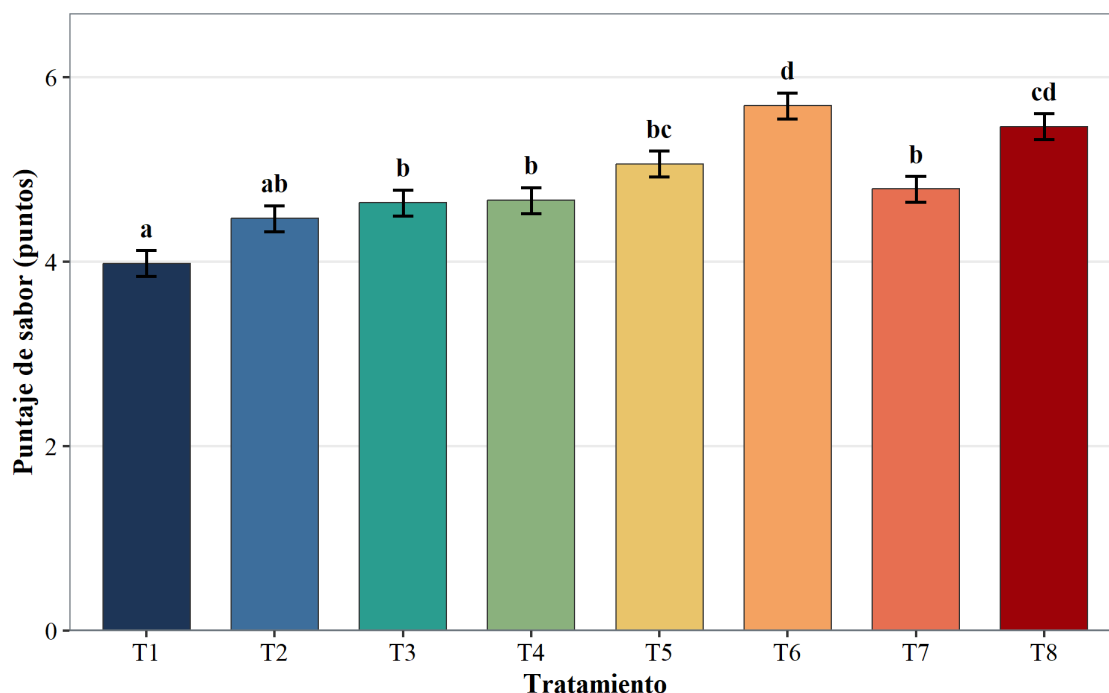
Interacción de los factores sobre la aceptabilidad del sabor de la infusión filtrante de ratania



Nota. Los paneles corresponden a los tamaños de partícula de 850 y 2000 µm. La línea continua representa el secado a 40 °C y la discontinua el de 60 °C. Cada punto es la media de 105 evaluaciones y las barras verticales indican el error estándar de la media, de 0,141 puntos. El cruce de las líneas dentro de cada panel corresponde a la interacción entre temperatura y tiempo, y la mayor separación entre ellas en el panel de 2000 µm a la interacción entre temperatura y tamaño de partícula. Elaboración propia.

Figura 25

Puntaje medio de aceptabilidad del sabor según tratamiento



Nota. Las barras representan la media de las 105 evaluaciones de cada tratamiento y las barras verticales el error estándar de la media, de 0,141 puntos. Las letras corresponden a los grupos de la prueba de Tukey; los tratamientos que comparten al menos una letra no difieren entre sí ($\alpha = 0,05$). Elaboración propia.

4.5.4. Evaluación del atributo Aceptabilidad general

La aceptabilidad general constituye el atributo de cierre de la evaluación sensorial, dado que integra en una sola respuesta la impresión conjunta que el consumidor forma a partir del color, el olor y el sabor. A diferencia de los anteriores, que aíslan una modalidad sensorial concreta, este indicador refleja la disposición global del panel hacia el producto y constituye el criterio sensorial de mayor peso para la selección del tratamiento óptimo.

Tabla 44*Puntajes de aceptabilidad general de las infusiones filtrantes de Krameria lappacea*

Tratamiento	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Tamaño de partícula (µm)	Puntaje de aceptabilidad (media ± DE)	CV (%)
T1	40	3	850	4,83 ± 1,86	38,61
T2	40	3	2000	5,22 ± 1,81	34,70
T3	40	6	850	5,51 ± 1,84	33,41
T4	40	6	2000	5,52 ± 1,86	33,64
T5	60	3	850	5,77 ± 1,70	29,39
T6	60	3	2000	6,37 ± 2,04	31,99
T7	60	6	850	5,76 ± 2,05	35,53
T8	60	6	2000	6,27 ± 2,03	32,43

Nota. Media ± desviación estándar de las evaluaciones de 105 panelistas (n = 105 por tratamiento). CV: coeficiente de variación. La media general del atributo fue de 5,66 puntos. Elaboración propia.

Las puntuaciones medias oscilaron entre 4,83 y 6,37 puntos, correspondientes a T1 y T6, con una media general de 5,66 puntos y una amplitud de 1,54 puntos, situándose entre el 48,3 % y el 63,7 % del valor máximo de la escala. Seis de los ocho tratamientos superaron el punto medio y solo T1 y T2 quedaron por debajo, de modo que ninguna de las combinaciones resultó rechazada de manera marcada por el panel. El ordenamiento vuelve a mostrar el patrón asociado a la temperatura, pues los cuatro tratamientos secados a 60 °C, con puntajes entre 5,76 y 6,37, superaron a los cuatro secados a 40 °C, comprendidos entre 4,83 y 5,52. Los coeficientes de variación, de 29,39 % a 38,61 %, se ubicaron por debajo de los registrados en el atributo sabor.

4.5.4.1. Análisis de varianza

Con la finalidad de verificar la pertinencia del bloqueo se ajustaron y compararon ambos modelos, cuya comparación se presenta en la tabla siguiente.

Tabla 45*Ajuste del modelo con panelista como bloque para la aceptabilidad general*

Aspecto	Modelo con bloque
Grados de libertad del error	728
Suma de cuadrados del error	963,528
Cuadrado medio del error	1,3235
R ² del modelo	0,6989
Coeficiente de variación experimental (%)	20,34
Efectos significativos	Panelista, A, B, C, AB y AC

Nota. El panelista concentró el 63,91 % de la variabilidad total del atributo. Elaboración propia.

El efecto del bloqueo resulta especialmente concluyente en este atributo. El coeficiente de determinación alcanzó 0,6989 frente al 0,0597 que se habría obtenido sin bloquear, de modo que sin el bloque se explicaría apenas el 6 % de la variabilidad frente al 70 % que explica el modelo en bloques, y dos efectos que sin bloque se habrían reportado como no significativos resultan significativos al controlarlo: el tiempo de secado, que pasa de $p = 0,0983$ a $p = 0,0064$, y la interacción entre temperatura y tamaño de partícula, que pasa de $p = 0,1774$ a $p = 0,0260$. Analizar estos datos sin bloquear por panelista habría llevado a subestimar el número de condiciones de proceso que influyen sobre la valoración global. Los resultados reportados corresponden al modelo con bloque.

Tabla 46*Análisis de varianza en bloques completos al azar del atributo aceptabilidad general*

Fuente	SC	gl	CM	F	p	Contribución (%)	Sig.
Panelista (bloque)	2 044,964	104	19,6631	14,8566	< 0,001	63,91	***
A: Temperatura (°C)	124,971	1	124,9714	94,4230	< 0,001	3,91	***
B: Tiempo (h)	9,902	1	9,9017	7,4813	0,0064	0,31	**
C: Tamaño de partícula (µm)	29,644	1	29,6439	22,3976	< 0,001	0,93	***
AB	15,964	1	15,9639	12,0616	0,0005	0,50	***
AC	6,590	1	6,5897	4,9789	0,0260	0,21	*
BC	2,882	1	2,8817	2,1773	0,1405	0,09	ns
ABC	1,115	1	1,1147	0,8422	0,3591	0,03	ns
Error	963,528	728	1,3235			30,11	
Total	3 199,559	839				100,00	

Nota. SC: suma de cuadrados; gl: grados de libertad; CM: cuadrado medio. A: temperatura de secado; B: tiempo de secado; C: tamaño de partícula; AB, AC y BC: interacciones dobles; ABC: interacción triple. La contribución porcentual se calculó como la razón entre la suma de cuadrados de cada fuente y la suma de cuadrados total, por lo que la columna suma 100 %; descontada la variabilidad del panelista, el arreglo factorial explica el 16,55 % y el error el 83,45 %. $R^2 = 0,6989$; R^2 ajustado = 0,6529; coeficiente de variación experimental = 20,34 %. Valores p exactos: $2,66 \times 10^{-123}$ para el panelista, $4,54 \times 10^{-21}$ para la temperatura, $2,66 \times 10^{-6}$ para el tamaño de partícula y $5,45 \times 10^{-4}$ para la interacción AB. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns: no significativo.

El efecto de bloque resultó altamente significativo ($F = 14,8566$; $p < 0,001$) y explicó el 63,91 % de la variabilidad total. Del arreglo factorial resultaron significativos cinco de los siete efectos: la temperatura de secado ($F = 94,4230$; $p < 0,001$), el tamaño de partícula

($F = 22,3976$; $p < 0,001$), la interacción entre temperatura y tiempo ($F = 12,0616$; $p = 0,0005$), el tiempo de secado ($F = 7,4813$; $p = 0,0064$) y la interacción entre temperatura y tamaño ($F = 4,9789$; $p = 0,0260$). Es el atributo en el que las condiciones de proceso se manifiestan de forma más extensa, con un arreglo factorial que explica el 5,97 % de la variabilidad total y el 16,55 % una vez descontado el panelista. El coeficiente de variación experimental fue de 20,34 %, sensiblemente menor al del sabor, lo que indica que el panel mostró mayor consenso al emitir un juicio global que al calificar el sabor de forma aislada.

La prueba de Levene rechazó la homogeneidad de varianzas ($F = 2,2063$; $p = 0,0318$), con la heterogeneidad más reducida de los cuatro atributos: la razón entre la mayor y la menor desviación estándar fue de 1,21, equivalente a una razón de varianzas de 1,45, valor con el que el estadístico F conserva su nivel nominal en un diseño balanceado como este. La prueba de Shapiro-Wilk rechazó también la normalidad de los residuales ($W = 0,9647$; $p < 0,001$), resultado esperable con 840 observaciones y con una escala acotada entre 1 y 10 puntos; el rechazo no se debe a la discretización de las respuestas, pues el panel empleó 86 valores distintos, y la distribución presenta una asimetría de $-0,12$ y una curtosis en exceso de $0,91$, es decir, un sesgo leve hacia la izquierda con colas algo más pesadas, conforme muestran los Anexos 28 y 29.

Ambos procedimientos de respaldo confirmaron las conclusiones. La prueba de Friedman detectó diferencias altamente significativas entre tratamientos ($\chi^2 = 182,2204$; $gl = 7$; $p < 0,001$), el valor más elevado de los cuatro atributos, y el análisis de varianza por permutaciones dentro de bloque, presentado en el Anexo 30, coincidió con el procedimiento paramétrico en los siete efectos del modelo, con valores de probabilidad que difirieron en menos de 0,003. Los resultados del análisis de varianza se consideran, por tanto, estadísticamente válidos.

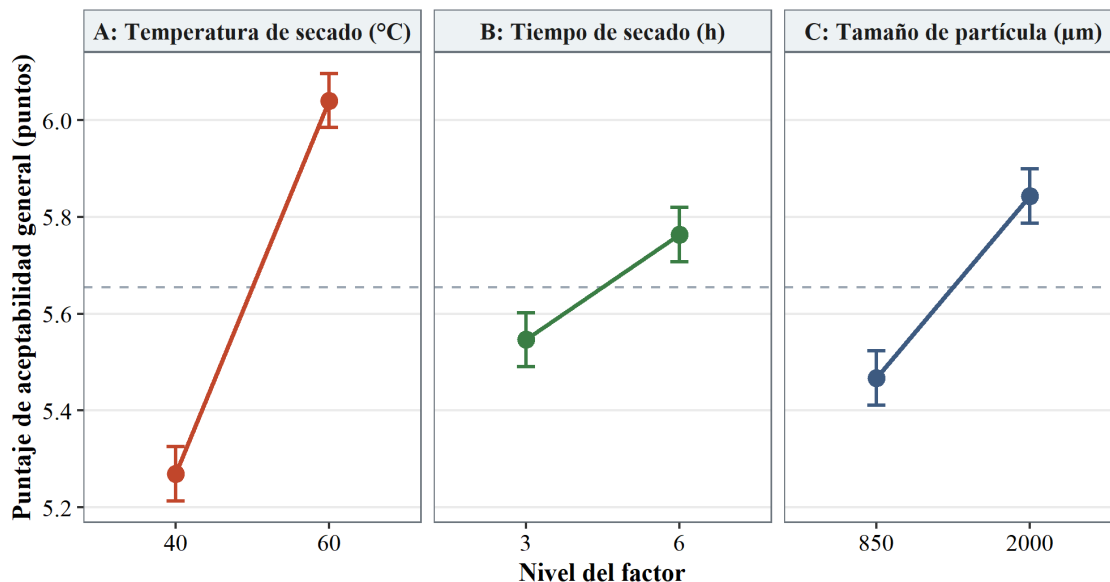
4.5.4.2. Efecto de los factores

La temperatura de secado fue el factor de mayor peso, con una contribución de 3,91 % a la variabilidad total: el secado a 60 °C produjo una media de 6,04 puntos frente a 5,27 puntos del secado a 40 °C, mejora de 0,77 puntos equivalente a un incremento del 14,6 %. El tamaño de partícula aportó el 0,93 %, con 5,84 puntos para la molienda gruesa frente a 5,47 puntos para la fina, y el tiempo de secado el 0,31 %, con 5,55 y 5,76 puntos para 3 y 6 h.

Los tres factores participan en interacciones significativas, de modo que ninguno admite una lectura aislada. La interacción entre temperatura y tiempo, con un 0,50 % de contribución, presenta un patrón convergente: a 40 °C prolongar el secado de 3 a 6 h elevó el puntaje de 5,02 a 5,52 puntos (+0,493; $p < 0,001$), mientras que a 60 °C lo dejó prácticamente invariable, pasando de 6,07 a 6,01 puntos ($-0,059$; $p = 0,6020$). La implicancia tecnológica es directa: cuando se seca a 60 °C, tres horas bastan para alcanzar la máxima aceptabilidad y duplicar el tiempo de operación no aporta beneficio sensorial alguno. La interacción entre temperatura y tamaño, con un 0,21 %, indica que la ventaja de la molienda gruesa solo resulta significativa a 60 °C, donde alcanzó 0,553 puntos ($p < 0,001$), y no a 40 °C, donde se redujo a 0,199 puntos ($p = 0,0774$), comportamiento idéntico al observado en el atributo sabor. El efecto de la temperatura fue significativo en las cuatro condiciones evaluadas, con magnitudes entre 0,496 y 1,047 puntos. Los resultados completos se presentan en el Anexo 31.

Figura 26

Efectos principales de la temperatura de secado, el tiempo de secado y el tamaño de partícula sobre la aceptabilidad general de la infusión filtrante de ratania



Nota. Cada punto representa la media de 420 evaluaciones y las barras verticales el error estándar de la media, de 0,056 puntos. La línea horizontal discontinua corresponde a la media general del atributo, de 5,66 puntos. Elaboración propia.

