

## Delimitación de una región de alta aceptabilidad para un dulce de zanahoria mediante diseño de vértices extremos

## Defining a high-acceptability formulation region for carrot candy using an extreme vertices design

Jesús Guadalupe Pérez Flores <sup>a</sup>, Yeimi Carolina Hernández Callejas <sup>b</sup>,

Laura García Curiel <sup>c</sup>, Israel Oswaldo Ocampo Salinas <sup>d</sup>,

Emmanuel Pérez Escalante <sup>e</sup>, Carlos Ángel Jijón <sup>f</sup>, Gabriela Nallely Trejo Díaz <sup>g</sup>

### Abstract:

Spicy confectionery products formulated with vegetable ingredients require optimization of ingredient proportions to achieve consumer acceptance. This study aimed to optimize the formulation of a carrot-based spicy candy by modeling how carrot powder, chili blend, and salt proportions affected overall liking, using an extreme vertices mixture design implemented in R to guide formulation. Nine formulations within defined proportion limits were generated and evaluated by 25 trained panelists on a 5-point hedonic scale, and a special cubic mixture model was fitted by ordinary least squares; model adequacy was examined through ANOVA, residual diagnostics, and cross-validation, and response surfaces were used to explore the design space, followed by numerical optimization with box-constrained L-BFGS-B. Carrot and chili fractions dominated the explained variance, and the model described the training data well, while cross-validation revealed moderate predictive ability and signs of overfitting. Contour and Piepel plots indicated a favorable region characterized by high carrot levels, moderate chili, and controlled salt, whereas the numerical optimum fell outside the feasible mixture region and produced inflated liking predictions. In conclusion, the approach delineated promising formulation zones but underscored the need for stricter mixture constraints, more formulations, and experimental validation to consolidate an optimized carrot-based spicy candy.

### Keywords:

Mixtures, optimization, surface, sensory, formulation

### Resumen:

Los productos de confitería elaborados con bases vegetales requieren ajustar con precisión las proporciones de sus componentes para alcanzar niveles adecuados de agrado sensorial. Este estudio tuvo como objetivo optimizar la formulación de un dulce enchilado a base de zanahoria mediante la modelación del efecto de zanahoria en polvo, mezcla de chiles y sal sobre la aceptabilidad general, utilizando un diseño de mezclas de vértices extremos para definir el espacio experimental. Se generaron nueve formulaciones dentro de límites preestablecidos y fueron evaluadas por 25 panelistas en una escala hedónica de 5 puntos; posteriormente, se ajustó un modelo cúbico especial mediante mínimos cuadrados ordinarios, cuya adecuación se examinó con ANOVA, diagnósticos residuales y validación cruzada. Las superficies de respuesta permitieron explorar el comportamiento de la mezcla, mostrando que zanahoria y Chile explicaron la mayor parte de la variabilidad, mientras que la capacidad predictiva del modelo fue moderada y presentó indicios de sobreajuste. Los gráficos de contorno señalaron una región favorable caracterizada por niveles altos de zanahoria, cantidades moderadas de Chile y sal controlada, aunque la solución obtenida por optimización numérica quedó fuera del espacio de mezcla factible. En conclusión, los resultados permitieron identificar zonas promisorias de formulación y reforzaron la necesidad de ampliar el número de ensayos, aplicar restricciones más estrictas y validar experimentalmente las combinaciones propuestas.

### Palabras Clave:

Mezclas, optimización, superficie, sensorial, formulación

a, Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-9654-3469>, Email: [jesus\\_perez@uaeh.edu.mx](mailto:jesus_perez@uaeh.edu.mx)

b, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0009-0009-4141-1782>, Email: [yeimihernandez2412@gmail.com](mailto:yeimihernandez2412@gmail.com)

c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0001-8961-2852>, Email: [laura.garcia@uaeh.edu.mx](mailto:laura.garcia@uaeh.edu.mx)

d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-5507-4889>, Email: [iocampo@uaeh.edu.mx](mailto:iocampo@uaeh.edu.mx)

e Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-4268-9753>, Email: [emmanuel\\_perez@uaeh.edu.mx](mailto:emmanuel_perez@uaeh.edu.mx)

f Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-1047-9612>, Email: [carlos\\_angel@uaeh.edu.mx](mailto:carlos_angel@uaeh.edu.mx)

g Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, <https://orcid.org/0000-0002-2424-4275>, Email: [gnallely.trejo@gmail.com](mailto:gnallely.trejo@gmail.com)

Fecha de recepción: 21/11/2025, Fecha de aceptación: 09/12/2025, Fecha de publicación: 30/01/2026

DOI: <https://doi.org/10.29057/icea.v14iEspecial.16650>



## Introducción

El desarrollo de productos de confitería con ingredientes de origen vegetal se ha fortalecido como estrategia para responder a la demanda de opciones con perfiles sensoriales atractivos y atributos funcionales [1,2]. El uso de hortalizas deshidratadas, en particular el polvo de zanahoria, se ha vinculado con mejoras en el color y la estabilidad de pigmentos en distintos alimentos [3,4]. Diversos trabajos muestran que estos ingredientes también aportan compuestos bioactivos y contribuyen al contenido antioxidante de productos como barras, extruidos y snacks [5–7]. Además de su aporte funcional, el polvo de zanahoria influye en la percepción de sabor y dulzor, lo que favorece su incorporación en matrices de confitería y productos de tipo golosina [2,8].

Los productos de confitería elaborados a base de chile, conocidos como productos enchilados, se caracterizan por una combinación compleja de dulzor, acidez, pungencia y salinidad, cuyo equilibrio condiciona la aceptación por parte de las y los consumidores [9,10]. Estudios en chocolates picantes y otros sistemas condimentados muestran que la interacción entre ingredientes dulces y componentes derivados de *Capsicum* modifica el perfil sensorial y el agrado percibido [11,12]. Se ha observado además que la experiencia previa con alimentos pungentes y la sensibilidad individual a la capsaicina influyen en la preferencia por productos que combinan sabores dulces y picantes [11–13]. En este tipo de formulaciones, el ajuste manual de las proporciones de componentes suele requerir múltiples iteraciones y puede conducir a combinaciones subóptimas, lo que motiva el uso de enfoques experimentales más estructurados para mejorar la aceptabilidad global [14,15].

Los diseños de mezclas proporcionan un marco estadístico adecuado cuando la respuesta depende de las proporciones relativas de los componentes, más que de sus cantidades absolutas [16]. Este enfoque permite estimar efectos principales e interacciones entre ingredientes, y en caso necesario incorporar términos cúbicos para describir comportamientos no lineales en sistemas alimentarios complejos [17,18]. Aplicaciones recientes en productos horneados, formulaciones sin gluten y oleogeles muestran que los diseños de mezclas facilitan la vinculación entre proporciones de ingredientes y propiedades tecnológicas, nutricionales o sensoriales, apoyando la optimización de formulaciones [19–21]. En particular, los diseños de vértices extremos resultan apropiados cuando cada componente debe mantenerse dentro de límites mínimos y máximos definidos por requisitos funcionales o sensoriales, lo que acota la región experimental a combinaciones factibles desde el punto de vista tecnológico [17,18,20].