4.5.4.3. Comparación de tratamientos

La prueba de Tukey se aplicó sobre las ocho combinaciones empleando el cuadrado medio del error del modelo con bloque, con una diferencia mínima significativa resultante de 0,483 puntos. Los resultados se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 47

Comparación múltiple de las combinaciones experimentales para la aceptabilidad general mediante la prueba de Tukey

Tratamiento	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Tamaño de partícula (µm)	Media ± DE	Grupo
T1	40	3	850	4,83 ± 1,86	a
T2	40	3	2000	5,22 ± 1,81	ab
T3	40	6	850	5,51 ± 1,84	bc
T4	40	6	2000	5,52 ± 1,86	bc
T7	60	6	850	5,76 ± 2,05	c
T5	60	3	850	5,77 ± 1,70	c
T8	60	6	2000	6,27 ± 2,03	d
T6	60	3	2000	6,37 ± 2,04	d

Nota. Tratamientos ordenados de menor a mayor media. Las medias que comparten al menos una letra no presentan diferencias estadísticamente significativas según la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$). Diferencia mínima significativa = 0,483 puntos. Error estándar de cada media estimada = 0,112; gl = 728. DE: desviación estándar de las 105 evaluaciones. Elaboración propia.

La prueba formó cuatro grupos y detectó dieciocho comparaciones significativas de las 28 posibles, el mayor número de los cuatro atributos. En un extremo se ubica T1, con 4,83 puntos y letra a en solitario; en el otro, T6 y T8 integran el grupo superior con 6,37 y 6,27 puntos, sin diferenciarse entre sí. Las diferencias mayores enfrentan a esos dos tratamientos con T1 y T2, y alcanzan 1,540 puntos entre T6 y T1. Al igual que en el sabor, dos comparaciones significativas se establecen entre tratamientos secados ambos a 60 °C,

T6 frente a T7 con 0,611 puntos ($p = 0,0032$) y T8 frente a T7 con 0,509 puntos ($p = 0,0306$), diferencias atribuibles a la granulometría.

La mayor diferencia del conjunto, de 1,540 puntos, equivale al 17,1 % de la amplitud de la escala y supera con holgura los 0,9 puntos adoptados como diferencia mínima con relevancia práctica. La consecuencia para la selección de la condición óptima es que el análisis sensorial no distingue entre T6 y T8, separados por 0,103 puntos sin significancia estadística, de modo que la elección entre ambos debe sustentarse en los resultados fisicoquímicos y funcionales y en criterios de proceso, y no en la valoración del panel.

4.5.4.4. Discusión

Al situar este parámetro en el conjunto de la evaluación sensorial, su valor promedio de 5,66 puntos se ubica en posición intermedia, por debajo del color y del olor pero por encima del sabor. Esta jerarquía indica que la valoración global no constituye un promedio aritmético de los atributos individuales, sino el resultado de una ponderación en la que unos pesan más que otros.

El ordenamiento de los tratamientos permite identificar con precisión cuál gobierna esa ponderación. La jerarquía de las ocho combinaciones según su aceptabilidad general resultó idéntica, posición por posición, a la establecida para el sabor. El ordenamiento del color, en cambio, difirió sustancialmente, como evidencia T2, que ocupó la segunda posición más alta en dicho atributo y descendió a la segunda más baja en aceptabilidad general, y el del olor mostró coincidencias parciales, pero no una correspondencia completa, según ilustra T5, situado en tercera posición para el olor y en sexta para la aceptabilidad general. Esta correspondencia exacta entre el ordenamiento del sabor y el de la aceptabilidad general constituye evidencia directa de que el sabor operó como el atributo determinante de la valoración global del producto.

El hallazgo concuerda con lo documentado en la literatura sobre infusiones herbales, en la cual los atributos gustativos y aromáticos ejercen una influencia superior a la de los visuales sobre la preferencia del consumidor, de modo que, si bien los atributos visuales contribuyen a la percepción del producto, resultan secundarios frente al aroma y al sabor (Bimo et al., 2026). En la infusión de ratania dicha jerarquía adquiere especial relevancia por cuanto el sabor constituyó el atributo de menor puntuación, condicionado por la astringencia derivada del elevado contenido de taninos de la corteza radicular. Soares et

al. (2020) establecen que los taninos generan esa sensación mediante la precipitación de las glicoproteínas salivales y la consiguiente reducción de la lubricación oral, percepción que, conforme demuestran los resultados obtenidos, se traslada de manera directa a la valoración global.

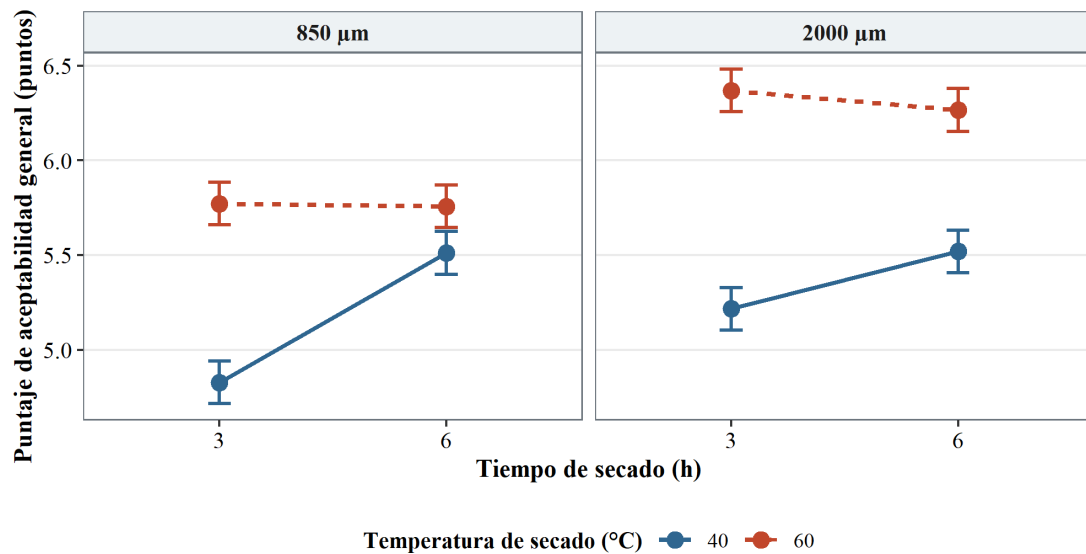
El nivel de aceptación alcanzado resulta moderado en comparación con el reportado para infusiones herbales elaboradas a partir de otras materias primas. Ehoche et al. (2021) obtuvieron para la aceptabilidad general 5,93 puntos en una infusión de clavo de olor, equivalente al 84,7 % del máximo de su escala de 7 puntos. El efecto del tamaño de partícula, por su parte, replica el registrado para el sabor y resulta coherente con el mecanismo de extracción sólido-líquido descrito por Farakte et al. (2016): la reducción del tamaño de partícula incrementa la superficie específica de contacto entre el material vegetal y el solvente y acelera la cinética de extracción, lo que en la ratania se traduce en una mayor concentración de taninos en la infusión y en una intensificación de la astringencia que deteriora tanto el sabor como la valoración global (Soares et al., 2020).

En cuanto a la temperatura de secado, el efecto favorable del nivel de 60 °C reproduce el observado de manera independiente en los atributos olor y sabor, así como en la capacidad antioxidante, donde dicho factor constituyó igualmente la mayor contribución a la variabilidad. Esta convergencia entre cuatro variables evaluadas de forma independiente confiere una notable consistencia al hallazgo. La magnitud de los coeficientes de variación, intermedia entre la registrada para el color y el olor y la correspondiente al sabor, resulta coherente con la naturaleza integradora del parámetro, que combina la relativa homogeneidad de la percepción visual con la marcada polarización de la respuesta gustativa; en esta línea, Tannuri et al. (2026) determinaron que la percepción sensorial de infusiones herbales varía principalmente en función del sexo de los panelistas y de sus hábitos previos de consumo.

Dado que el ordenamiento de los tratamientos en aceptabilidad general resultó idéntico posición por posición al del sabor, los mecanismos que explican la preferencia gustativa explican también la valoración global: la moderación de la astringencia mediante el tratamiento térmico intenso y la granulometría gruesa constituye el factor determinante de la aceptación del producto.

Figura 27

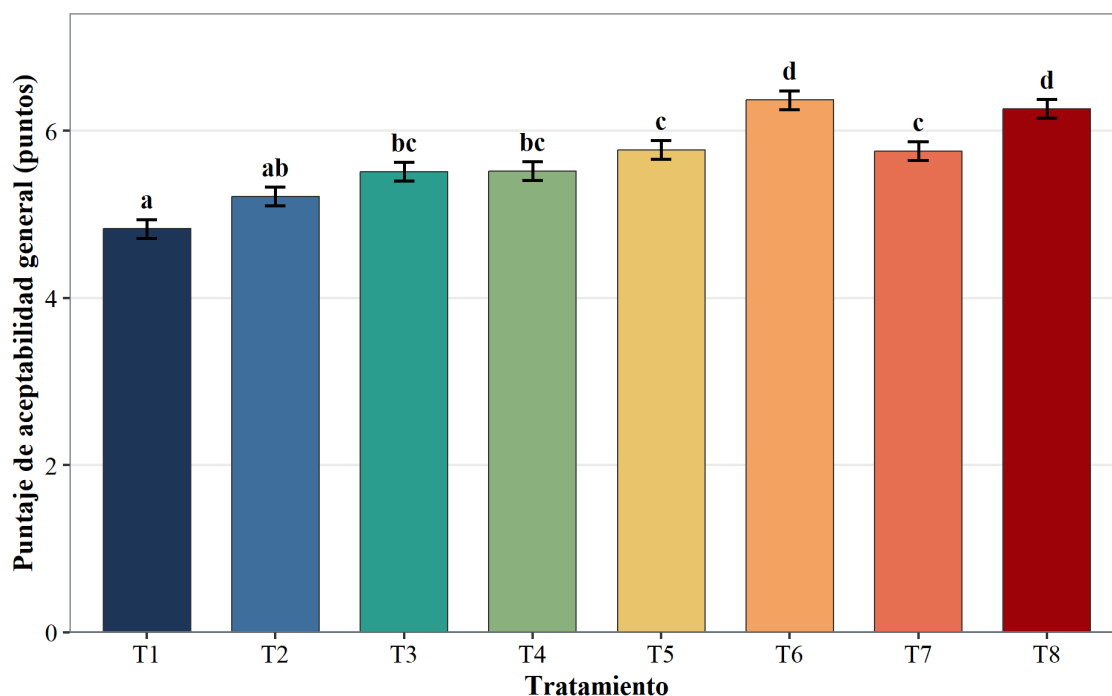
Interacción de los factores sobre la aceptabilidad general de la infusión filtrante de ratania



Nota. Los paneles corresponden a los tamaños de partícula de 850 y 2000 µm. La línea continua representa el secado a 40 °C y la discontinua el de 60 °C. Cada punto es la media de 105 evaluaciones y las barras verticales indican el error estándar de la media, de 0,112 puntos. El acercamiento entre ambas líneas al pasar de 3 a 6 h corresponde a la interacción entre temperatura y tiempo, y la mayor separación entre ellas en el panel de 2000 µm a la interacción entre temperatura y tamaño de partícula. Elaboración propia.

Figura 28

Puntaje medio de aceptabilidad general según tratamiento



Nota. Las barras representan la media de las 105 evaluaciones de cada tratamiento y las barras verticales el error estándar de la media, de 0,112 puntos. Las letras corresponden a los grupos de la prueba de Tukey; los tratamientos que comparten al menos una letra no difieren entre sí ($\alpha = 0,05$). Elaboración propia.

4.6. Determinación del tratamiento óptimo

Conforme al tercer objetivo específico de la presente investigación, la determinación del tratamiento óptimo se realizó mediante la evaluación conjunta de las respuestas fisicoquímicas, funcionales y sensoriales, sustentando la decisión exclusivamente en las diferencias que alcanzaron significancia estadística según la prueba de comparaciones múltiples.

Corresponde precisar el alcance con que interviene cada grupo de variables. Las propiedades fisicoquímicas de la infusión, correspondientes al pH, los sólidos solubles totales y la acidez titulable, se incorporan como criterios de conformidad, por cuanto describen la caracterización del producto y verifican su adecuación como bebida herbal, pero no admiten una dirección de preferencia definida: no existe un valor intrínsecamente

superior de pH o de acidez para una infusión de esta naturaleza. La capacidad antioxidante y los cuatro atributos sensoriales, en cambio, se incorporan como criterios de decisión, dado que en ellos una mayor magnitud expresa inequívocamente un mejor desempeño del producto (Fekete et al., 2025). La determinación del tratamiento óptimo se realizó, en consecuencia, en dos etapas: la verificación de la conformidad fisicoquímica de los tratamientos candidatos y la comparación de su desempeño funcional y sensorial.

4.6.1. Consolidación de los resultados por variable respuesta

En la tabla siguiente se presentan de manera consolidada los valores obtenidos por cada tratamiento en las cinco variables consideradas para la decisión, acompañados del grupo estadístico asignado por la prueba de Tukey en cada caso.

Tabla 48
Consolidación de los resultados funcionales y sensoriales de los ocho tratamientos

Tratamiento	Capacidad antioxidante ($\mu\text{mol ET/L}$)	Color	Olor	Sabor	Aceptabilidad general
T1	10 592,66 a	6,32 a	5,87 a	3,98 a	4,83 a
T2	10 332,96 a	6,96 bc	6,19 ab	4,47 ab	5,22 ab
T3	13 310,80 b	6,57 abc	6,42 bc	4,64 b	5,51 bc
T4	10 332,96 a	6,46 ab	6,25 abc	4,66 b	5,52 bc
T5	14 938,23 b	6,95 bc	6,20 ab	5,06 bc	5,77 c
T6	11 008,17 a	6,72 abc	6,67 c	5,69 d	6,37 d
T7	14 955,54 b	6,75 abc	6,65 c	4,79 b	5,76 c
T8	19 422,30 c	6,98 c	6,67 c	5,46 cd	6,27 d

Nota. Los valores sensoriales corresponden a la media de 105 evaluaciones por tratamiento en escala visual analógica de tipo hedónico con anclajes de 1 a 10 puntos. La letra que acompaña a cada valor corresponde al grupo asignado por la prueba de Tukey, aplicada de manera independiente a cada variable ($\alpha = 0,05$); dentro de una misma columna, los valores que comparten al menos una letra no presentan diferencias estadísticamente significativas. Elaboración propia.

La lectura conjunta de la tabla permite identificar dos tratamientos como candidatos a la condición óptima. El tratamiento T8, correspondiente a 60 °C, 6 h y 2000 µm, alcanzó la mayor capacidad antioxidante del diseño experimental, conformando por sí solo el grupo estadístico superior, y obtuvo además la puntuación más elevada en color, atributo en el que también ocupó en solitario el grupo superior, así como el grupo superior en olor. El tratamiento T6, correspondiente a 60 °C, 3 h y 2000 µm, obtuvo las puntuaciones más altas en sabor y en aceptabilidad general, integrando en ambos casos el grupo estadístico superior junto con T8.

Cabe destacar que ambos comparten dos de los tres niveles factoriales, la temperatura de secado de 60 °C y la granulometría de 2000 µm, difiriendo únicamente en el tiempo de secado. Esta coincidencia no es casual y refleja la convergencia de los resultados obtenidos a lo largo de la investigación: la temperatura elevada favoreció simultáneamente la capacidad antioxidante, el color, el olor, el sabor y la aceptabilidad general, mientras que la granulometría gruesa resultó determinante para la aceptación sensorial del producto.

4.6.2. Verificación de la conformidad fisicoquímica

Ambos tratamientos candidatos presentaron valores comprendidos dentro de los intervalos determinados para el conjunto del diseño experimental. El pH de 5,87 en T6 y de 5,97 en T8 se ubica en el extremo superior del rango observado, condición favorable para una infusión herbal por cuanto una acidez elevada acentuaría la percepción de astringencia. La acidez titulable, de 0,0187 y 0,0179 % p/v respectivamente, y los sólidos solubles totales, de 1,71 y 1,18 °Brix, se sitúan igualmente dentro de los intervalos característicos del producto. Ninguna de las tres variables presenta un valor que descalifique a alguno de los candidatos, por lo que ambos superan la etapa de conformidad y la decisión se traslada a las respuestas funcionales y sensoriales.