La formulación basada en prueba-error presenta limitaciones en términos de tiempo, costo y capacidad para explorar de manera sistemática las interacciones entre componentes [22]. El empleo de diseños de mezclas, acompañado de modelos estadísticos

adecuados, permite reducir el número de experimentos y obtener superficies de respuesta y/o gráficos de contorno que facilitan la predicción del comportamiento dentro de la región de estudio [16,17,23]. El software libre R se ha consolidado como una herramienta accesible para implementar este tipo de diseños, ajustar modelos polinomiales de mezclas, generar visualizaciones especializadas y realizar optimizaciones numéricas mediante paquetes como 'mixexp' [16,17]. A pesar de estos avances, persiste una brecha entre la literatura metodológica y los recursos con formato de tutorial aplicados a casos concretos en confitería, en especial a productos enchilados formulados con ingredientes vegetales [17,22,24]. Además, se mantienen discusiones sobre la elección del orden del modelo (cuadrático o cúbico), la forma de representar las restricciones (suma unitaria frente a cajas de proporciones acotadas) y el criterio sensorial que se selecciona como variable de respuesta principal (aceptabilidad general, intensidades específicas o preferencia) [17–19]. En este sentido, este estudio se plantea también como un caso metodológico que ilustra la aplicación práctica de los diseños de mezclas de vértices extremos en sistemas de confitería vegetal, destacando cómo este enfoque permite delimitar regiones prometedoras de formulación bajo restricciones sensoriales y tecnológicas.

De acuerdo con todo lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo delimitar, dentro del dominio experimental establecido, una región de formulación de un dulce enchilado a base de zanahoria que presente altos niveles de aceptabilidad general, utilizando un diseño de mezclas de vértices extremos. El análisis se centra en tres componentes: polvo de zanahoria ( $x_1$ ), mezcla de chiles ( $x_2$ ) y sal ( $x_3$ ), cuyos rangos de proporción se definieron con base en consideraciones sensoriales y tecnológicas.

## Materiales y Métodos

### Materiales y formulación del producto

Los ingredientes, los aditivos alimentarios y la formulación base del dulce enchilado a base de zanahoria fueron proporcionados por una empresa de confitería ubicada en Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. La matriz base corresponde a un prototipo comercial en desarrollo que incluye azúcares, hidrocoloides, acidulantes, humectantes y conservadores. Estos componentes se mantuvieron constantes en todas las formulaciones evaluadas y no formaron parte de los factores del diseño experimental.

Debido a acuerdos de colaboración con la empresa, la composición cuantitativa detallada de esta matriz base no se describe, ya que se trata de un desarrollo tecnológico en curso. No obstante, el estudio se centra exclusivamente en la variación de las proporciones de tres componentes ajustables de la formulación: polvo de zanahoria ( $x_1$ ), mezcla de chiles ( $x_2$ ) y sal ( $x_3$ ). La información proporcionada sobre estos tres factores y sus

rangos de proporción permite seguir el procedimiento experimental descrito y trasladar el enfoque de diseño de mezclas de vértices extremos a otras matrices de confitería con características similares

### Diseño de mezclas tipo vértices extremos

El estudio se planteó como un diseño de mezclas con tres componentes: polvo de zanahoria ( $x_1$ ), mezcla de chiles ( $x_2$ ) y sal ( $x_3$ ), cada uno restringido a un intervalo de proporciones determinado por consideraciones sensoriales y tecnológicas derivadas de pruebas preliminares y de la experiencia de la empresa productora. Los límites establecidos fueron  $0.30 \leq x_1 \leq 0.60$  para el polvo de zanahoria,  $0.20 \leq x_2 \leq 0.50$  para la mezcla de chiles y  $0.10 \leq x_3 \leq 0.20$  para la sal [25].

Las proporciones se definieron de manera que la suma de los 3 componentes fuera igual a 1 dentro de la región factible, respetando al mismo tiempo los rangos mínimo y máximo de cada ingrediente. Para facilitar la elaboración de los prototipos, las fracciones de mezcla se escalaron a una masa total de 107 g de la fase sólida correspondiente, de modo que las cantidades de polvo de zanahoria, mezcla de chiles y sal pudieran pesarse directamente en gramos durante la preparación de las muestras.

Se seleccionó un diseño de vértices extremos utilizando la función 'Xvert()' del paquete 'mixexp' en R, lo que permitió generar combinaciones localizadas en los vértices y puntos internos de la región delimitada por las restricciones de cada componente, asegurando que todos los ensayos se realicen en formulaciones factibles desde el punto de vista sensorial y de procesabilidad, y que la posterior optimización se lleve a cabo dentro de la misma región experimental. El diseño incluyó vértices, puntos sobre aristas y puntos interiores de la mezcla mediante el parámetro 'ndm = 1', lo que resultó en una matriz de nueve formulaciones [25,26].

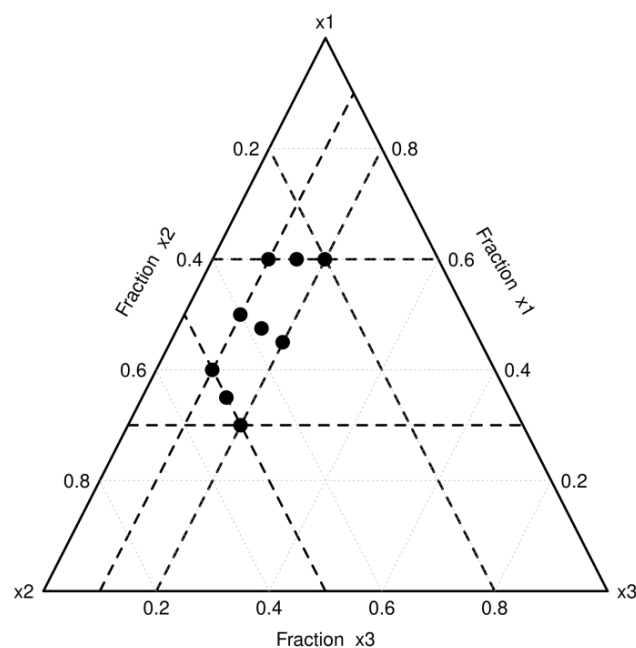
Para definir la combinación óptima de ingredientes del dulce enchilado a base de zanahoria, se construyó un diseño de mezclas de vértices extremos empleando el paquete 'mixexp' de R. Se seleccionaron tres componentes (zanahoria, chile y sal) y se establecieron límites superiores e inferiores para cada uno con el fin de acotar la región factible de formulación. El diseño se generó mediante la función 'Xvert', incorporando centroides de primer orden y evitando la creación automática de gráficos, lo que permitió controlar cada etapa del análisis [26].

Posteriormente, los componentes se codificaron para expresar sus proporciones en función de la masa total asignada a la mezcla (107 g), y el conjunto de corridas experimentales se aleatorizó ('set.seed') para asegurar reproducibilidad y minimizar posibles efectos asociados al orden de ejecución. La matriz final de experimentos se muestra en la Tabla 1.

La región experimental se visualizó mediante la función 'DesignPoints', la cual permitió representar los límites geométricos del diseño dentro del espacio tridimensional de mezcla (Figura 1).

**Tabla 1.** Matriz experimental del diseño de vértices extremos para la formulación de dulce enchilado a base de zanahoria

$x_1$	$x_2$	$x_3$	dimen	Zanahoria	Chile	Sal
0.6000	0.2000	0.2000	0	64.2000	21.4000	21.4000
0.3000	0.5000	0.2000	0	32.1000	53.5000	21.4000
0.6000	0.3000	0.1000	0	64.2000	32.1000	10.7000
0.4000	0.5000	0.1000	0	42.8000	53.5000	10.7010
0.6000	0.2500	0.1500	1	64.2000	26.7500	16.0500
0.3500	0.5000	0.1500	1	37.4500	53.5000	16.0500
0.5000	0.4000	0.1000	1	53.5000	42.8000	10.7010
0.4500	0.3500	0.2000	1	48.1500	37.4500	21.4000
0.4750	0.3750	0.1500	2	50.8250	40.1250	16.0500



**Figura 1.** Región experimental correspondiente al diseño de mezclas de vértices extremos para un dulce enchilado a base de zanahoria

### Análisis Sensorial

La evaluación sensorial fue realizada por 25 panelistas entrenados, todos ellos estudiantes de la Licenciatura en Química de Alimentos de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. Los panelistas fueron capacitados para evaluar el nivel de aceptabilidad general en el dulce enchilado a base de zanahoria. Las muestras se presentaron individualmente a los evaluadores en recipientes pequeños de plástico, etiquetados con códigos de tres dígitos. Los panelistas asignaron puntuaciones de 1 a 5 para la aceptabilidad general del

producto: 1 = Me disgusta mucho, 2 = No me gusta, 3 = No me gusta ni me disgusta, 4 = Me gusta y 5 = Me gusta mucho [27,28].

Cada formulación se elaboró una sola vez, sin réplicas de preparación, debido a limitaciones de recursos; sin embargo, cada formulación fue evaluada por 25 panelistas, generando observaciones independientes suficientes para estimar la variabilidad de la respuesta sensorial y ajustar el modelo de mezclas. En este estudio, la unidad experimental se consideró el panelista, no la repetición de la elaboración.

## Optimización de la mezcla

El análisis de mezclas se llevó a cabo en R empleando el paquete 'mixexp', con el fin de modelar la respuesta sensorial asociada al nivel de aceptabilidad general del dulce enchilado a base de zanahoria. El conjunto de factores correspondió a las proporciones de zanahoria en polvo ( $x_1$ ), chile en polvo ( $x_2$ ) y sal ( $x_3$ ), mientras que la variable de respuesta fue el puntaje del nivel general de aceptabilidad. A partir de los datos experimentales, se ajustó un modelo cúbico sin intercepto que incorporó los términos lineales, las interacciones binarias y la interacción ternaria propias de un diseño de mezclas de vértices extremos [27]. El modelo adoptado se muestra en la Ecuación 1.

$$Y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_{12} + \beta_{13} x_{13} + \beta_{23} x_{23} + \beta_{123} x_{123}$$

La elección de un modelo cúbico sin intercepto se fundamentó en las características geométricas del diseño de vértices extremos empleado. Las restricciones impuestas a las proporciones de los componentes generaron una región experimental poligonal e irregular, condición en la cual los modelos de orden inferior pueden no capturar adecuadamente la respuesta ni las interacciones propias de dominios no simpliciales [26]. En este tipo de diseños restringidos, la inclusión de términos cúbicos mejora la descripción de la estructura de la respuesta dentro del dominio factible y la capacidad predictiva local [26]. Aunque el experimento incluyó nueve formulaciones sin réplicas de preparación, la presencia de vértices, puntos sobre aristas y un punto interior proporcionó la estructura mínima necesaria para identificar los coeficientes del modelo cúbico, lo que da lugar a un diseño prácticamente saturado con un número reducido de grados de libertad para el error. En este sentido, el modelo se utiliza principalmente con fines descriptivos y de predicción local dentro del dominio experimental.

El ajuste se realizó mediante mínimos cuadrados ordinarios y su evaluación incluyó el análisis del ANOVA, la inspección de residuos, la distancia de Cook y pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) y heterocedasticidad (Breusch-Pagan). Con base en los coeficientes estimados, se generaron predicciones dentro de los límites experimentales establecidos ( $x_1$ : 0.30–0.60;  $x_2$ : 0.20–0.50;  $x_3$ : 0.10–0.20).

Para visualizar el comportamiento de la mezcla dentro del espacio experimental, se empleó la función 'ModelPlot', configurada para mostrar contornos de respuesta tanto en coordenadas reales como en coordenadas pseudo-componentes. Esta representación permitió identificar gradientes de aceptabilidad y zonas con alto desempeño sensorial.

En la etapa de optimización, el algoritmo L-BFGS-B se aplicó tratando el vector ( $x_1, x_2, x_3$ ) como variables continuas acotadas, utilizando como función objetivo la predicción del modelo (el nivel de aceptabilidad general). Las restricciones se establecieron como cajas independientes para cada componente:  $x_1 \in [0.30, 0.60]$ ,  $x_2 \in [0.20, 0.50]$  y  $x_3 \in [0.10, 0.20]$ , sin imponer la condición de suma unitaria  $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ , dado que estas proporciones representan fracciones acotadas de una formulación previa y no un simplex normalizado. Esta configuración define un problema de optimización con límites de caja, para el cual L-BFGS-B es adecuado y se ha empleado en formulaciones alimentarias donde los factores composicionales operan dentro de intervalos prefijados [29]. El procedimiento evaluó combinaciones factibles dentro del dominio experimental y determinó el vector ( $x_1, x_2, x_3$ ) que maximizaba la aceptabilidad prevista.

Finalmente, se construyó una gráfica de "Nivel de aceptabilidad general observado vs. ajustado" para evaluar el desempeño del modelo, a partir de la cual se estimaron el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el error absoluto medio (MAE) [30].