Tabla 49*Verificación de la conformidad fisicoquímica de los tratamientos candidatos*

Variable	T6 (60 °C, 3 h, 2000 µm)	T8 (60 °C, 6 h, 2000 µm)	Intervalo del diseño	Conformidad
pH	5,87 ± 0,04	5,97 ± 0,02	4,883 – 5,977	Ambos conformes
Sólidos solubles totales (°Brix)	1,71 ± 0,20	1,18 ± 0,17	1,177 – 2,207	Ambos conformes
Acidez titulable (% p/v)	0,0187 ± 0,0002	0,0179 ± 0,0002	0,01275 – 0,02221	Ambos conformes

Nota. Los valores corresponden a la media de tres repeticiones ± desviación estándar. El intervalo del diseño comprende los valores mínimo y máximo registrados entre los ocho tratamientos. Estas variables se evalúan como criterios de conformidad y no de maximización, por cuanto no admiten una dirección de preferencia definida para una infusión herbal. Elaboración propia.

4.6.3. Análisis del compromiso entre funcionalidad y aceptabilidad sensorial

La selección entre ambos candidatos exige contrastar de manera directa su desempeño en cada variable, verificando en qué casos las diferencias observadas alcanzan significancia estadística. Dicha comparación se presenta en la tabla siguiente.

Tabla 50*Comparación directa entre los tratamientos T6 y T8 en las variables de decisión*

Variable	T6 (60 °C, 3 h, 2000 µm)	T8 (60 °C, 6 h, 2000 µm)	Diferencia	¿Difieren estadísticamente?
Capacidad antioxidante (µmol ET/L)	11 008,17 (a)	19 422,30 (c)	+8 414,13 a favor de T8	Sí
Color	6,72 (abc)	6,98 (c)	+0,26 a favor de T8	No
Olor	6,67 (c)	6,67 (c)	+0,01 a favor de T6	No
Sabor	5,69 (d)	5,46 (cd)	+0,23 a favor de T6	No
Aceptabilidad general	6,37 (d)	6,27 (d)	+0,10 a favor de T6	No

Nota. Entre paréntesis se indica el grupo estadístico asignado por la prueba de Tukey en cada variable. Las diferencias mínimas significativas de la prueba de Tukey fueron de 0,514 puntos para color, 0,435 para olor, 0,606 para sabor y 0,483 para aceptabilidad general, de modo que ninguna de las diferencias sensoriales observadas alcanza el umbral de significancia. La significancia de la diferencia en capacidad antioxidante corresponde al análisis de efectos simples del factor tiempo de secado dentro de la condición de 60 °C y 2000 µm. Elaboración propia.

El contraste resulta inequívoco. En los cuatro atributos sensoriales evaluados, T6 y T8 comparten grupo estadístico, de modo que no existe evidencia que permita afirmar que uno sea sensorialmente superior al otro. Las diferencias observadas oscilan entre 0,01 y 0,26 puntos sobre una escala de diez, magnitudes inferiores a la mitad de las diferencias mínimas significativas establecidas por la prueba de Tukey en cada atributo, y también inferiores a los 0,9 puntos adoptados como diferencia mínima con relevancia práctica en el cálculo del tamaño de panel. En el atributo olor, de hecho, ambos tratamientos obtuvieron puntuaciones prácticamente idénticas, separadas por 0,01 puntos.

En capacidad antioxidante, por el contrario, la diferencia es de 8 414,13 $\mu\text{mol ET/L}$, lo que representa un incremento del 76,4 % de T8 respecto de T6, y resultó altamente significativa. Esta magnitud constituye, además, la mayor diferencia atribuible al tiempo de secado registrada en todo el diseño experimental.

El origen de esta divergencia se encuentra en el mecanismo que gobierna cada respuesta. La prolongación del tiempo de secado a temperatura elevada favorece la inactivación completa de las enzimas oxidativas y la liberación progresiva de compuestos fenólicos ligados a la pared celular, fenómeno documentado por Babaei Rad et al. (2025), quienes explican que el calentamiento rompe los enlaces éster que mantienen dichos compuestos unidos a la matriz y los convierte en formas más simples y extraíbles. En matrices ricas en taninos, este efecto se ve reforzado por el incremento del contenido de taninos hidrolizables extraíbles reportado por Lim y Eom (2022). Sin embargo, este mismo incremento de compuestos fenólicos extraíbles no se tradujo en un deterioro sensorial perceptible, dado que la granulometría gruesa de 2000 μm modera la transferencia de taninos hacia la infusión durante la preparación de la bebida (Farakte et al., 2016), limitando la intensificación de la astringencia que penaliza el panel (Soares et al., 2020).

Dicho de otro modo, el compromiso entre eficacia funcional y aceptabilidad sensorial que fundamenta la presente investigación encuentra resolución práctica en el tratamiento T8: la mayor concentración de compuestos bioactivos generada por el secado prolongado a 60 °C se conserva en la materia prima, mientras que la granulometría gruesa evita que dicha concentración se traduzca en una extracción excesiva de compuestos astringentes durante la infusión.

4.6.4. Selección del tratamiento óptimo

Sobre la base del análisis precedente, se determina el tratamiento T8, correspondiente a una temperatura de secado de 60 °C, un tiempo de secado de 6 h y un tamaño de partícula de 2000 μm , como la condición óptima de proceso para la elaboración de la infusión filtrante de *Krameria lappacea*.

El fundamento de esta decisión reside en que no existe evidencia estadística de que ningún otro tratamiento resulte sensorialmente superior a T8 en ninguno de los cuatro atributos evaluados, mientras que sí existe evidencia de que T8 posee una capacidad antioxidante significativamente mayor que la totalidad de las restantes combinaciones. En

consecuencia, la selección se sustenta en la única dimensión en la que se registraron diferencias significativas concluyentes, sin sacrificar desempeño sensorial alguno que pueda demostrarse estadísticamente.

Corresponde reconocer, no obstante, un argumento en favor del tratamiento T6: al emplear un tiempo de secado de 3 h en lugar de 6 h, supone un menor consumo energético en la operación de secado. Este criterio, considerado en el apartado metodológico como elemento de desempate ante equivalencia estadística, no resulta aplicable en el presente caso, precisamente porque la equivalencia no se verifica en la totalidad de las respuestas evaluadas. Un ahorro en el tiempo de operación no compensa una reducción del 43,3 % en la capacidad antioxidante del producto, que constituye su atributo funcional distintivo y el fundamento de su posicionamiento como alimento funcional.

La condición seleccionada presenta, además, un desempeño destacable en términos absolutos. Con 19 422,30 $\mu\text{mol ET/L}$, equivalentes a 19,42 mmol de Trolox por litro, la infusión obtenida bajo el tratamiento T8 se sitúa en la porción superior del intervalo determinado por Jiménez-Zamora et al. (2016) para 36 plantas tradicionalmente consumidas como infusión, alcanzando un orden de magnitud comparable al del té verde, reconocido como la infusión más antioxidante de dicho estudio, y supera ampliamente los valores de 7,26 a 9,54 mM de Trolox por litro reportados por Jakubczyk et al. (2024) para té matcha comerciales.

En el plano sensorial, el tratamiento T8 alcanzó 6,98 puntos en color, la puntuación más elevada del diseño y única integrante del grupo estadístico superior de dicho atributo; 6,67 puntos en olor, integrando el grupo superior; 5,46 puntos en sabor; y 6,27 puntos en aceptabilidad general, situándose igualmente en el grupo estadístico superior de este último atributo. La totalidad de estos valores se ubica por encima del punto medio de la escala, salvo el sabor, cuya moderada valoración constituye una limitación inherente a la naturaleza tánica de la materia prima y no un defecto atribuible a las condiciones de proceso seleccionadas.

Desde la perspectiva de la ingeniería de proceso, la condición óptima incorpora la granulometría de 2000 μm , la cual exige un menor consumo energético en la operación de molienda y genera una menor proporción de finos, reduciendo el riesgo de turbidez en la bebida y de paso de partículas a través del material filtrante (ISO, 2011). Este aspecto

compensa parcialmente el mayor requerimiento energético asociado al tiempo de secado prolongado.

Cabe señalar, asimismo, que el rendimiento del proceso no constituyó un criterio de selección, por cuanto responde principalmente a la distribución granulométrica generada durante la molienda y no a las propiedades del producto obtenido. En cualquier caso, los tratamientos T8 y T6 presentaron rendimientos prácticamente equivalentes, de 9,28 % y 9,38 % respectivamente, de modo que su consideración no habría modificado la decisión adoptada.

Finalmente, resulta pertinente señalar que la limitación sensorial identificada en el atributo sabor, común a la totalidad de los tratamientos evaluados, no constituye un obstáculo insalvable para la viabilidad comercial del producto. La literatura documenta que la formulación de mezclas con especies aromáticas o el empleo de edulcorantes naturales permite elevar de manera sustancial la aceptación de infusiones herbales; Tannuri et al. (2026) alcanzaron puntuaciones de 6,5 a 7,0 puntos para el atributo sabor en mezclas de infusiones sudamericanas edulcoradas con esteviósido. Esta constituye, por tanto, una línea de desarrollo recomendable para trabajos futuros orientados a la optimización sensorial del producto sin comprometer su elevada funcionalidad antioxidante.

Con la finalidad de dimensionar la magnitud relativa de las diferencias entre ambos tratamientos, los valores obtenidos en cada variable se normalizaron como porcentaje respecto del máximo registrado entre las ocho combinaciones evaluadas. Los resultados se presentan en la tabla siguiente y se representan gráficamente a continuación.

Tabla 51

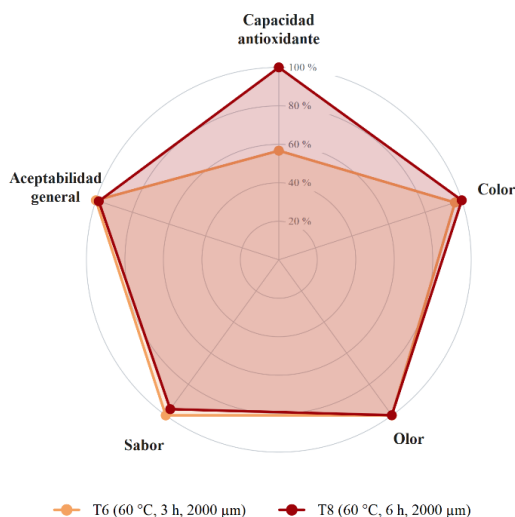
Valores normalizados de los tratamientos T6 y T8 respecto del máximo observado en cada variable

Variable	T6 (%)	T8 (%)	Diferencia (puntos porcentuales)
Capacidad antioxidante	56,7	100,0	43,3
Color	96,3	100,0	3,7
Olor	100,0	99,9	0,1
Sabor	100,0	96,0	4,0
Aceptabilidad general	100,0	98,4	1,6

Nota. Cada valor se expresa como porcentaje respecto del máximo registrado entre los ocho tratamientos evaluados en la variable correspondiente. La columna de diferencia se presenta en valor absoluto. Elaboración propia.

Figura 29

Perfil comparativo normalizado de los tratamientos T6 y T8 en las variables de decisión



Nota. Cada variable se expresa como porcentaje respecto del valor máximo observado entre los ocho tratamientos. La superposición de ambos perfiles en los cuatro ejes sensoriales refleja la equivalencia estadística verificada mediante la prueba de Tukey, mientras que la separación en el eje de capacidad antioxidante corresponde a la única diferencia estadísticamente significativa entre ambos tratamientos. Elaboración propia.

V. CONCLUSIONES

- La caracterización fisicoquímica de la materia prima determinó $11,16 \pm 0,08$ % de humedad, $3,85 \pm 0,78$ % de cenizas totales y $59,95 \pm 0,39$ % de fibra dietética total. Los tres valores resultaron conformes con los criterios de calidad establecidos para materiales vegetales medicinales, y el elevado contenido de fibra dietética se corresponde con la naturaleza leñosa y lignificada del tejido radicular de la especie.
- Se elaboró satisfactoriamente una infusión filtrante a base de raíz de *Krameria lappacea*, con un rendimiento global del proceso de 59,98 % a partir de un lote de 2,347 kg de materia prima, del cual se obtuvieron 699 unidades de 2 g.
- Las condiciones de secado y la granulometría modificaron significativamente las propiedades fisicoquímicas de la infusión. El pH osciló entre 4,883 y 5,977 unidades, con la totalidad de los efectos significativos y una contribución dominante de la interacción entre temperatura y tiempo de secado, del 35,58 %. Los sólidos solubles totales variaron entre 1,177 y 2,207 °Brix, con el tamaño de partícula como factor de mayor incidencia, del 36,24 %. La acidez titulable osciló entre 0,01275 y 0,02221 % p/v, explicada en un 65,87 % por la temperatura de secado, y las ocho combinaciones se ubicaron en grupos estadísticos distintos.
- La capacidad antioxidante de las infusiones osciló entre 10 332,96 y 19 422,30 $\mu\text{mol ET/L}$, con una variación cercana al 88 % entre los valores extremos. La temperatura de secado constituyó el factor determinante, con el 41,38 % de la variabilidad total ($p < 0,05$), seguida por el tiempo de secado y la interacción triple, con 20,72 % y 20,60 %. El secado a 60 °C incrementó sistemáticamente la capacidad antioxidante respecto del de 40 °C, comportamiento atribuible a la inactivación de las enzimas oxidativas y a la liberación de compuestos fenólicos ligados a la pared celular.
- La evaluación sensorial, realizada con 105 panelistas no entrenados, evidenció que el panelista constituyó la principal fuente de variación en los cuatro atributos, con contribuciones entre el 53,00 % y el 70,07 % de la variabilidad total, lo que confirmó la pertinencia de incorporarlo como factor de bloqueo. Las puntuaciones oscilaron entre 6,32 y 6,98 puntos en color, 5,87 y 6,67 en olor, 3,98 y 5,69 en

sabor, y 4,83 y 6,37 en aceptabilidad general; la temperatura de secado resultó significativa en los cuatro atributos y el tamaño de partícula en tres de ellos. El sabor constituyó el atributo de menor aceptación por efecto de la astringencia derivada del contenido tánico y gobernó la valoración global, dado que el ordenamiento de los tratamientos en aceptabilidad general resultó idéntico posición por posición al suyo. Se determinó que la reducción del tamaño de partícula incrementa la extracción de sólidos solubles, pero deteriora la aceptación sensorial, lo que confirma empíricamente el compromiso tecnológico entre eficacia extractiva y aceptabilidad que fundamentó la investigación.

- El tratamiento T8, correspondiente a 60 °C, 6 h y 2000 µm, se determinó como la condición óptima de proceso tras verificar la conformidad fisicoquímica de los candidatos y comparar su desempeño funcional y sensorial, por alcanzar la mayor capacidad antioxidante del diseño con superioridad estadísticamente significativa sobre la totalidad de las restantes combinaciones, sin que ningún otro tratamiento resultara sensorialmente superior en ninguno de los cuatro atributos. Su capacidad antioxidante de 19,42 mmol ET/L, comparable a la del té verde y superior a la reportada para té matcha comerciales, sitúa a *Krameria lappacea* como materia prima competitiva para el desarrollo de bebidas funcionales a partir de especies nativas peruanas.