## Resultados y Discusión

### Desempeño del modelo de mezclas

Dado el número limitado de formulaciones (nueve corridas para siete parámetros del modelo cúbico especial) y el carácter prácticamente saturado del diseño, desde el inicio del análisis se consideró la posibilidad de sobreajuste, por lo que los indicadores de ajuste se interpretaron con cautela. La literatura reciente ha mostrado que, en diseños de mezclas y modelos cúbicos aplicados a formulaciones alimentarias, los términos lineales suelen explicar la mayor parte de la variabilidad, mientras que las interacciones, aun sin significancia individual, pueden aportar información útil sobre la direccionalidad de los efectos y mejorar la capacidad predictiva del modelo [31–33]. Bajo este enfoque, los coeficientes del modelo cúbico ajustado para el dulce enchilado a base de zanahoria permiten interpretar la estructura de las relaciones entre componentes: los coeficientes binarios positivos sugieren sinergias potenciales entre pares de ingredientes, mientras que el coeficiente ternario negativo refleja un patrón más complejo en la mezcla cuando intervienen simultáneamente los tres componentes. No obstante, ninguno de los coeficientes alcanzó significancia

estadística ( $p > 0.05$ ; Tabla 2), por lo que estas interpretaciones deben asumirse como exploratorias y circunscritas al dominio experimental evaluado.

En el análisis de varianza por términos (Tabla 3), los efectos lineales de zanahoria ( $x_1$ ) y mezcla de chiles ( $x_2$ ) concentraron la mayor parte de la suma de cuadrados y resultaron estadísticamente significativos, lo que indica que estos componentes explican la fracción dominante de la variación en la aceptabilidad, en concordancia con estudios donde los componentes principales estructuran el comportamiento del sistema [34,35]. La aparente discrepancia entre la significancia de  $x_1$  y  $x_2$  en el ANOVA y la falta de significancia de sus coeficientes individuales se explica por la forma en que se particiona la varianza en un diseño casi saturado: el ANOVA evalúa el aporte conjunto de cada término sobre la respuesta, mientras que las pruebas t de los coeficientes se ven afectadas por los escasos grados de libertad residuales ( $gl = 2$ ) y por la colinealidad inherente a los modelos de mezclas, lo que incrementa la incertidumbre de las estimaciones. Aunque los términos de interacción no fueron significativos de manera individual, su inclusión mantuvo un buen equilibrio entre varianza explicada y error residual, lo cual es consistente con investigaciones donde las interacciones aportan estructura sin modificar la relevancia de los efectos principales [36].

La comparación entre la suma de cuadrados del modelo y la del residuo mostró una relación favorable, lo que indica que la variabilidad explicada supera ampliamente al error no explicado. El error estándar residual obtenido se considera aceptable dentro de la escala sensorial evaluada y se alinea con estudios donde la magnitud del error resulta compensada por la estabilidad y la capacidad explicativa del modelo [33]. Además, el elevado valor de  $R^2$  (0.9995) y el  $R^2$  ajustado (0.9979) refleja un ajuste aparente muy alto sobre los datos experimentales; sin embargo, en un diseño con nueve corridas y solo dos grados de libertad residuales, estos valores tienden a estar inflados por el carácter casi saturado del modelo y, por tanto, deben interpretarse con cautela y como indicadores de desempeño local más que como evidencia de un ajuste perfecto (Tabla 4).

El estadístico F global confirmó que el modelo es útil para describir el nivel de aceptabilidad general dentro del conjunto de formulaciones ensayadas, aunque su capacidad de generalización más allá del dominio experimental es necesariamente limitada. Estos elementos sugieren que el modelo cúbico especial captura las tendencias principales de la respuesta sensorial en la región estudiada, pero sus predicciones deben entenderse como válidas principalmente a nivel local y requerirían validación adicional antes de extrapolarse fuera del espacio de formulaciones evaluado.

**Tabla 2.** Coeficientes del modelo cúbico especial del nivel de aceptabilidad general

Término	Coeficiente	Error estándar	Valor t	Valor p
$x_1$ (Zanahoria)	-30.99	233.65	-0.133	0.907
$x_2$ (Chile)	-101.85	347.71	-0.293	0.797
$x_3$ (Sal)	-646.43	1774.08	-0.364	0.750
$x_1:x_2$ (Zanahoria ×Chile)	821.77	1148.02	0.716	0.548
$x_1:x_3$ (Zanahoria ×Sal)	1878.54	3351.59	0.560	0.632
$x_2:x_3$ (Chile×Sal)	2514.34	3938.34	0.638	0.589
$x_1:x_2:x_3$ (Interacción ternaria)	-5905.13	6473.70	-0.912	0.458

**Tabla 3.** Análisis de varianza (ANOVA) del modelo cúbico especial

Fuente de variación	gl	Suma de cuadrados	Cuadras dos medios	Valor F	Valor p
$x_1$ (Zanahoria)	1	114700	114700	3984.07	<0.001**
$x_2$ (Chile)	1	6292	6292	218.56	0.0045**
$x_3$ (Sal)	1	163	163	5.65	0.1407
$x_1:x_2$ (Zanahoria ×Chile)	1	23	23	0.82	0.4617
$x_1:x_3$ (Zanahoria ×Sal)	1	1	1	0.03	0.8745
$x_2:x_3$ (Chile×Sal)	1	8	8	0.27	0.6561
$x_1:x_2:x_3$ (Interacción ternaria)	1	24	24	0.83	0.4580
Residuales	2	58	29		
Total	8	121269			

**Tabla 4.** Métricas de bondad de ajuste del modelo cúbico especial

Métrica	Valor
$R^2$	0.9995
$R^2$ ajustado	0.9979
Error estándar residual	5.366
Estadístico F global	601.5
p-valor global	0.001661

### Verificación de supuestos del modelo

La verificación de supuestos se centró en independencia, normalidad, homocedasticidad y presencia de observaciones influyentes, utilizando gráficos de diagnóstico y pruebas estadísticas estándar en estudios de formulación de alimentos [37–39].

Como se muestra en la Figura 2:

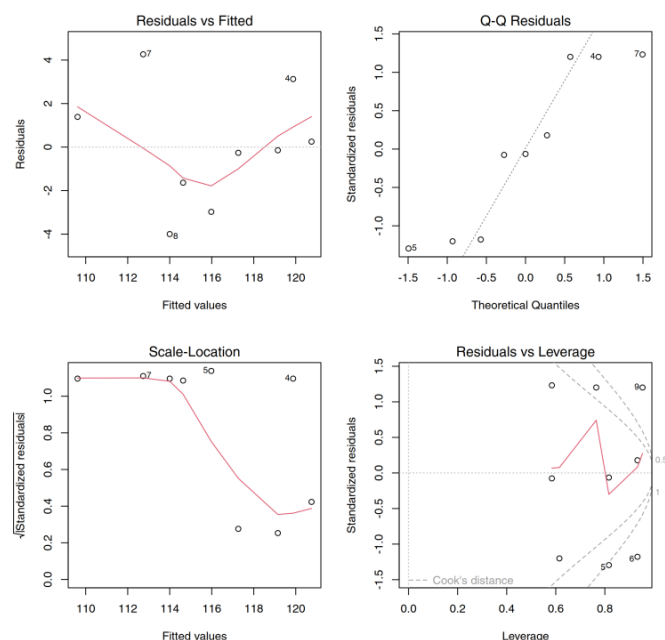
La independencia de los errores se apoyó en la aleatorización de la evaluación sensorial y en el gráfico de residuos frente a valores ajustados, donde los puntos se distribuyeron sin patrones sistemáticos alrededor de cero.