VI. RECOMENDACIONES

- Evaluar la formulación de mezclas de la infusión de ratania con especies aromáticas o con edulcorantes naturales, tales como estevia, con el objeto de atenuar la astringencia y elevar la aceptación del atributo sabor, que constituyó la principal limitación sensorial del producto, sin comprometer su elevada capacidad antioxidante.
- Ampliar el rango de temperaturas de secado por encima de los 60 °C evaluados, dado que la tendencia observada sugiere que el óptimo funcional podría situarse en valores superiores, conforme a lo reportado en la literatura para otras matrices ricas en taninos.
- Determinar el contenido de fenoles totales mediante el método de Folin-Ciocalteu y complementar la evaluación de la capacidad antioxidante con los ensayos ABTS y FRAP, a fin de establecer correlaciones entre la composición fenólica y la actividad antioxidante de la infusión.
- Realizar estudios de vida útil y estabilidad del producto durante el almacenamiento, evaluando la evolución de la capacidad antioxidante, la humedad y la calidad microbiológica, aspectos no abordados en la presente investigación.
- Evaluar el aprovechamiento de la merma granulométrica, que representó entre el 26,79 % y el 37,77 % del material seco, mediante remolienda o su empleo en la obtención de extractos concentrados, con el propósito de elevar el rendimiento efectivo del proceso y reducir la presión de extracción sobre una especie catalogada como amenazada.
- Incorporar la determinación de parámetros microbiológicos y de residuos de metales pesados en el producto terminado, considerando que la materia prima procede de recolección silvestre en suelos andinos y que la literatura reporta la presencia de elementos traza potencialmente tóxicos en la raíz de la especie.
- Emplear paneles sensoriales entrenados en investigaciones posteriores, dado que la variabilidad atribuible al panelista, comprendida entre el 53,00 % y el 70,07 % de la variabilidad total, obligó a recurrir a un panel numeroso para alcanzar la

potencia estadística requerida; un panel entrenado permitiría detectar diferencias equivalentes con un número sustancialmente menor de evaluadores.

- Promover investigaciones orientadas a la propagación y el cultivo controlado de *Krameria lappacea*, considerando su condición de hemiparásita obligada y su estado de conservación amenazado, con el objeto de garantizar la sostenibilidad del abastecimiento de materia prima para su aprovechamiento agroindustrial.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdallah, N. A., Al-Haidari, R. A., Alsulaimany, M., & Simons, C. (2024). Utilization of azamacrocyclic ionophores as recognition elements for the potentiometric determination of gallic acid in various matrices. *Microchemical Journal*, 207, 111804. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.111804>
- Abdel-Gaber, R., Alamari, G., Dkhil, M. A., El-Ashram, S., Al-Hoshani, N., Al-Shaebi, E. M., & Al-Quraishy, S. (2025). *Krameria lappacea* roots extract to rescue coccidiosis-mediated inflammation in the jejunum of C57BL/6 mice. *Frontiers in Immunology*, 16, 1557235. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1557235>
- Abdel-Gaber, R., Alamari, G., Dkhil, M. A., Meryk, A., Al-Shaebi, E. M., & Al-Quraishy, S. (2024). *Krameria lappacea* root extract's anticoccidial properties and coordinated control of CD4 T cells for IL-10 production and antioxidant monitoring. *Frontiers in Immunology*, 15, 1404297. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1404297>
- Abdel-Gaber, R., Albeshr, M., Dkhil, M. A., Almohawis, N., Abdelmeguid, K. A., Delic, D., Al-Quraishy, S., & Al-Shaebi, E. M. (2025). Antibacterial activity of *Krameria lappacea* root extract against gram-positive and gram-negative bacteria and its cytotoxicity on lung and breast cancer cell lines. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1662564. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1662564>
- Alamari, G., Abdel-Gaber, R., Al-Shaebi, E. M., & Al-Quraishy, S. (2024). Anticoccidial and jejunum-protective effects of *Krameria lappacea* roots extract on experimental *Eimeria papillata* infection. *Microscopy Research and Technique*, 87(7), 1590-1601. <https://doi.org/10.1002/jemt.24531>
- Aldakheel, R. K., Gondal, M. A., Nasr, M. M., Dastageer, M. A., & Almessiere, M. A. (2021). Quantitative elemental analysis of nutritional, hazardous and pharmacologically active elements in medicinal Rhatany root using laser induced breakdown spectroscopy. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(2), 102919. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.102919>

- Alkatib, H., Abdul., N., Chen, Y., Adnan, M., Amir, S., Roszko, M., Bryta, M., Kieliszek, M., Sasidharan, S. (2024). Exploring the ancient roots and modern global brews of tea and herbal beverages: A comprehensive review of origins, types, health benefits, market dynamics, and future trends. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/fsn3.4346>
- Al-Oqail, M. M. (2021). Anticancer efficacies of *Krameria lappacea* extracts against human breast cancer cell line (MCF-7): Role of oxidative stress and ROS generation. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 29(3), 244-251. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2021.01.008>
- Altyn, I., & Twarużek, M. (2020). Mycotoxin contamination Concerns of herbs and medicinal plants. *Toxins*, 12(3), 182. <https://doi.org/10.3390/toxins12030182>
- Arienzo, A., Gallo, V., Tomassetti, F., & Antonini, G. (2023). Implication of sodium hypochlorite as a sanitizer in ready-to-eat salad processing and advantages of the use of alternative rapid bacterial detection methods. *Foods*, 12(16), 3021. <https://doi.org/10.3390/foods12163021>
- Babaei Rad, S., Mumivand, H., Mollaei, S. *et al.* Effect of drying methods on phenolic compounds and antioxidant activity of *Capparis spinosa* L. fruits. *BMC Plant Biol* 25, 133 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06110-y>
- Bassi, P., Kumar, V., Kumar, S., Kaur, S., Gat, Y., & Majid, I. (2020). Importance and prior considerations for development and utilization of tea bags: A critical review. *Journal of Food Process Engineering*, 43(1), e13069. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13069>
- Beigi, M., Torki, M., & Khoshnevisan, B. (2025). Drying as a preservation strategy for medicinal plants: Physicochemical and functional outcomes for food and human health. *Food Chemistry Advances*, 6, 100962. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.100962>
- Benzie, I. F. F., & Wachtel-Galor, S. (Eds.). (2011). Herbal medicine: Biomolecular and clinical aspects (2nd ed.). CRC Press/Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/b10787>

- Bimo, I., Lebdayono, R., Sari, F., Ramadhani, A., Ahmi, H., Putri, D., Ifadah, R., Setiawati, A., Kamiliya, A., Abida, S., Ali, D., & Pranita, M. (2026). Sensory characteristics and consumer preference trends of rose tea: A systematic review. *BIO Web of Conferences*, 225, 06004. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202622506004>
- Brendler, T., Brinckmann, J., Daoust, M., He, H., Masé, G., Steffan, K., Williams, M. (2022). Suitability of botanical extracts as components of complex mixtures used in herbal tea infusions—challenges and opportunities. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.1013340>
- Brokamp, G., Dostert, N., Cáceres-H., F., & Weigend, M. (2012). Parasitism and haustorium anatomy of *Krameria lappacea* (Dombey) Burdet & B.B. Simpson (Krameriaceae), an endangered medicinal plant from the Andean deserts. *Journal of Arid Environments*, 83, 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.03.004>
- Calcina, Y., Cano, Z., Bravo, N. (2022). Evaluación etnobotánica de las plantas medicinales en el sector quechua del altiplano de Puno. <https://doi.org/10.26722/rpmi.2022.v7n4.689>
- Carbone, R., Caracciolo, G., D'Amico, M., Spina, D. (2025). Consumer Trends in the Herbal Tea Market: A Systematic Literature Review. <https://doi.org/10.1080/87559129.2025.2493224>
- Carini, M., Aldini, G., Orioli, M., & Maffei Facino, R. (2002). Antioxidant and photoprotective activity of a lipophilic extract containing neolignans from *Krameria triandra* roots. *Planta Medica*, 68(3), 193–197. <https://doi.org/10.1055/s-2002-23167>
- Cavanah, A., Robinson, L., Mattingly, M., Frugé, A. (2025). The Impact of Green Tea and Its Bioactive Compounds on Mood Disorder Symptomology and Brain Derived Neurotrophic Factor: A Systematic Review of Randomized Controlled Trials. <https://doi.org/10.3390/biomedicines13071656>
- Chatpreecha, R., Kuhakarn, C., Leowanawat, P., Reutrakul, V., & Soorukram, D. (2020). Bioinspired stereoselective synthesis of chiral 2,5-diaryl-3,4-

- dimethyltetrahydrofurans from unprotected 1,4-diarylbutane-1,4-diols. *Arkivoc*, 2020(6), 155-166. <https://doi.org/10.24820/ark.5550190.p011.276>
- Chen, Z.-M., & Lin, Z. (2015). Tea and human health: Biomedical functions of tea active components and current issues. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE B*, 16(2), 87-102. <https://doi.org/10.1631/jzus.B1500001>
- Corilla, D., Espinoza, G., Taipei, C., & Ventura, A. (2021). Planta procesadora de filtrantes (ecosan). *Polo del Conocimiento*, 6(8), 1177–1195. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/oaiart?codigo=8094474>
- Corroto, F., Gamarra Torres, O. A. & Macía, M. J. (2022). Understanding the Influence of Socioeconomic Variables on Medicinal Plant Knowledge in the Peruvian Andes. *Plants*, 11(20). <https://doi.org/10.3390/plants11202681>
- De Jesus, N. Z. T., de Souza Falcão, H., Gomes, I. F., de Almeida Leite, T. J., de Moraes Lima, G. R., Barbosa-Filho, J. M., Tavares, J. F., da Silva, M. S., de Athayde-Filho, P. F., & Batista, L. M. (2012). Tannins, peptic ulcers and related mechanisms. *International Journal of Molecular Sciences*, 13(3), 3203-3228. <https://doi.org/10.3390/ijms13033203>
- Deli, M., Ndjantou, E. B., Ngatchic Metsagang, J. T., Petit, J., Njintang Yanou, N., & Scher, J. (2019). Successive grinding and sieving as a new tool to fractionate polyphenols and antioxidants of plants powders: Application to *Boscia senegalensis* seeds, *Dichrostachys glomerata* fruits and *Hibiscus sabdariffa* calyx powders. *Food Science & Nutrition*, 7(5), 1795-1806. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1022>
- Dhekne, P. P., & Patwardhan, A. W. (2020). Mathematical modeling of tea bag infusion kinetics. *Journal of Food Engineering*, 274, 109847. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109847>
- Ehoche, E. E., Patel, P., Madu, C., & Adejoh, J. (2021). Formulation, Organoleptic Evaluation, and Acceptability of Various Teas from Underutilized Nutritious Herbs Compared with Marketed Chinese and Yellow Lipton Tea. *Borneo Journal of Pharmacy*, 4(1), 51–56. <https://doi.org/10.33084/bjop.v4i1.1817>

- ElGamal, R., Song, C., Rayan, A. M., Liu, C., Al-Rejaie, S., & ElMasry, G. (2023). Thermal degradation of bioactive compounds during drying process of horticultural and agronomic products: A comprehensive overview. *Agronomy*, 13(6), 1580. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061580>
- Etheridge, C. & Derbyshire, E. (2020). Herbal infusions and health: A review of findings from human studies, mechanisms and future research directions. <https://doi.org/10.1108/NFS-08-2019-0263>
- European Scientific Cooperative on Phytotherapy [ESCOP]. (2017). *Ratanhiae radix* (Rhatany root) [Monografia]. ESCOP Monographs. <https://www.escop.com/downloads/rhatany/>
- Farakte, R. A., Yadav, G., Joshi, B., Patwardhan, A. W., & Singh, G. (2016). Role of particle size in tea infusion process. *International Journal of Food Engineering*, 12(1), 1-16. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2015-0213>
- Fekete, M., Lehocski, A., Kryczyk-Poprawa, A., Zábó, V., Varga, J. T., Bálint, M., Fazekas-Pongor, V., Csípő, T., Rząsa-Duran, E., & Varga, P. (2025). Functional foods in modern nutrition science: Mechanisms, evidence, and public health implications. *Nutrients*, 17(13), 2153. <https://doi.org/10.3390/nu17132153>
- Gallia, M., Ferrari, A., Bajda, L., Bongiovanni, G. (2024). Antioxidant activity and phenolic content of herbal infusions from medicinal plants used in Argentina. *Food Prod Process and Nutr* 6, 45. <https://doi.org/10.1186/s43014-024-00224-w>
- Genovese C, D'Angeli F, Bellia F, Distefano A, Spampinato M, Attanasio F, Nicolosi D, Di Salvatore V, Tempera G, Lo Furno D, Mannino G, Milardo F, Li Volti G. (2021). In Vitro Antibacterial, Anti-Adhesive and Anti-Biofilm Activities of *Krameria lappacea* (Dombey) Burdet & B.B. Simpson Root Extract against Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus* Strains. *Antibiotics* (Basel). 13;10(4):428. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10040428>
- Granato, D., Zabetakis, I., Koidis, A. (2023). Sustainability, nutrition, and scientific advances of functional foods under the new EU and global legislation initiatives. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2023.105793>

- Heredia-Castro, P. Y., Tolano-Villaverde, I. J., Manzanarez-Quin, C. G., Osuna-Chávez, R. F., Ibarra-Zazueta, C., Sánchez-Villalba, E., Ramírez-Rodríguez, Y., González-Ríos, H., Hernández-Mendoza, A., & Vallejo-Cordoba, B. (2023). Phytochemical profile and antimicrobial activity of plant extracts against pathogenic microorganisms of importance to the livestock industry. *Agrociencia*, 57(4), 803-818. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i4.2496>
- Hough, G., Wakeling, I., Mucci, A., Chambers, E., IV, Gallardo, I. M., & Alves, L. R. (2006). Number of consumers necessary for sensory acceptability tests. *Food Quality and Preference*, 17(6), 522–526. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2005.07.002>
- Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (2021). *NTP 209.228:2021. Manzanilla en bolsas filtrantes. Requisitos*.
- International Organization for Standardization [ISO]. (2011). *ISO 11287:2011. Green tea — Definition and basic requirements*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:11287:ed-1:v1:en>
- International Organization for Standardization [ISO]. (2014). *Sensory analysis — Methodology — General guidance for conducting hedonic tests with consumers in a controlled area* (ISO 11136:2014). <https://www.iso.org/standard/50125.html>
- Islam, MZ, Cho, DK y Lee, YT (2020). Compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de la infusión de té preparada a partir de partes enteras y molidas de hierbas medicinales. *CyTA - Journal of Food*, 18 (1), 116–121. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1702104>
- Jäger, S., Beffert, M., Hoppe, K., Nadberezny, D., Frank, B., & Scheffler, A. (2011). Preparation of herbal tea as infusion or by maceration at room temperature using mistletoe tea as an example. *Scientia Pharmaceutica*, 79(1), 145-155. <https://doi.org/10.3797/scipharm.1006-06>
- Jakubczyk, K., Szymczykowska, K., Kika, J., Janda-Milczarek, K., Palma, J., Melkis, K., Alshekh, R., & Maciejewska-Markiewicz, D. (2024). Exploring the influence of origin, harvest time, and cultivation method on antioxidant capacity and bioactive