La normalidad de los residuos se evaluó mediante la prueba de Shapiro–Wilk ( $W = 0.975$ ;  $p = 0.93$ ), que no aportó evidencia para rechazar el supuesto de normalidad, y mediante el gráfico Q–Q, en el que los puntos se alinearon razonablemente con la recta teórica, con desviaciones moderadas en los extremos.

La homocedasticidad se analizó con la prueba de Breusch–Pagan ( $p = 0.24$ ) y con el gráfico de escala–ubicación. Aunque se observó un ligero incremento en la dispersión de los residuos a valores ajustados altos, la variación fue moderada y no se identificaron violaciones graves de la constancia de varianza.

La presencia de observaciones influyentes se examinó mediante el gráfico de residuos frente a apalancamiento y la distancia de Cook. Ningún punto superó los umbrales habituales de influencia excesiva; un residuo estandarizado cercano a 3 se consideró destacable, pero no distorsionó de forma relevante los parámetros del modelo.

Estos diagnósticos indican que, dentro de las limitaciones impuestas por el número reducido de corridas y el diseño casi saturado, el modelo cúbico especial cumple de manera razonable los supuestos básicos para una interpretación coherente de los efectos y para generar predicciones localmente estables sobre la aceptabilidad del dulce enchilado a base de zanahoria.



**Figura 2.** Gráficos de diagnóstico del modelo de regresión lineal.

(2a) Gráfico de residuos frente a valores ajustados (2b) Gráfico Q–Q de los residuos estandarizados (2c) Gráfico de escala–ubicación (scale–location) (2d) Gráfico de residuos frente a apalancamiento, incluyendo las curvas de distancia de Cook.

### Gráficos de contorno y efectos de mezcla

El uso combinado de diseños de mezclas y metodología de superficie de respuesta permite visualizar cómo las proporciones de los ingredientes modulan los atributos sensoriales y la aceptación del producto, mediante gráficos de contorno y ternarios que delimitan regiones óptimas de formulación [40–42]. En este estudio, los gráficos obtenidos a partir del modelo cúbico especial describen la relación entre zanahoria ( $x_1$ ), chile ( $x_2$ ) y sal ( $x_3$ ) y la aceptabilidad general del dulce enchilado a base de zanahoria, de forma análoga a lo reportado en formulaciones de barras de fruta, panes y productos emulsionados donde los contornos de respuesta se utilizan para localizar combinaciones con mayor agrado sensorial [43,44].

En el espacio real de componentes (Figura 3), los contornos muestran que las predicciones más altas se concentran en una franja próxima al vértice de zanahoria, donde  $x_1$  adopta valores elevados y se combina con niveles moderados de sal y proporciones contenidas de chile. Hacia las zonas donde se incrementa la fracción de chile y sal de forma simultánea, los contornos se desplazan hacia valores menores de respuesta, lo que sugiere que la pungencia excesiva y un sabor salado dominante reducen la aceptabilidad. De forma complementaria, el gráfico en el espacio de pseudo–componentes (Figura 4) confirma que la región experimental favorable se orienta hacia el vértice de alta zanahoria, con un corredor de valores intermedios de sal y niveles de chile acotados, lo que indica que la maximización de la respuesta se logra dentro de un

dominio restringido de proporciones balanceadas. Este patrón es consistente con estudios donde las superficies de respuesta delimitan áreas de alta aceptación en torno a combinaciones específicas de ingredientes más que a extremos de formulación [40,41].

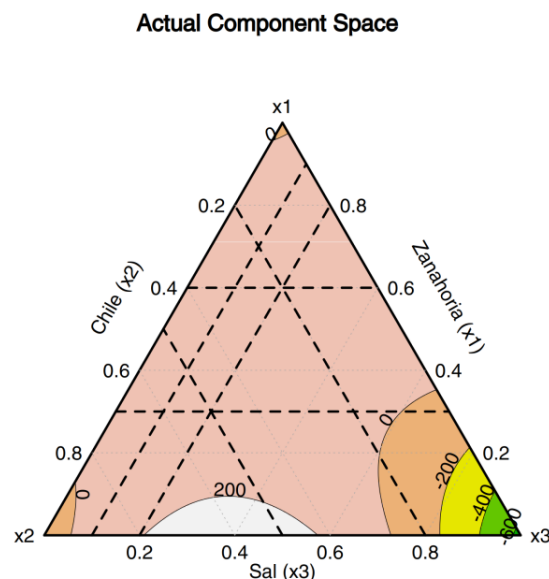
A partir de los contornos en el espacio real y en el de pseudo componentes, la región favorable puede cuantificarse dentro de un corredor delimitado por aproximadamente  $x_1 = 0.50-0.60$ ,  $x_2 = 0.20-0.30$  y  $x_3 = 0.10-0.15$ . Dentro de este intervalo, las predicciones superan el resto del dominio experimental y se concentran alrededor de combinaciones con alta zanahoria, chile moderado y sal controlada. Esta delimitación coincide con el óptimo numérico obtenido mediante L-BFGS-B, cuya solución se ubicó dentro de la misma región, lo que refuerza la consistencia entre la exploración gráfica y la optimización del modelo.

Dentro de las nueve formulaciones experimentales evaluadas, únicamente dos mezclas se ubicaron dentro del corredor identificado como región favorable ( $x_1 \approx 0.50-0.60$ ,  $x_2 \approx 0.20-0.30$ ,  $x_3 \approx 0.10-0.15$ ). Estas correspondieron a las combinaciones (0.60, 0.30, 0.10) y (0.60, 0.25, 0.15), con niveles de aceptabilidad de 113 y 117, respectivamente. Ninguna de las formulaciones ensayadas coincidió con el punto óptimo predicho por el modelo, lo cual es consistente con el carácter exploratorio del diseño casi saturado y con el hecho de que el óptimo se localiza en una región del espacio experimental que no fue muestreada directamente. Esta discrepancia refuerza la interpretación del valor óptimo como una estimación del modelo que requiere validación experimental adicional.

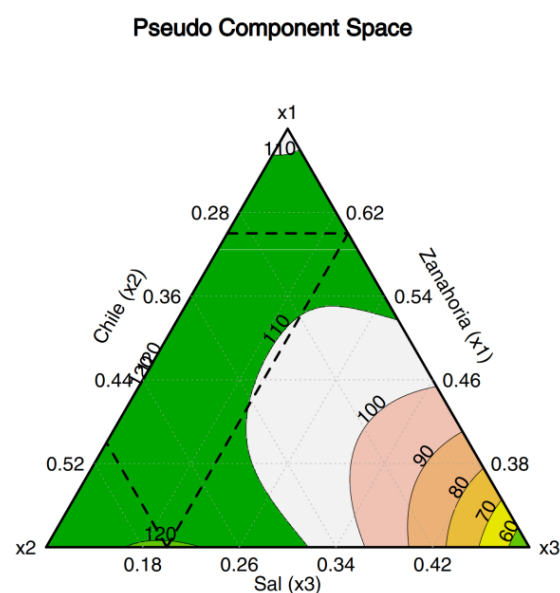
El gráfico de efectos en dirección de Piepel (Figura 5) permite interpretar cómo cambia la respuesta, el nivel de aceptabilidad general, cuando cada componente se desvía del centróide de la mezcla, manteniendo constantes las proporciones relativas de los demás. La curva asociada a la zanahoria ( $x_1$ ) muestra un comportamiento curvilíneo donde la respuesta aumenta al alejarse del centróide hacia proporciones mayores, lo que refuerza el papel de  $x_1$  como contribuyente principal a la aceptabilidad. En el caso del chile ( $x_2$ ), la respuesta decrece cuando se reduce su proporción alrededor del centróide y aumenta al desplazarse hacia niveles más altos, aunque el rango de mejora es más acotado, lo que sugiere que el efecto positivo se obtiene en un intervalo estrecho antes de que la pungencia resulte dominante. La sal ( $x_3$ ) presenta una tendencia opuesta: los valores de respuesta disminuyen cuando se incrementa su proporción respecto al centróide y mejoran cuando  $x_3$  se reduce, lo que indica que este componente debe mantenerse en niveles bajos a intermedios para evitar un perfil de sabor plano en concentraciones muy bajas o excesivamente salado en concentraciones altas.

Por lo tanto, los gráficos de contorno y de efectos confirman que la región de mayor aceptabilidad se asocia a formulaciones con alta proporción de zanahoria, cantidades moderadas de chile y sal controlada dentro de un rango intermedio, en concordancia con la evidencia

reciente que señala a los diseños de mezclas y a la metodología de superficie de respuesta como herramientas eficaces para delinear ventanas óptimas de formulación basadas en atributos sensoriales [41–43].

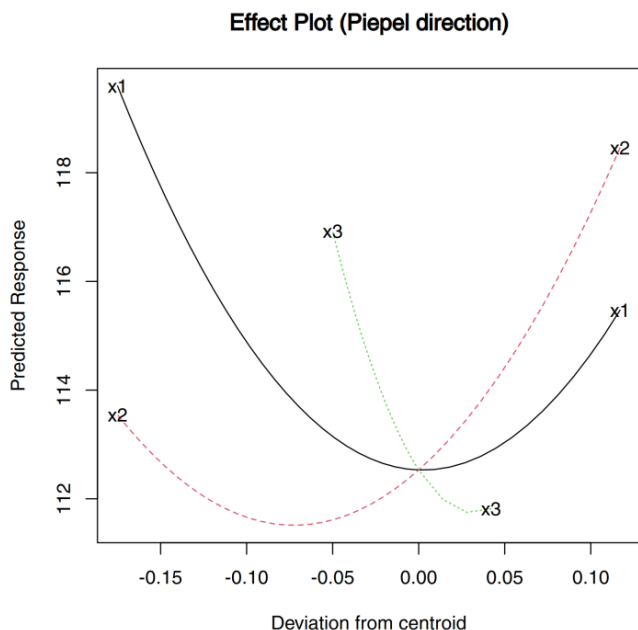


**Figura 3.** Espacio real



**Figura 4.** Espacio de pseudo-componentes





**Figura 5.** Gráfico de efectos en la dirección de Piepel

### Relación del nivel de aceptabilidad general observado frente al ajustado

La comparación entre los valores observados y predichos permite evaluar la capacidad del modelo para generalizar más allá del conjunto de entrenamiento, aspecto ampliamente discutido en estudios que aplican diseños de mezclas y metodología de superficie de respuesta para predecir atributos sensoriales [45,46]. En este caso, el análisis gráfico muestra un desempeño predictivo moderado y limitado por el tamaño del diseño, con un  $R^2$  de validación de 0.649, valor marcadamente inferior al  $R^2$  del ajuste completo (0.9995). Este contraste marcado no se interpreta como un conflicto interno del modelo, sino como la consecuencia directa del carácter casi saturado del diseño ( $n = 9$  corridas para 7 parámetros) y de la escasez de grados de libertad, que tienden a inflar artificialmente el  $R^2$  de ajuste. En modelos de mezclas con muy pocos grados de libertad, el ajuste puede parecer casi perfecto mientras que la capacidad de predicción se mantiene solo moderada, patrón característico de escenarios con riesgo de sobreajuste en formulaciones alimentarias modeladas mediante RSM [47,48].

En este sentido, el sobreajuste observado se explica por cuatro factores concurrentes: (i) el número reducido de formulaciones experimentales ( $n = 9$ ), (ii) la ausencia de réplicas independientes que permitan estimar adecuadamente la variabilidad experimental, (iii) el uso de un modelo cúbico especial con siete parámetros para un diseño prácticamente saturado, y (iv) la estrechez de la región experimental, que limita la capacidad del modelo para aprender patrones generalizables. La combinación de estos elementos favorece ajustes aparentemente

perfectos dentro del conjunto de entrenamiento, pero una capacidad predictiva limitada frente a combinaciones no incluidas en el diseño. Este comportamiento es consistente con lo reportado en modelos de mezclas altamente parametrizados y con regiones factibles pequeñas, donde la generalización suele verse comprometida incluso cuando los valores de  $R^2$  son elevados [23,26].

Las métricas de error  $RMSE = 2.529$  y  $MAE = 2.006$  indican desviaciones promedio relevantes dentro de la escala hedónica de 1–5 puntos. Aunque magnitudes de este orden pueden observarse en estudios sensoriales preliminares, reflejan una capacidad predictiva moderada y restringida para valores extremos de aceptabilidad, especialmente cuando el sistema presenta una alta variabilidad sensorial o interacciones complejas entre ingredientes. La literatura reciente enfatiza que  $RMSE$  y  $MAE$  son métricas esenciales para evaluar la generalización de modelos en alimentos, siendo  $RMSE$  particularmente sensible a respuestas atípicas, lo que lo convierte en una medida útil para valorar el desempeño predictivo alcanzado [49,50].