- compounds of matcha teas. *Foods*, 13(8), 1270.
<https://doi.org/10.3390/foods13081270>
- Jiménez-Zamora, A., Delgado-Andrade, C., & Rufián-Henares, J. A. (2016). Antioxidant capacity, total phenols and color profile during the storage of selected plants used for infusion. *Food Chemistry*, 199, 339–346.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.019>
- Khanbabaei, K., & van Ree, T. (2001). Tannins: Classification and definition. *Natural Product Reports*, 18(6), 641-649. <https://doi.org/10.1039/b101061l>
- Kor, L., Homewood, K., Dawson, T. P., & Diazgranados, M. (2021). Sustainability of wild plant use in the Andean Community of South America. *Ambio*, 50, 1681-1697. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01529-7>
- Kussmann, M., Abe Cunha, D. H. & Berciano, S. (2023). Bioactive compounds for human and planetary health. *Frontiers in Nutrition*, 10.
<https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1193848>
- Li, D., Zhang, Y., Tamura, R., Nakajima, T., Caballero, Y. (2023). Influence of Tea Leaf Particle Size on Catechin Extraction and Green Tea Sensory Acceptance.
<https://doi.org/10.4236/fns.2023.1411066>
- Lim, YJ, & Eom, SH (2022). Los diferentes factores que contribuyen a la actividad antioxidante en la pulpa y la cáscara de caqui astringente secadas térmicamente. *Antioxidants* , 11 (3), 597.
<https://doi.org/10.3390/antiox11030597>
- Liu, Y., Guo, C., Zang, E., Shi, R., Liu, Q., Zhang, M., Zhang, K., Li, M. (2023). Review on herbal tea as a functional food: classification, active compounds, biological activity, and industrial status. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2023.02.002>
- Liu, Y., Zhai, X., Ho, C.-T., & Wan, X. (2025). Guidelines for sensory evaluation of tea: Traditional Chinese method and quantitative descriptive analysis. *AgriFood: Journal of Agricultural Products for Food*. <https://doi.org/10.1002/agf2.70001>

- Mc Caughey Espinoza, D. M., Reyes Olivas, Á., Ayala Astorga, G. I., Lugo García, G. A., & Ochoa Meza, A. (2022). Evaluación del cosahui del sur (*Krameria erecta* Willd) en condiciones silvestres. *Idesia*, 40(1), 67-75. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292022000100067>
- Mc Caughey Espinoza, D. M., Reyes Olivas, Á., Ayala Astorga, G. I., Lugo García, G., & Ochoa Mesa, A. (2023). Producción y aclimatación de plántulas in vitro de *Krameria erecta* Willd. *Idesia*, 41(3), 25-33. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292023000300025>
- McCleary, B. V. (2023). Measurement of dietary fiber: Which AOAC official method of analysis to use. *Journal of AOAC International*, 106(4), 917-930. <https://doi.org/10.1093/jaoacint/qsad051>
- Mileo, A. M., & Miccadei, S. (2016). Polyphenols as modulator of oxidative stress in cancer disease: New therapeutic strategies. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2016, Artículo 6475624. <https://doi.org/10.1155/2016/6475624>
- Nickrent, D. L. (2020). Parasitic angiosperms: How often and how many? *Taxon*, 69(1), 5-27. <https://doi.org/10.1002/tax.12195>
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2006). Reglamento (CE) n.º 1924/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre de 2006, relativo a las declaraciones nutricionales y de propiedades saludables en los alimentos. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 404, 9-25. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=celex:32006R1924>
- Parohan, M., Anjom-Shoae, J., Nasiri, M., Khodadost, M., Khatibi, S. R., & Sadeghi, O. (2019). Dietary total antioxidant capacity and mortality from all causes, cardiovascular disease and cancer: A systematic review and dose-response meta-analysis of prospective cohort studies. *European Journal of Nutrition*, 58(6), 2175-2189. <https://doi.org/10.1007/s00394-019-01922-9>
- Rumpf, J., Burger, R., & Schulze, M. (2023). Statistical evaluation of DPPH, ABTS, FRAP, and Folin-Ciocalteu assays to assess the antioxidant capacity of lignins.

International Journal of Biological Macromolecules, 233, 123470.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123470>

Sadat, F., Mohammadi, A., Rostami, F., Savari, A., De la Torre, G., Spitz, J., Saeedi, R., Kalantarhormozi, M., Farhadi, A., Dobaradaran, S. (2023). Microplastics and phthalate esters release from teabags into tea drink: occurrence, human exposure, and health risks. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29726-9>

Safta, D. A., Ielciu, I., Șuștic, R., Hanganu, D., Niculae, M., Cenariu, M., Pall, E., Moldovan, M. L., Achim, M., & Bogdan, C. (2023). Chemical profile and biological effects of an herbal mixture for the development of an oil-in-water cream. *Plants*, 12(2), 248. <https://doi.org/10.3390/plants12020248>

Sarapura Escobar, S. & Hoddy, E. T. (2022). Safeguarding the land to secure food in the highlands of Peru: The case of Andean peasant producers. *Frontiers in Sustainable Food System*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.787600>

Scholz, E., & Rimpler, H. (1989). Proanthocyanidins from *Krameria triandra* root. *Planta Medica*, 55(4), 379–384. <https://doi.org/10.1055/s-2006-962032>

Senawong, K., Katekaew, S., Juntahum, S., & Laloon, K. (2023). Impact of grinding and sorting particle size on phytochemical yield in *Dipterocarpus alatus* leaf extract. *International Journal of Biomaterials*, 2023, 4512665. <https://doi.org/10.1155/2023/4512665>

Shaik, M., Hamdi, I., Sarbon, N. (2023). A comprehensive review on traditional herbal drinks: Physicochemical, phytochemicals and pharmacology properties <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100460>

Shirakawa, S., Matsushima, Y., Kajiyama, S., Suzuki, T., & Nagano, T. (2021). Effects of natural herb-containing dental toothpaste on periodontal pathogenic bacteria and clinical parameters: A randomized clinical trial. *Journal of Herbal Medicine*, 30, 100517. <https://doi.org/10.1016/j.hermed.2021.100517>

Silva-Ramírez, K. A., Álvarez-Bernal, D., Oregel-Zamudio, E., Guízar-González, C., & Medina-Medrano, J. R. (2020). Effect of Drying and Steeping Temperatures on

- the Phenolic Content, Antioxidant Activity, Aromatic Compounds and Sensory Properties of *Cunila polyantha* Benth. Infusions. Processes, 8(11), 1378. <https://doi.org/10.3390/pr8111378>
- Simpson, B. B. (1989). Krameriaceae. Flora Neotropica, Monograph 49, 1-109. New York Botanical Garden Press.
- Soares, S., Brandão, E., Guerreiro, C., Soares, S., Mateus, N., & de Freitas, V. (2020). Tannins in food: Insights into the molecular perception of astringency and bitter taste. *Molecules*, 25(11), 2590. <https://doi.org/10.3390/molecules25112590>
- Sosa-León, J. L., & Martínez-Zurita, M. (2023). Evaluación del tiempo de infusión de una bebida funcional a base de hojas de culén y menta edulcorado con steviósido. *Revista de Investigación Agropecuaria Science and Biotechnology*, 3(1), 1-10. <https://doi.org/10.25127/riagrop.20231.895>
- Suhana, M., Mhd, A., Hussin, N. (2021). Effects of polyphenols in tea (*Camellia sinensis* sp.) on the modulation of gut microbiota in human trials and animal studies. *Gastroenterology Insights*, 12(2), 202–216. <https://doi.org/10.3390/gastroent12020018>
- Tan, H. L., Ojukwu, M., Lee, L. X., & Mat Easa, A. (2023). Quality characteristics of green tea's infusion as influenced by brands and types of brewing water. *Heliyon*, 9(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12638>
- Tannuri, M. C., Giordano, P., Berent, C. B., Corvalan-Garcete, C., & Martina, P. F. (2026). Phytochemical characterization and sensory acceptability of sweet herbal tea blend I: Moringa, yerba mate, and chamomile. *Beverage Plant Research*, 6, e003. <https://doi.org/10.48130/bpr-0025-0033>
- Thaipong, K., Boonprakob, U., Crosby, K., Cisneros-Zevallos, L., & Byrne, D. H. (2006). Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19(6-7), 669–675. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2006.01.003>

- Thamkaew, G., Sjöholm, I., & Galindo, F. G. (2021). A review of drying methods for improving the quality of dried herbs. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(11), 1763-1786. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1765309>
- Vargas, C. V. (2012). *Elaborar té aromático a base de plantas cedrón y toronjil procesado con stevia, edulcorante natural, utilizando el método de deshidratación* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio Institucional UTC. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/913>
- Vela Cárdenas, V. G. (2012). *Obtención de infusión filtrante a partir del exocarpo de Myrciaria dubia (camu camu), proveniente del despulpado como sub producto* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. Repositorio Institucional UNAP. <http://repositorio.unapiquitos.edu.pe/handle/20.500.12737/1947>
- Vuong, Q. V., Pham, H. N. T., & Negus, C. (2022). From herbal teabag to infusion: Impact of brewing on polyphenols and antioxidant capacity. *Beverages*, 8(4), 81. <https://doi.org/10.3390/beverages8040081>
- Wang, H., Chen, Y., Wang, L., Liu, Q., Yang, S., Wang, C. (2023). Advancing herbal medicine: enhancing product quality and safety through robust quality control practices. <https://doi.org/10.3389/fphar.2023.1265178>
- World Health Organization [WHO]. (2011). *Quality control methods for herbal materials*. <https://iris.who.int/handle/10665/44479>
- Xiao, T., Li, Y., Li, H., Wang, K., Huang, J., Liu, Z., Zhu, M. (2024). Tea consumption in relation with metabolic syndrome and obesity: A systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104322>
- Zabka, M. (2022). Antifungal efficacy and convenience of *Krameria lappacea* for the development of botanical fungicides and new alternatives of antifungal treatment. *Agronomy*, 12(11), 2599. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112599>
- Zegarra, M. (2022). *Síntesis verde de catalizadores de oro para la obtención de ácido lactobionico* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María].

Repositorio

Institucional

UCSM.

<https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/12074>

VIII. ANEXOS

Anexo 1

*Ficha de evaluación sensorial de la infusión filtrante de Ratania (*Krameria lappacea*)*

NOMBRE: _____

FECHA: ____/____/2026

Por favor observe y deguste el producto que se le presenta y marque con una línea vertical sobre cualquier parte de la línea de acuerdo a su apreciación de aceptabilidad.

Siendo el número 1 el punto más bajo (Me disgusta mucho), 5,5 (No me gusta, ni me disgusta), 10 (Me gusta mucho)

NÚMERO DE MUESTRA:

COLOR



OLOR



SABOR



ACEPTABILIDAD GENERAL



NOMBRE: _____

FECHA: ____/____/2026

Por favor observe y deguste el producto que se le presenta y marque con una línea vertical sobre cualquier parte de la línea de acuerdo a su apreciación de aceptabilidad.

Siendo el número 1 el punto más bajo (Me disgusta mucho), 5,5 (No me gusta, ni me disgusta), 10 (Me gusta mucho)

NÚMERO DE MUESTRA:

COLOR



OLOR



SABOR



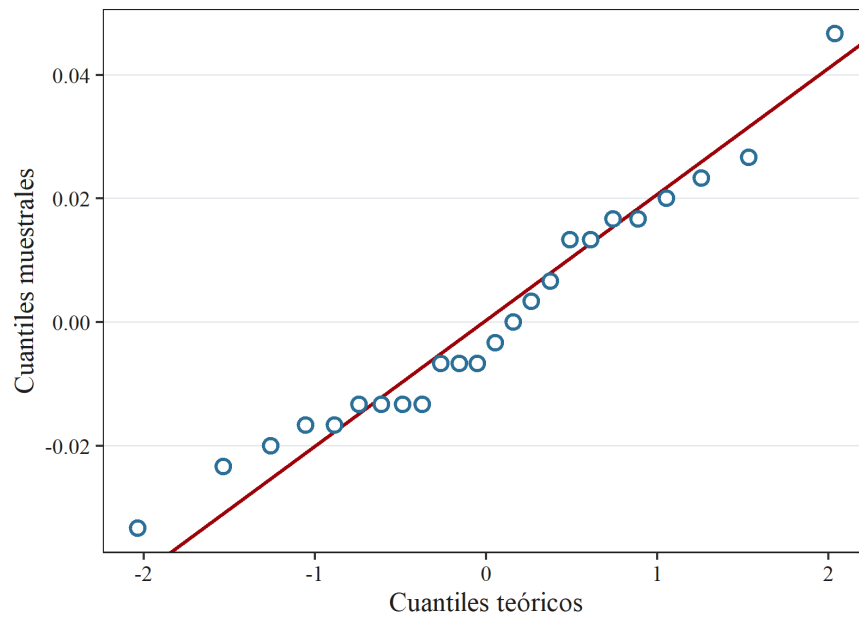
ACEPTABILIDAD GENERAL



Nota. Instrumento aplicado a los 105 evaluadores. Cada atributo se calificó sobre una línea continua de 9 cm anclada en 1 (Me disgusta mucho), 5,5 (No me gusta ni me disgusta) y 10 (Me gusta mucho). El valor asignado se obtuvo como 1 más la distancia en centímetros medida desde el extremo izquierdo con regla graduada milimetrada, y se registró con aproximación de 0,1 unidades. Cada evaluador valoró las ocho muestras codificadas en una misma sesión, en cabinas individuales y con agua sin gas entre muestras. Elaboración propia.

Anexo 2

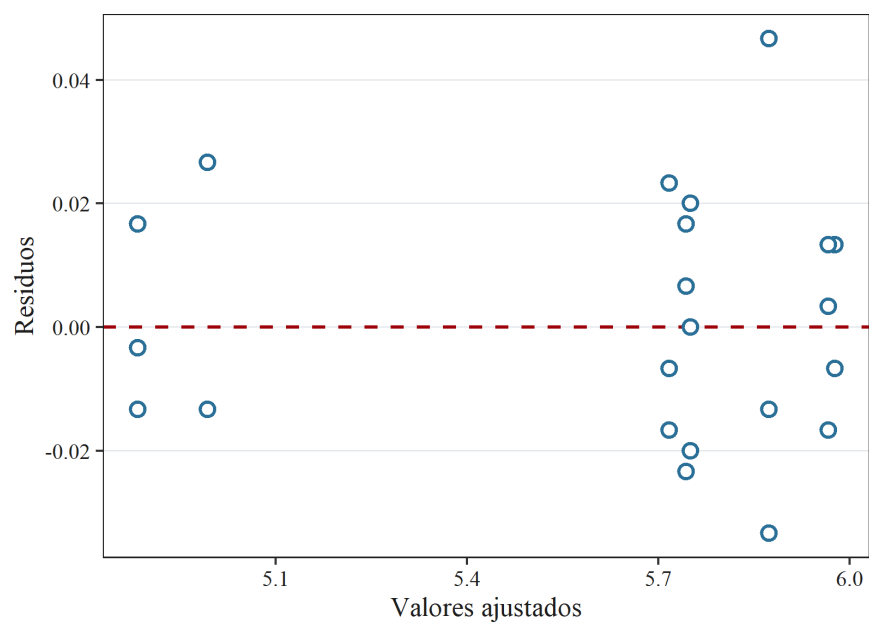
Gráfico cuantil-cuantil de los residuos del modelo del pH



Nota. La línea representa la distribución normal teórica de referencia.

Anexo 3

Residuos frente a valores ajustados del modelo del pH



Nota. La línea discontinua indica el valor cero.