El modelo ajustado entre valores observados y predichos mostró una pendiente de 1.0 y un intercepto no distinto de cero, lo que sugiere ausencia de sesgo sistemático. Sin embargo, la dispersión amplia de los residuos alrededor de la línea de perfecta predicción señala una variabilidad que el modelo no logra explicar completamente. Este comportamiento ha sido reportado en sistemas alimentarios donde la complejidad de los ingredientes provoca que los modelos basados en RSM no alcancen valores altos de validación cruzada, incluso cuando el ajuste inicial es notablemente alto [48,51].

La validación interna basada en la relación observados–predichos confirma que la inclusión de términos cúbicos, aunque útil para capturar interacciones no lineales entre componentes, puede reducir la robustez predictiva cuando se cuenta con un número limitado de formulaciones experimentales. Esto coincide con evidencia que señala que los modelos altamente parametrizados tienden a perder capacidad de generalización si la estructura experimental no es suficientemente amplia [52]. Aun así, el modelo conserva utilidad práctica al permitir identificar regiones específicas del espacio experimental con alta probabilidad de aceptabilidad, lo cual favorece decisiones de formulación dentro de dominios bien caracterizados [53].

Los resultados respaldan la necesidad de equilibrar complejidad e interpretabilidad en modelos destinados a predecir atributos sensoriales, integrando métricas de ajuste y validación que permitan valorar adecuadamente su capacidad de generalización. La literatura reciente coincide en que este tipo de evaluación es indispensable para utilizar diseños de mezclas en la optimización de productos alimentarios con bases sensoriales sólidas y una capacidad predictiva necesariamente limitada por el número de formulaciones disponibles [45,46,52].



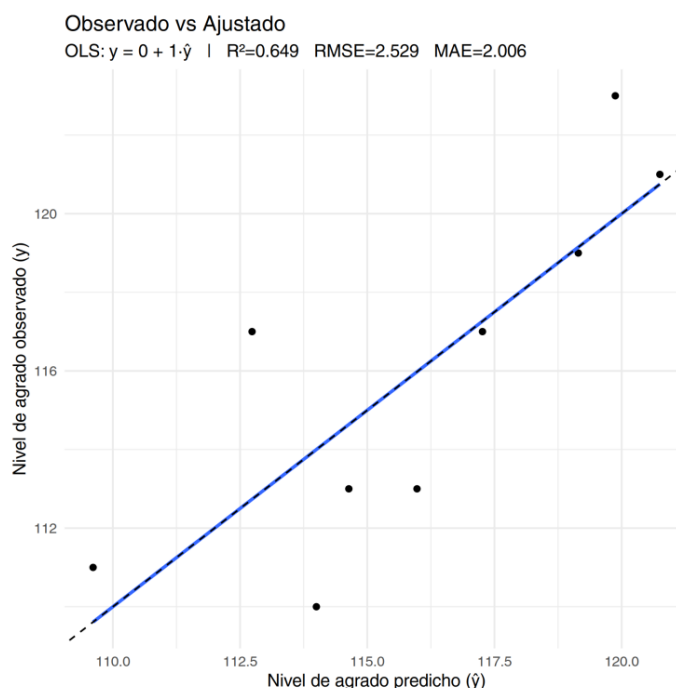


Figura 6. Valores observados contra predichos.

### Mezcla óptima para la formulación

La optimización de mezclas mediante RSM y algoritmos numéricos permite orientar la búsqueda hacia combinaciones con aceptabilidad potencial, siempre que se respeten las restricciones de suma unitaria y se verifique la factibilidad experimental de los puntos óptimos [45,54,55]. En este estudio, la búsqueda con el algoritmo L-BFGS-B arrojó como solución una formulación con 64.2 g de polvo de zanahoria ( $x_1$ ), 53.5 g de mezcla de chiles ( $x_2$ ) y 10.7 g de sal ( $x_3$ ) para una fase sólida declarada de 107 g. La suma de los componentes (128.4 g) excede el total especificado, lo que indica que esta solución es no factible como mezcla porque, en la etapa de optimización numérica, no se impuso explícitamente la restricción  $x_1 + x_2 + x_3 = 1$  que sí define la región experimental. En otras palabras, el algoritmo encontró un máximo fuera del simplex de mezclas y, por tanto, la solución “óptima” debe interpretarse como un artefacto de la optimización sin la restricción de suma unitaria [45,55].

El valor de aceptabilidad predicho para esta combinación ( $\hat{y} = 173.65$ ) se encuentra muy por encima del rango de la escala hedónica utilizada (1–5). Este resultado no representa una estimación sensorial real, sino un artefacto matemático generado por la extrapolación del modelo fuera del espacio experimental, amplificado por los términos cúbicos del modelo y por la ausencia de la restricción de suma en la etapa de optimización. La literatura señala que, cuando los algoritmos exploran regiones alejadas de los puntos experimentales o fuera del simplex de mezclas, es común que se produzcan valores inflados que carecen de interpretación física o

sensorial [54,56]. Por ello, este valor debe considerarse únicamente como una consecuencia numérica del proceso de optimización y no como una predicción sensorial plausible.

Aun con estas limitaciones, la solución propuesta por el algoritmo aporta información útil sobre la dirección de mejora dentro del espacio de mezclas estudiado, más que una formulación óptima en sentido estricto. La proximidad del punto óptimo numérico a formulaciones con altos contenidos de zanahoria y cantidades controladas de chile y sal coincide con las tendencias observadas en los gráficos de contorno y con el comportamiento esperado en productos donde el equilibrio entre dulzor, pungencia y salinidad condiciona la aceptación sensorial. En trabajos futuros será necesario reformular el problema de optimización como un verdadero problema de mezclas, imponiendo explícitamente la restricción  $x_1 + x_2 + x_3 = 1$  y restringiendo la búsqueda únicamente al simplex definido por los vértices experimentales. Asimismo, será importante incrementar el número de formulaciones y, de ser posible, incorporar réplicas de preparación y evaluación sensorial, de modo que el modelo disponga de más grados de libertad, reduzca el riesgo de sobreajuste y mejore su robustez. Dada la cantidad de datos disponible, también resultará pertinente evaluar si un modelo cuadrático especial podría describir adecuadamente el sistema, ofreciendo una alternativa más parsimoniosa al modelo cúbico utilizado. Estas acciones, combinadas con una validación experimental de las combinaciones sugeridas, permitirán consolidar formulaciones óptimas con una capacidad predictiva moderada pero mejor sustentada estadísticamente [45,54,56].