Anexo 4

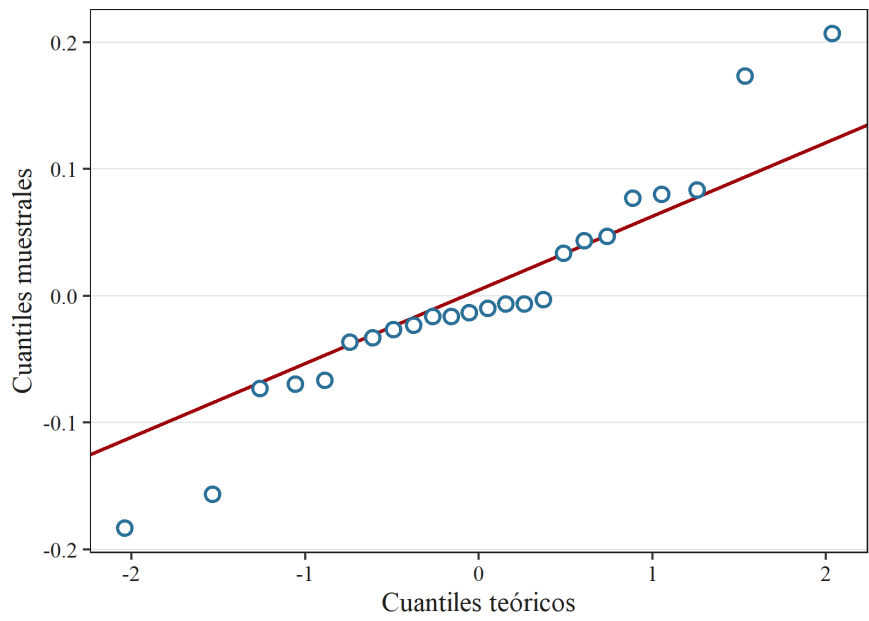
Efectos simples de los factores sobre el pH de la infusión filtrante

Comparación	Condición fijada	Diferencia	t	p	Sig.
40 °C vs. 60 °C	3 h; 850 µm	+0,007	0,359	0,7241	ns
40 °C vs. 60 °C	3 h; 2000 µm	+0,103	5,568	< 0,0001	***
40 °C vs. 60 °C	6 h; 850 µm	-0,723	-38,974	< 0,0001	***
40 °C vs. 60 °C	6 h; 2000 µm	-1,083	-58,372	< 0,0001	***
3 h vs. 6 h	40 °C; 850 µm	+0,757	40,770	< 0,0001	***
3 h vs. 6 h	40 °C; 2000 µm	+1,093	58,911	< 0,0001	***
3 h vs. 6 h	60 °C; 850 µm	+0,027	1,437	0,1700	ns
3 h vs. 6 h	60 °C; 2000 µm	-0,093	-5,029	0,0001	***
850 µm vs. 2000 µm	40 °C; 3 h	-0,227	-12,213	< 0,0001	***
850 µm vs. 2000 µm	40 °C; 6 h	+0,110	5,927	< 0,0001	***
850 µm vs. 2000 µm	60 °C; 3 h	-0,130	-7,005	< 0,0001	***
850 µm vs. 2000 µm	60 °C; 6 h	-0,250	-13,470	< 0,0001	***

Nota. Diferencias estimadas entre los niveles del primer factor manteniendo fijas las condiciones indicadas. Un valor positivo indica que el primer nivel presentó mayor pH. Error estándar de la diferencia = 0,0186; gl = 16. Ajuste de Tukey. *** $p < 0,001$; ns: no significativo.

Anexo 5

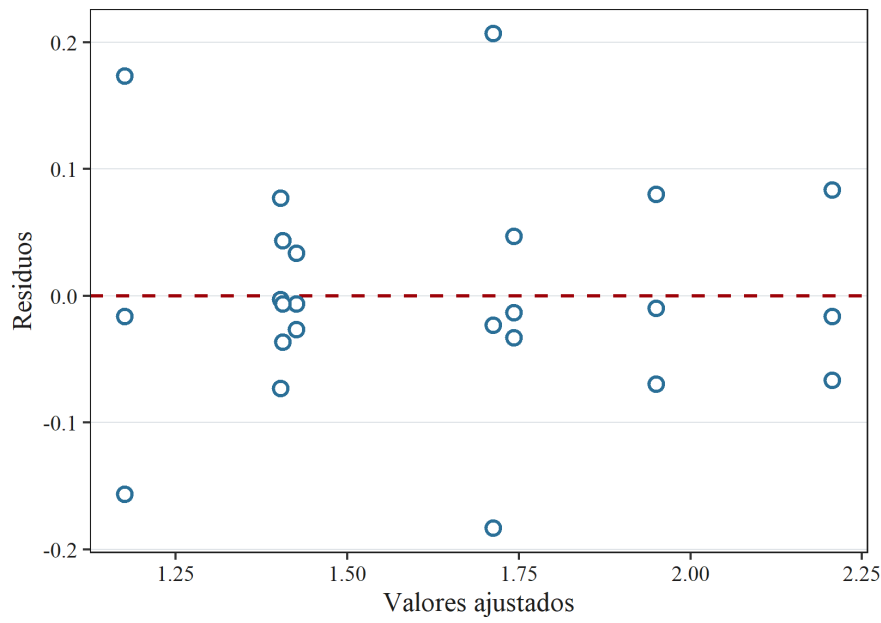
Gráfico cuantil-cuantil de los residuos del modelo de sólidos solubles totales



Nota. La línea representa la distribución normal teórica de referencia.

Anexo 6

Residuos frente a valores ajustados del modelo de sólidos solubles totales



Nota. La línea discontinua indica el valor cero.

Anexo 7

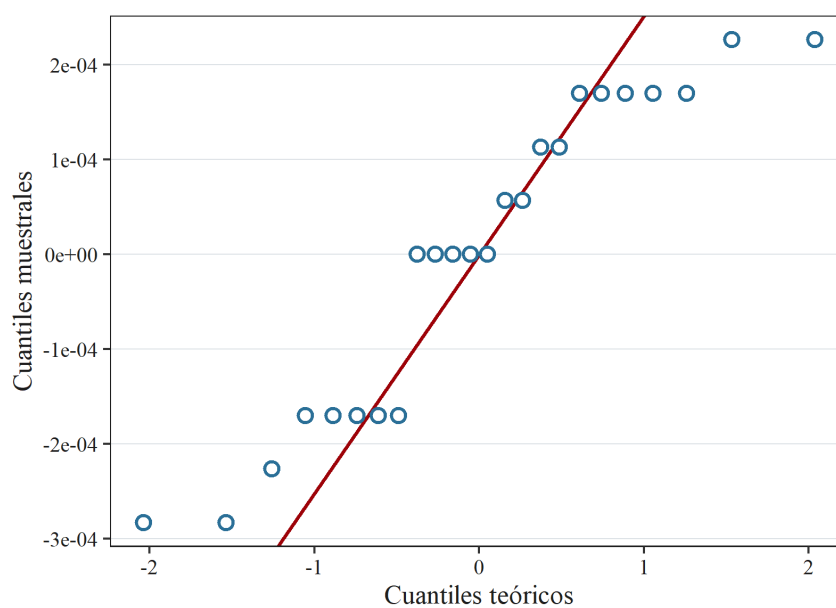
Efectos simples de los factores sobre los sólidos solubles totales de la infusión filtrante

Comparación	Condición fijada	Diferencia	t	p	Sig.
40 °C vs. 60 °C	3 h; 850 µm	−0.463	−5,431	< 0,0001	***
40 °C vs. 60 °C	3 h; 2000 µm	−0.287	−3,360	0,0040	**
40 °C vs. 60 °C	6 h; 850 µm	−0.547	−6,408	< 0,0001	***
40 °C vs. 60 °C	6 h; 2000 µm	+0.230	2,696	0,0159	*
3 h vs. 6 h	40 °C; 850 µm	+0.340	3,985	0,0011	**
3 h vs. 6 h	40 °C; 2000 µm	+0.020	0,234	0,8176	ns
3 h vs. 6 h	60 °C; 850 µm	+0.257	3,009	0,0083	**
3 h vs. 6 h	60 °C; 2000 µm	+0.537	6,291	< 0,0001	***
850 µm vs. 2000 µm	40 °C; 3 h	+0.317	3,712	0,0019	**
850 µm vs. 2000 µm	40 °C; 6 h	−0.003	−0,039	0,9693	ns
850 µm vs. 2000 µm	60 °C; 3 h	+0.493	5,783	< 0,0001	***
850 µm vs. 2000 µm	60 °C; 6 h	+0.773	9,065	< 0,0001	***

Nota. Diferencias estimadas entre los niveles del primer factor manteniendo fijas las condiciones indicadas. Un valor positivo indica que el primer nivel presentó mayor contenido de sólidos solubles. Error estándar de la diferencia = 0,0853; gl = 16. Ajuste de Tukey. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns: no significativo.

Anexo 8

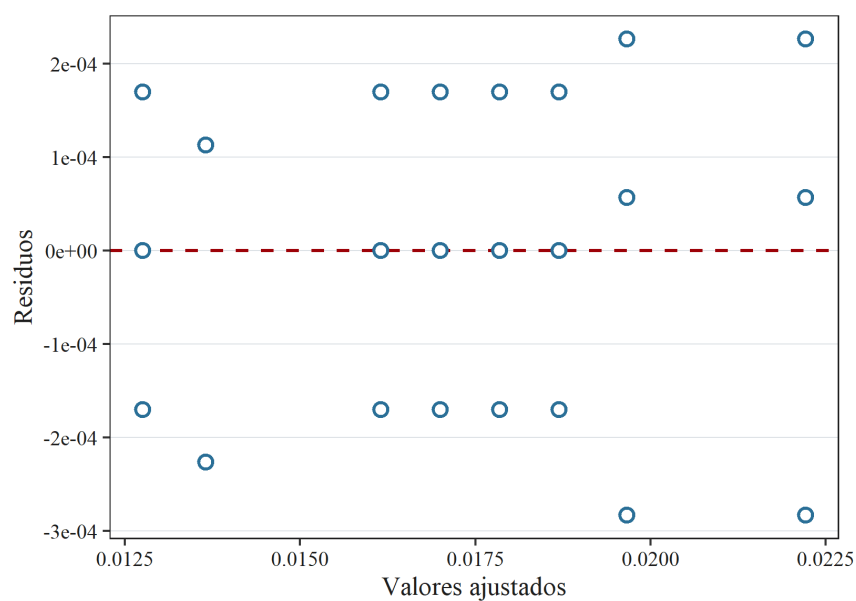
Gráfico cuantil-cuantil de los residuos del modelo de acidez titulable



Nota. La línea representa la distribución normal teórica de referencia. La disposición escalonada de los puntos refleja la resolución de registro de las lecturas volumétricas.

Anexo 9

Residuos frente a valores ajustados del modelo de acidez titulable



Nota. La línea discontinua indica el valor cero.

Anexo 10

Análisis de varianza por permutaciones de la acidez titulable

Efecto	F	p (permutación)
A: Temperatura (°C)	3360,273	< 0,001
B: Tiempo (h)	29,121	< 0,001
C: Tamaño de partícula (µm)	473,485	< 0,001
AB	25,485	< 0,001
AC	120,273	< 0,001
BC	105,485	< 0,001
ABC	970,939	< 0,001

Nota. Resultados obtenidos con 10 000 permutaciones aleatorias de la variable respuesta. En los siete efectos evaluados no se registró ninguna permutación con un valor de F igual o superior al observado, por lo que el valor de probabilidad estimado corresponde al mínimo alcanzable con este número de remuestreos.

Anexo 11

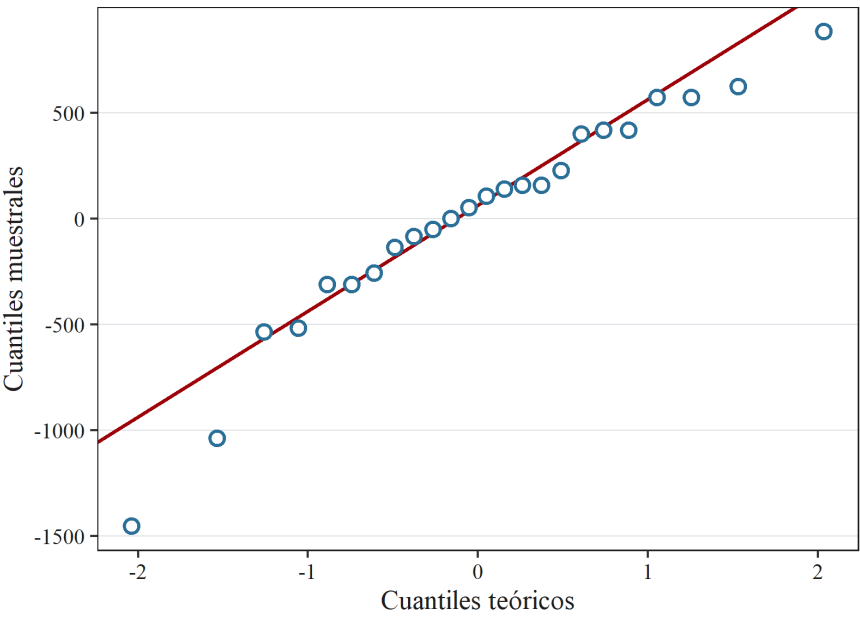
Efectos simples de los factores sobre la acidez titulable de la infusión filtrante

Comparación	Condición fijada	Diferencia	t	p	Sig.
40 °C vs. 60 °C	3 h; 850 µm	−0,00266	−16,363	< 0,0001	***
40 °C vs. 60 °C	3 h; 2000 µm	−0,00595	−36,556	< 0,0001	***
40 °C vs. 60 °C	6 h; 850 µm	−0,00856	−52,571	< 0,0001	***
40 °C vs. 60 °C	6 h; 2000 µm	−0,00170	−10,445	< 0,0001	***
3 h vs. 6 h	40 °C; 850 µm	+0,00334	20,541	< 0,0001	***
3 h vs. 6 h	40 °C; 2000 µm	−0,00340	−20,889	< 0,0001	***
3 h vs. 6 h	60 °C; 850 µm	−0,00255	−15,667	< 0,0001	***
3 h vs. 6 h	60 °C; 2000 µm	+0,00085	5,222	< 0,0001	***
850 µm vs. 2000 µm	40 °C; 3 h	+0,00425	26,112	< 0,0001	***
850 µm vs. 2000 µm	40 °C; 6 h	−0,00249	−15,319	< 0,0001	***
850 µm vs. 2000 µm	60 °C; 3 h	+0,00096	5,919	< 0,0001	***
850 µm vs. 2000 µm	60 °C; 6 h	+0,00436	26,808	< 0,0001	***

Nota. Diferencias estimadas entre los niveles del primer factor manteniendo fijas las condiciones indicadas, expresadas en % p/v. Un valor positivo indica que el primer nivel presentó mayor acidez. Error estándar de la diferencia = 0,000163; gl = 16. Ajuste de Tukey. *** p < 0,001.

Anexo 12

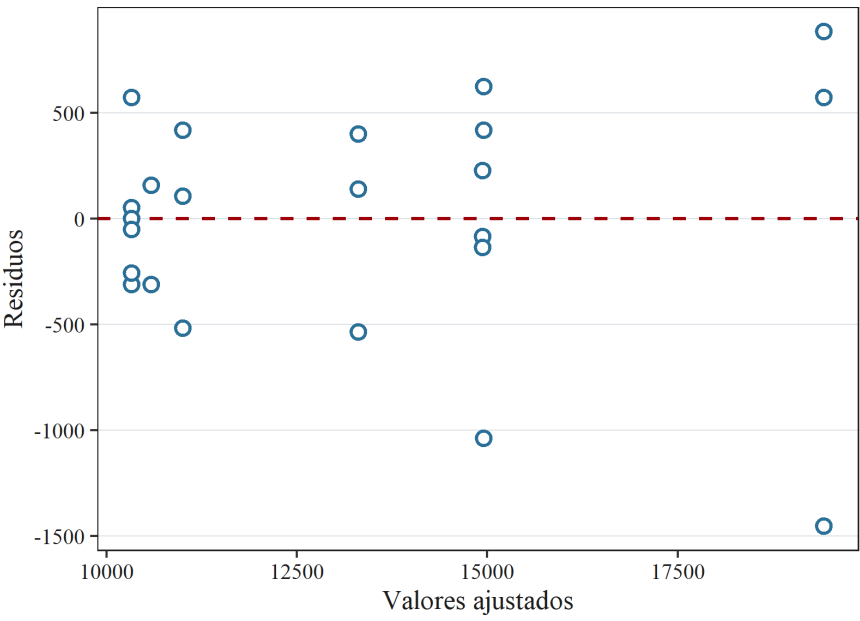
Gráfico cuantil-cuantil de los residuos del modelo de capacidad antioxidante



Nota. La línea representa la distribución normal teórica de referencia.

Anexo 13

Residuos frente a valores ajustados del modelo de capacidad antioxidante



Nota. La línea discontinua indica el valor cero.

Anexo 14

Efectos simples de los factores sobre la capacidad antioxidante de la infusión filtrante

Comparación	Condición fijada	Diferencia	t	p	Sig.
40 °C vs. 60 °C	3 h; 850 µm	-4345,57	-8,350	< 0,0001	***
40 °C vs. 60 °C	3 h; 2000 µm	-675,21	-1,297	0,2129	ns
40 °C vs. 60 °C	6 h; 850 µm	-1644,74	-3,161	0,0061	**
40 °C vs. 60 °C	6 h; 2000 µm	-9089,34	-17,466	< 0,0001	***
3 h vs. 6 h	40 °C; 850 µm	-2718,14	-5,223	< 0,0001	***
3 h vs. 6 h	40 °C; 2000 µm	0,00	0,000	1,0000	ns
3 h vs. 6 h	60 °C; 850 µm	-17,31	-0,033	0,9739	ns
3 h vs. 6 h	60 °C; 2000 µm	-8414,13	-16,169	< 0,0001	***
850 µm vs. 2000 µm	40 °C; 3 h	+259,70	0,499	0,6245	ns
850 µm vs. 2000 µm	40 °C; 6 h	+2977,84	5,722	< 0,0001	***
850 µm vs. 2000 µm	60 °C; 3 h	+3930,06	7,552	< 0,0001	***
850 µm vs. 2000 µm	60 °C; 6 h	-4466,76	-8,583	< 0,0001	***

Nota. Diferencias estimadas entre los niveles del primer factor manteniendo fijas las condiciones indicadas, expresadas en µmol ET/L. Un valor positivo indica que el primer nivel presentó mayor capacidad antioxidante. Error estándar de la diferencia = 520,40; gl = 16. Ajuste de Tukey. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; ns: no significativo.

Anexo 15

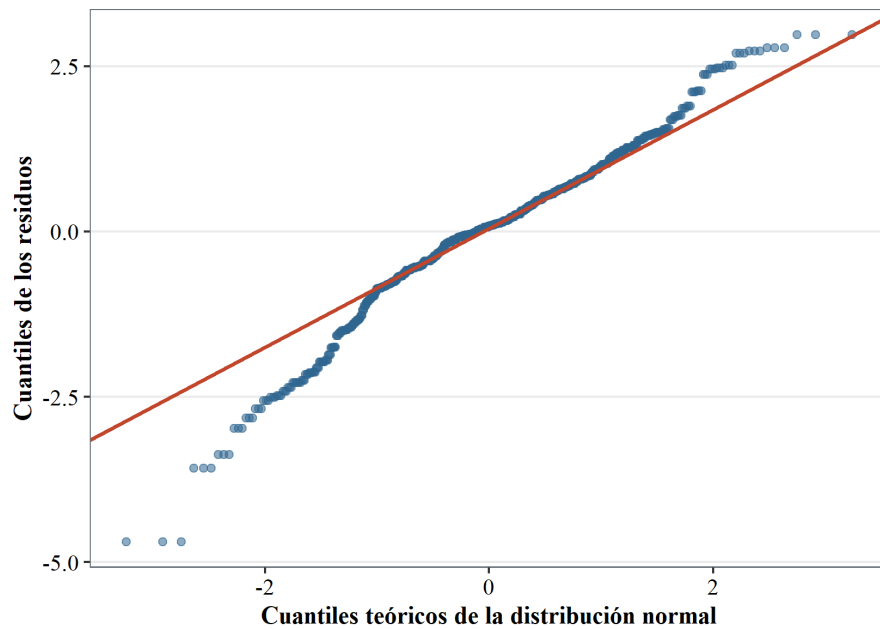
Estructura del registro de datos del atributo color. Extracto de los dos primeros panelistas

Panelista	Tratamiento	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Tamaño de partícula (µm)	Valor
1	T1	40	3	850	9,9
1	T2	40	3	2000	9,2
1	T3	40	6	850	9,9
1	T4	40	6	2000	6,8
1	T5	60	3	850	9,6
1	T6	60	3	2000	7,5
1	T7	60	6	850	9,7
1	T8	60	6	2000	9,6
2	T1	40	3	850	8,7
2	T2	40	3	2000	9,0
2	T3	40	6	850	9,3
2	T4	40	6	2000	8,9
2	T5	60	3	850	9,5
2	T6	60	3	2000	9,7
2	T7	60	6	850	9,3
2	T8	60	6	2000	9,8

Nota. Extracto de los dos primeros panelistas con las ocho evaluaciones que cada uno emitió. El valor corresponde al puntaje asignado en la escala visual analógica. La estructura es idéntica para los cuatro atributos y la base completa de cada uno comprende 840 registros, correspondientes a 105 panelistas por 8 tratamientos. Elaboración propia.

Anexo 16

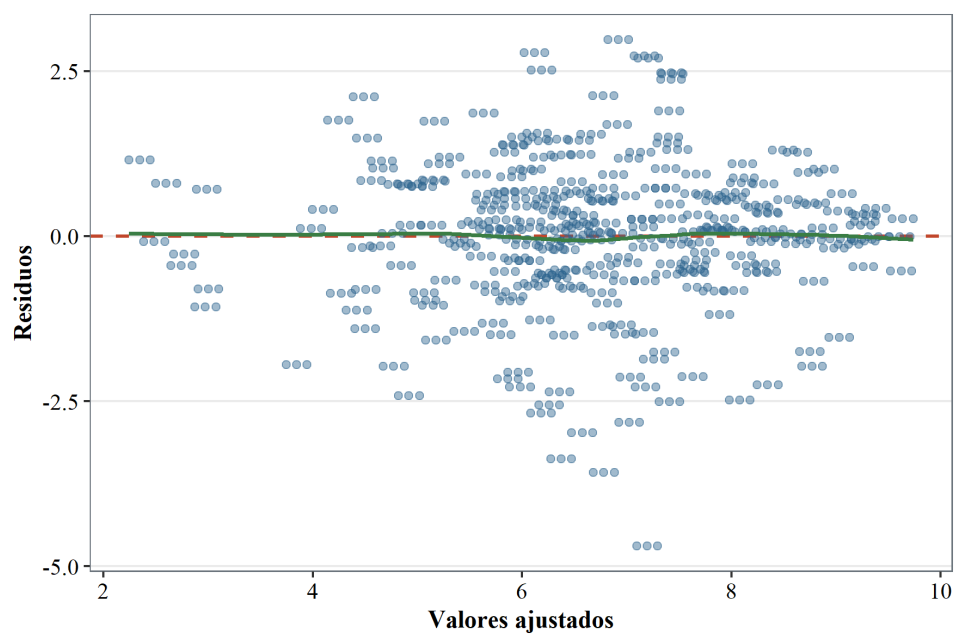
Gráfico cuantil-cuantil de los residuos del modelo de aceptabilidad del color



Nota. La línea representa la distribución normal teórica de referencia. Las desviaciones se concentran en los extremos de la escala. Elaboración propia.

Anexo 17

Residuos frente a valores ajustados del modelo de aceptabilidad del color



Nota. La línea discontinua indica el valor cero y la continua corresponde a un suavizado local de los residuos. La dispersión se mantiene aproximadamente constante a lo largo de todo el rango, sin patrones sistemáticos. Elaboración propia.

Anexo 18

Análisis de varianza por permutaciones dentro de bloque como respaldo del análisis paramétrico del atributo color

Efecto	F observado	p por permutaciones	p paramétrico	Coincide la decisión
A: Temperatura	10,0827	0,0016	0,0016	Sí
B: Tiempo	0,3298	0,5631	0,5660	Sí
C: Tamaño de partícula	2,4673	0,1164	0,1167	Sí
AB	0,8013	0,3740	0,3710	Sí
AC	2,4146	0,1180	0,1206	Sí
BC	0,7714	0,3842	0,3801	Sí
ABC	12,9426	0,0005	0,0003	Sí

Nota. Se realizaron 20 000 permutaciones de los puntajes dentro de cada panelista, procedimiento que respeta la estructura de bloques del diseño y no supone ninguna distribución para los residuales. La última columna indica si la decisión estadística coincide con la del análisis paramétrico. El valor de probabilidad por permutaciones es simulado y puede variar en la tercera cifra decimal entre corridas. Elaboración propia.

Anexo 19

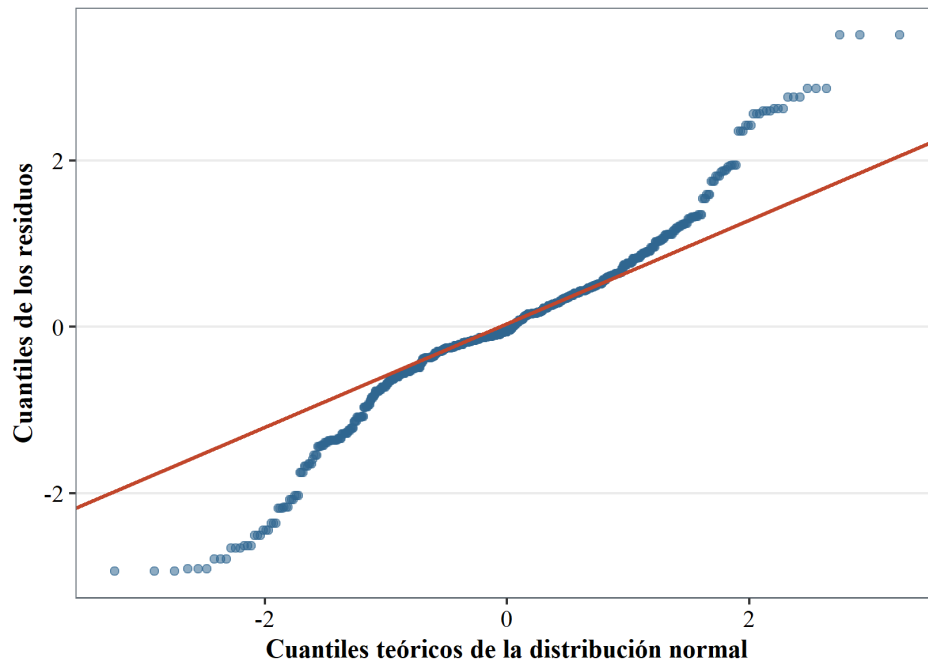
Efectos simples de los factores sobre la aceptabilidad del color

Factor evaluado	Condición fijada	Diferencia	t	p	Sig.
60 frente a 40 °C	3 h; 850 µm	+0,629	3,716	0,0002	***
60 frente a 40 °C	3 h; 2000 µm	−0,243	−1,436	0,1515	ns
60 frente a 40 °C	6 h; 850 µm	+0,171	1,013	0,3112	ns
60 frente a 40 °C	6 h; 2000 µm	+0,517	3,057	0,0023	**
6 frente a 3 h	40 °C; 850 µm	+0,254	1,503	0,1332	ns
6 frente a 3 h	40 °C; 2000 µm	−0,503	−2,973	0,0030	**
6 frente a 3 h	60 °C; 850 µm	−0,203	−1,199	0,2308	ns
6 frente a 3 h	60 °C; 2000 µm	+0,257	1,520	0,1289	ns
2000 frente a 850 µm	40 °C; 3 h	+0,643	3,800	0,0002	***
2000 frente a 850 µm	40 °C; 6 h	−0,114	−0,676	0,4995	ns
2000 frente a 850 µm	60 °C; 3 h	−0,229	−1,351	0,1770	ns
2000 frente a 850 µm	60 °C; 6 h	+0,231	1,368	0,1717	ns

Nota. Diferencias estimadas entre los niveles del factor indicado manteniendo fijas las condiciones señaladas, expresadas en puntos de la escala. La diferencia corresponde siempre al nivel alto menos el nivel bajo, de modo que un valor positivo indica que el nivel alto obtuvo mayor puntaje. Todas las pruebas se realizaron con el cuadrado medio del error del modelo con bloque (CM = 1,5023; gl = 728) y el error estándar de la diferencia fue de 0,169. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns: no significativo. Elaboración propia.

Anexo 20

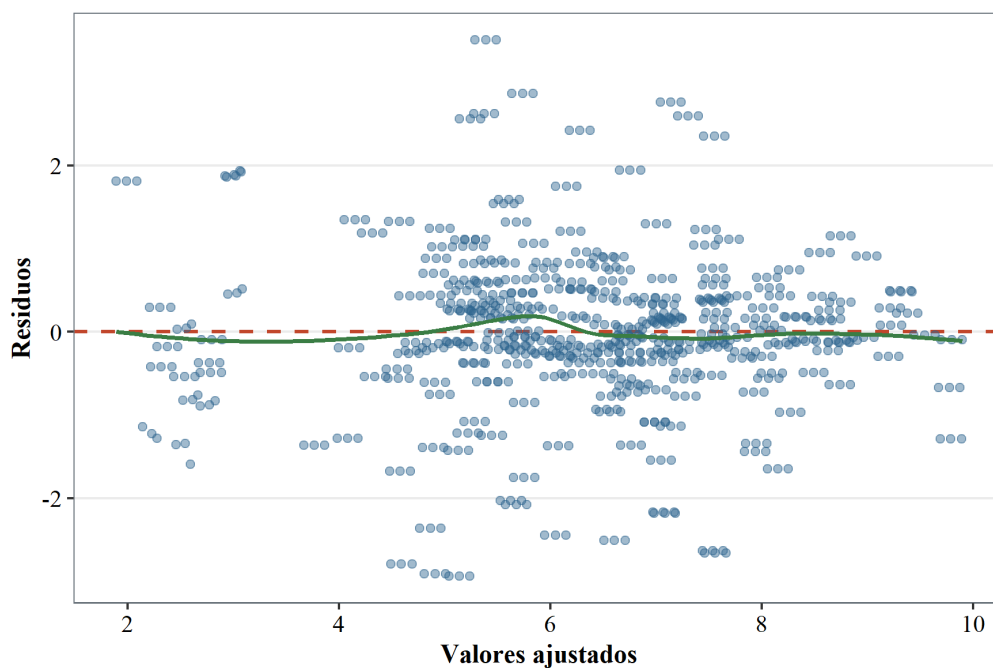
Gráfico cuantil-cuantil de los residuos del modelo de aceptabilidad del olor



Nota. La línea representa la distribución normal teórica de referencia. Las desviaciones se concentran en los extremos de la escala. Elaboración propia.

Anexo 21

Residuos frente a valores ajustados del modelo de aceptabilidad del olor



Nota. La línea discontinua indica el valor cero y la continua corresponde a un suavizado local de los residuos. La dispersión se mantiene aproximadamente constante a lo largo de todo el rango, sin patrones sistemáticos. Elaboración propia.

Anexo 22

Análisis de varianza por permutaciones dentro de bloque como respaldo del análisis paramétrico del atributo olor

Efecto	F observado	p por permutaciones	p paramétrico	Coincide la decisión
A: Temperatura	26,1570	< 0,0001	< 0,0001	Sí
B: Tiempo	13,8081	0,0003	0,0002	Sí
C: Tamaño de partícula	5,0964	0,0237	0,0243	Sí
AB	0,3592	0,5538	0,5491	Sí
AC	1,3894	0,2389	0,2389	Sí
BC	10,8661	0,0011	0,0010	Sí
ABC	0,0036	0,9518	0,9522	Sí

Nota. Se realizaron 20 000 permutaciones de los puntajes dentro de cada panelista, procedimiento que respeta la estructura de bloques del diseño y no supone ninguna distribución para los residuales. La última columna indica si la decisión estadística coincide con la del análisis paramétrico. El valor de probabilidad por permutaciones es simulado y puede variar en la tercera cifra decimal entre corridas. Elaboración propia.

Anexo 23

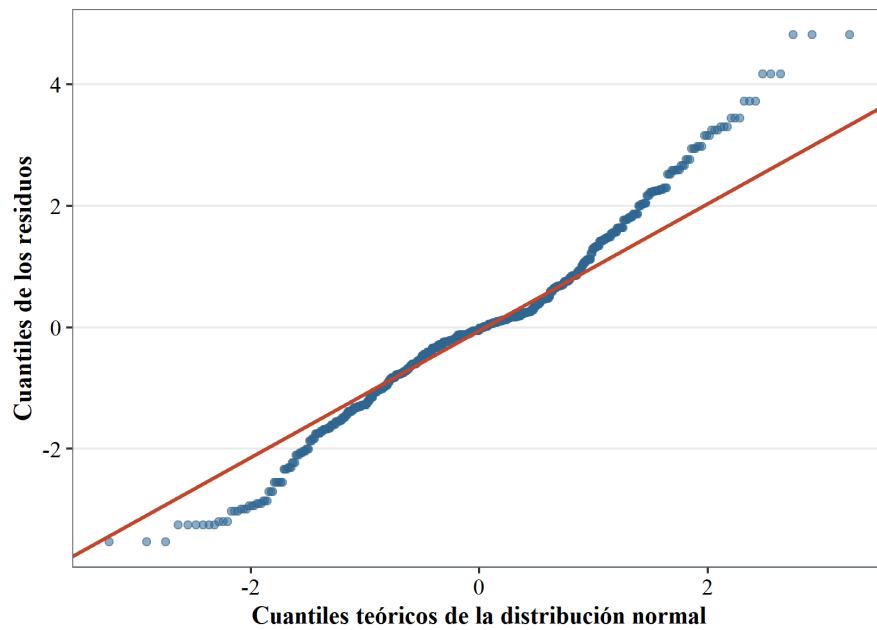
Efectos simples de los factores sobre la aceptabilidad del olor

Factor evaluado	Condición fijada	Diferencia	t	p	Sig.
60 frente a 40 °C	3 h	+0,409	4,040	< 0,0001	***
60 frente a 40 °C	6 h	+0,323	3,193	0,0015	**
60 frente a 40 °C	850 µm	+0,281	2,783	0,0055	**
60 frente a 40 °C	2000 µm	+0,450	4,450	< 0,0001	***
6 frente a 3 h	40 °C	+0,309	3,051	0,0024	**
6 frente a 3 h	60 °C	+0,223	2,204	0,0279	*
6 frente a 3 h	850 µm	+0,501	4,959	< 0,0001	***
6 frente a 3 h	2000 µm	+0,030	0,297	0,7668	ns
2000 frente a 850 µm	40 °C	+0,077	0,763	0,4458	ns
2000 frente a 850 µm	60 °C	+0,246	2,430	0,0153	*
2000 frente a 850 µm	3 h	+0,397	3,927	< 0,0001	***
2000 frente a 850 µm	6 h	-0,074	-0,735	0,4628	ns

Nota. Diferencias estimadas entre los niveles del factor indicado dentro de cada nivel de otro factor, promediando sobre el restante, de modo que cada media se calculó sobre 210 evaluaciones. La diferencia corresponde siempre al nivel alto menos el nivel bajo, por lo que un valor positivo indica que el nivel alto obtuvo mayor puntaje. Todas las pruebas se realizaron con el cuadrado medio del error del modelo con bloque (CM = 1,0738; gl = 728) y el error estándar de la diferencia fue de 0,101. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns: no significativo. Elaboración propia.

Anexo 24

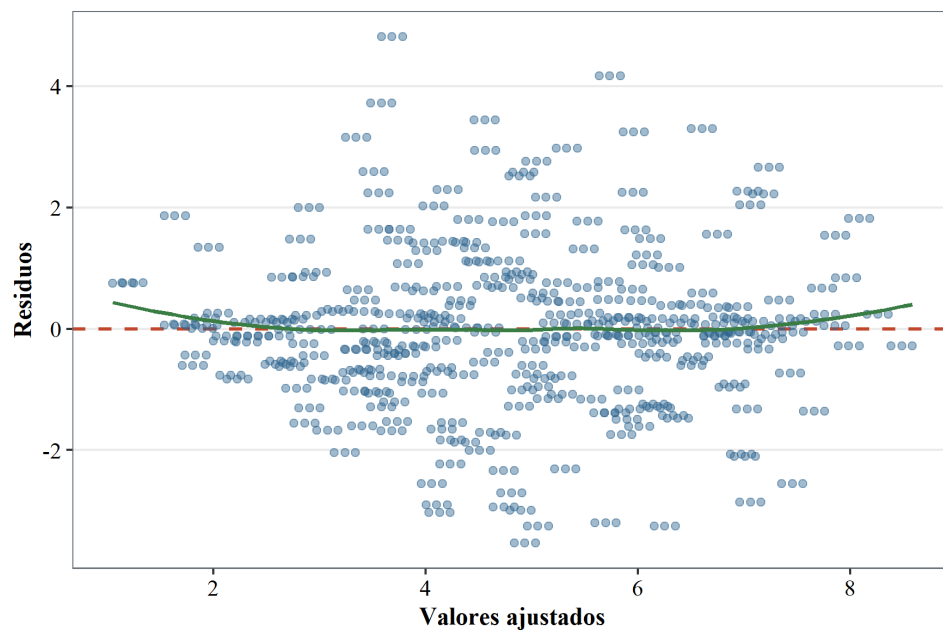
Gráfico cuantil-cuantil de los residuos del modelo de aceptabilidad del sabor



Nota. La línea representa la distribución normal teórica de referencia. Las desviaciones se concentran en los extremos, correspondientes a las calificaciones más bajas y más altas de la escala. Elaboración propia.

Anexo 25

Residuos frente a valores ajustados del modelo de aceptabilidad del sabor



Nota. La línea discontinua indica el valor cero y la continua corresponde a un suavizado local de los residuos. La dispersión se mantiene aproximadamente constante a lo largo de todo el rango, sin patrones sistemáticos. Elaboración propia.

Anexo 26

Análisis de varianza por permutaciones dentro de bloque como respaldo del análisis paramétrico del atributo sabor

Efecto	F observado	p por permutaciones	p paramétrico	Coincide la decisión
A: Temperatura	66,3972	< 0,0001	< 0,0001	Sí
B: Tiempo	0,8025	0,3754	0,3706	Sí
C: Tamaño de partícula	20,8405	< 0,0001	< 0,0001	Sí
AB	11,4908	0,0009	0,0007	Sí
AC	3,9979	0,0455	0,0459	Sí
BC	1,0799	0,3000	0,2991	Sí
ABC	1,6091	0,2018	0,2050	Sí

Nota. Se realizaron 20 000 permutaciones de los puntajes dentro de cada panelista, procedimiento que respeta la estructura de bloques del diseño y no supone ninguna distribución para los residuales. La última columna indica si la decisión estadística coincide con la del análisis paramétrico. El valor de probabilidad por permutaciones es simulado y puede variar en la tercera cifra decimal entre corridas. Elaboración propia.

Anexo 27

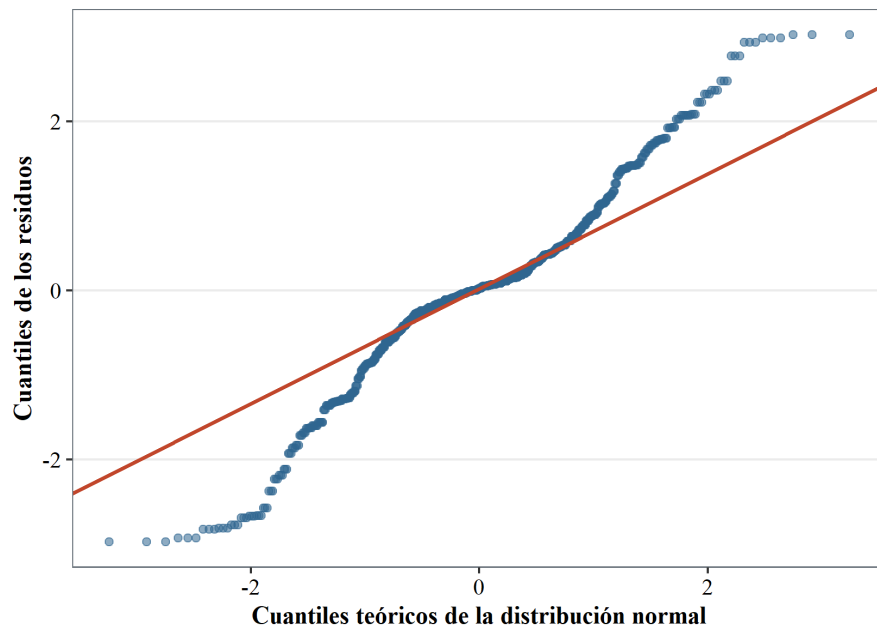
Efectos simples de los factores sobre la aceptabilidad del sabor

Factor evaluado	Condición fijada	Diferencia	t	p	Sig.
60 frente a 40 °C	3 h	+1,150	8,159	< 0,0001	***
60 frente a 40 °C	6 h	+0,474	3,365	0,0008	***
60 frente a 40 °C	850 µm	+0,613	4,348	< 0,0001	***
60 frente a 40 °C	2000 µm	+1,011	7,176	< 0,0001	***
6 frente a 3 h	40 °C	+0,427	3,030	0,0025	**
6 frente a 3 h	60 °C	-0,249	-1,764	0,0782	ns
6 frente a 3 h	850 µm	+0,193	1,368	0,1717	ns
6 frente a 3 h	2000 µm	-0,014	-0,101	0,9193	ns
2000 frente a 850 µm	40 °C	+0,256	1,814	0,0701	ns
2000 frente a 850 µm	60 °C	+0,654	4,642	< 0,0001	***
2000 frente a 850 µm	3 h	+0,559	3,963	< 0,0001	***
2000 frente a 850 µm	6 h	+0,351	2,493	0,0129	*

Nota. Diferencias estimadas entre los niveles del factor indicado dentro de cada nivel de otro factor, promediando sobre el restante, de modo que cada media se calculó sobre 210 evaluaciones. La diferencia corresponde siempre al nivel alto menos el nivel bajo, por lo que un valor positivo indica que el nivel alto obtuvo mayor puntaje. Todas las pruebas se realizaron con el cuadrado medio del error del modelo con bloque (CM = 2,0861; gl = 728) y el error estándar de la diferencia fue de 0,141. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns: no significativo. Elaboración propia.

Anexo 28

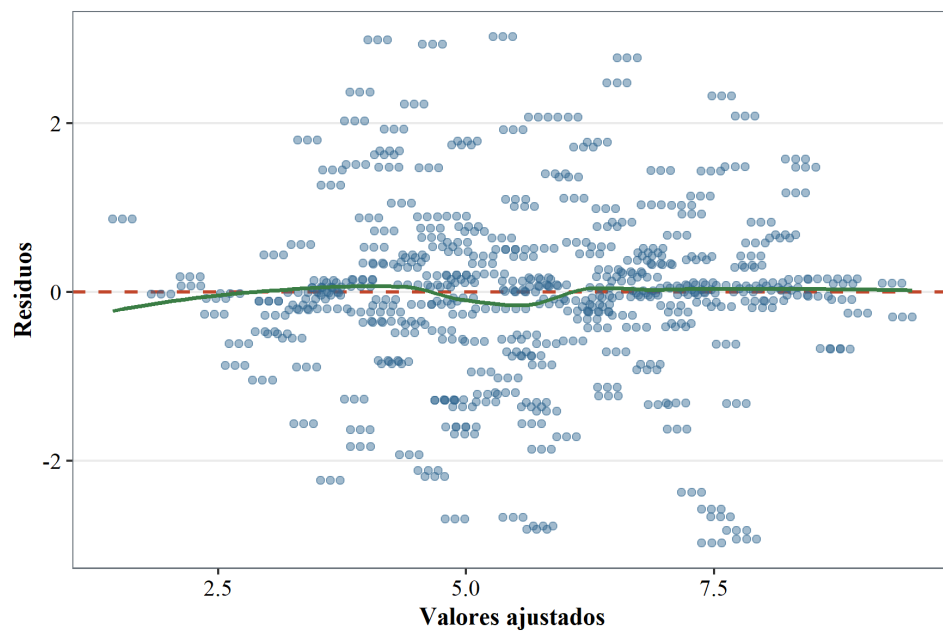
Gráfico cuantil-cuantil de los residuos del modelo de aceptabilidad general



Nota. La línea representa la distribución normal teórica de referencia. Las desviaciones se concentran en los extremos, correspondientes a las calificaciones más bajas y más altas de la escala. Elaboración propia.

Anexo 29

Residuos frente a valores ajustados del modelo de aceptabilidad general



Nota. La línea discontinua indica el valor cero y la continua corresponde a un suavizado local de los residuos. La dispersión se mantiene aproximadamente constante a lo largo de todo el rango, sin patrones sistemáticos. Elaboración propia.

Anexo 30

Análisis de varianza por permutaciones dentro de bloque como respaldo del análisis paramétrico de la aceptabilidad general

Efecto	F observado	p por permutaciones	p paramétrico	Coincide la decisión
A: Temperatura	94,4230	< 0,0001	< 0,0001	Sí
B: Tiempo	7,4813	0,0074	0,0064	Sí
C: Tamaño de partícula	22,3976	< 0,0001	< 0,0001	Sí
AB	12,0616	0,0003	0,0005	Sí
AC	4,9789	0,0276	0,0260	Sí
BC	2,1773	0,1425	0,1405	Sí
ABC	0,8422	0,3565	0,3591	Sí

Nota. Se realizaron 20 000 permutaciones de los puntajes dentro de cada panelista, procedimiento que respeta la estructura de bloques del diseño y no supone ninguna distribución para los residuales. La última columna indica si la decisión estadística coincide con la del análisis paramétrico. El valor de probabilidad por permutaciones es simulado y puede variar en la tercera cifra decimal entre corridas. Elaboración propia.

Anexo 31

Efectos simples de los factores sobre la aceptabilidad general

Factor evaluado	Condición fijada	Diferencia	t	p	Sig.
60 frente a 40 °C	3 h	+1,047	9,327	< 0,0001	***
60 frente a 40 °C	6 h	+0,496	4,415	< 0,0001	***
60 frente a 40 °C	850 µm	+0,594	5,293	< 0,0001	***
60 frente a 40 °C	2000 µm	+0,949	8,449	< 0,0001	***
6 frente a 3 h	40 °C	+0,493	4,390	< 0,0001	***
6 frente a 3 h	60 °C	-0,059	-0,522	0,6020	ns
6 frente a 3 h	850 µm	+0,334	2,978	0,0030	**
6 frente a 3 h	2000 µm	+0,100	0,891	0,3734	ns
2000 frente a 850 µm	40 °C	+0,199	1,769	0,0774	ns
2000 frente a 850 µm	60 °C	+0,553	4,924	< 0,0001	***
2000 frente a 850 µm	3 h	+0,493	4,390	< 0,0001	***
2000 frente a 850 µm	6 h	+0,259	2,303	0,0216	*

Nota. Diferencias estimadas entre los niveles del factor indicado dentro de cada nivel de otro factor, promediando sobre el restante, de modo que cada media se calculó sobre 210 evaluaciones. La diferencia corresponde siempre al nivel alto menos el nivel bajo, por lo que un valor positivo indica que el nivel alto obtuvo mayor puntaje. Todas las pruebas se realizaron con el cuadrado medio del error del modelo con bloque (CM = 1,3235; gl = 728) y el error estándar de la diferencia fue de 0,112. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns: no significativo. Elaboración propia.