### Conclusiones y perspectivas

El estudio utilizó un diseño de mezclas de vértices extremos para describir cómo las proporciones de zanahoria, mezcla de chiles y sal influyen en el nivel de aceptabilidad general de un dulce enchilado a base de zanahoria. El modelo cúbico especial permitió identificar una región del espacio de mezclas asociada con una mayor probabilidad de agrado sensorial y proporcionó una lectura estructurada de las tendencias de respuesta dentro del dominio experimental. Sin embargo, la solución “óptima” obtenida mediante optimización numérica no respetó las restricciones de mezcla y generó valores de respuesta fuera de la escala sensorial empleada, lo que evidenció sobreestimación y una capacidad predictiva moderada y limitada por el tamaño reducido y el carácter casi saturado del diseño. En este sentido, los resultados no permiten afirmar que la formulación haya sido optimizada en sentido estricto, sino que contribuyen a delimitar una zona del espacio experimental con mayor probabilidad de aceptación, que deberá ser explorada y afinada en estudios posteriores.

En cuanto a las perspectivas, será necesario ampliar el número de formulaciones y, de ser posible, incorporar réplicas de preparación y de evaluación sensorial para

aumentar los grados de libertad, mejorar la robustez del modelo y reducir el riesgo de sobreajuste. La reformulación del problema de optimización como un verdadero problema de mezclas, imponiendo explícitamente la restricción de suma unitaria ( $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ ) y restringiendo la búsqueda al simplex definido por las formulaciones experimentales, constituye un paso clave para obtener soluciones numéricas factibles. De manera complementaria, la validación sensorial experimental de las combinaciones sugeridas por el modelo será indispensable para confirmar su desempeño real antes de plantear aplicaciones a escala productiva.

Futuras investigaciones deberían considerar también una optimización multirrespuesta que integre, además de la aceptabilidad general, atributos como textura, color, intensidad de pungencia y parámetros tecnológicos relevantes, de modo que la toma de decisiones se base en un compromiso explícito entre desempeño sensorial y comportamiento tecnológico. La evaluación de modelos de menor complejidad, como un modelo cuadrático especial ajustado a un diseño ampliado, podría ofrecer alternativas más parsimoniosas y con mejor capacidad de generalización. En conjunto, estas líneas de trabajo permitirán avanzar desde la identificación de una zona de formulación con mayor probabilidad de aceptación hacia el desarrollo y validación de productos de confitería vegetal con perfiles sensoriales equilibrados y fundamentos estadísticos más sólidos.

## Referencias

- [1] Valero-Cases E, Frutos MJ, Pérez-Llamas F. Development of synbiotic vegan beverages: probiotic viability, sensory profile, consumers' acceptance and functional stability. *Int J Food Sci Technol*. 2023;58(5):2325-35.
- [2] Yu J, Park SJ, Lee HJ. Physicochemical Properties and Sensory Evaluation of Low-Sugar Collagen Jelly Using Fruit and Vegetable Powder. *Foods*. enero de 2025;14(19):3407.
- [3] Haas K, Robben P, Kiesslich A, Volkert M, Jaeger H. Stabilization of Crystalline Carotenoids in Carrot Concentrate Powders: Effects of Drying Technology, Carrier Material, and Antioxidants. *Foods*. agosto de 2019;8(8):285.
- [4] Park JJ, Olawuyi IF, Park GD, Lee WY. Effects of gelling agents and sugar substitutes on the quality characteristics of carrot jelly. *Food Sci Preserv*. 2021;28(4):469-79.
- [5] Gangawane H, Todkar A, Adil S, Rana K, Bodhankar H. Development and Evaluation of a Functional Fiber-rich Bar Incorporating Lotus Stem and Carrot Pomace. *Eur J Med Plants*. abril de 2025;36(3):30-9.
- [6] Hernández-Ortega M, Kissangou G, Necoechea-Mondragón H, Sánchez-Pardo ME, Ortiz-Moreno A. Microwave dried carrot pomace as a source of fiber and carotenoids. 2013;
- [7] Olawuyi IF, Lee WY. Quality and antioxidant properties of functional rice muffins enriched with shiitake mushroom and carrot pomace. *Int J Food Sci Technol*. 2019;54(7):2321-8.
- [8] Luca MI, Ungureanu-Iuga M, Mironeasa S. Carrot Pomace Characterization for Application in Cereal-Based Products. *Appl Sci*. enero de 2022;12(16):7989.
- [9] Martins GAR, Augusto PPC, Luccas V, André Bolini HM. Assessing the temporal profile and liking of sugar-free spicy dark chocolates with different concentrations of Capsicum baccatum pepper and rebaudioside A. *J Sci Food Agric* [Internet]. 2025 [citado 18 de noviembre de 2025]; Disponible en: <https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jsfa.14327>
- [10] Tarigan EB, Hardianti CA, Rifqi M. Exploring the Sensory Profile of Stevia Coffee Using Rate-All-That-Apply (RATA) Method and Chemical Analysis. *Indones J Appl Res IJAR*. 2024;5(1):48-63.
- [11] Ludy MJ, Mattes RD. The effects of hedonically acceptable red pepper doses on thermogenesis and appetite. *Physiol Behav*. 2011;102(3-4):251-8.
- [12] Swint J, Beining K, Bryant J, Tucker R, Ludy MJ. Capsaicin and Capsiate: Comparison of Effects at a Traditional Meal. *FASEB J*. 2015;29:924-11.
- [13] Capitano A, Lucci G, Tommasi L. Mixing taste illusions: the effect of miraculin on binary and trinary mixtures. *J Sens Stud*. 2011;26(1):54-61.
- [14] Yılmaz E, Keskin Uslu E. Physicochemical, Rheological, and Sensory Properties of Low-Fat Mayonnaises Formulated With Flaxseed Oil-Based Sunflower and Whale Wax Oleogels. *J Am Oil Chem Soc* [Internet]. 2025 [citado 18 de noviembre de 2025]; Disponible en: <https://aocs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aocs.70013>
- [15] Yuniarti T, Prayudi A, Setiarto RHB, Martosuyono P, Supenti L, Suhrawardan H, et al. Formulation and organoleptic characteristics of flavor enhancer from shrimp head protein hydrolysate. *Food Res*. 2024;8(1):148-59.
- [16] Li Y, Zhang Y, Wang M, Jiang L, Sui X. Simplex-centroid mixture design applied to the aqueous enzymatic extraction of fatty acid-balanced oil from mixed seeds. *J Am Oil Chem Soc*. 2013;90(3):349-57.
- [17] Galvan D, Effting L, Cremasco H, Conte-Junior CA. Recent Applications of Mixture Designs in Beverages, Foods, and Pharmaceutical Health: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Foods*. 20 de agosto de 2021;10(8):1941.
- [18] Squeo G, De Angelis D, Leardi R, Summo C, Caponio F. Background, Applications and Issues of the Experimental Designs for Mixture in the Food Sector. *Foods*. mayo de 2021;10(5):1128.
- [19] Carboni AD, Puppo MC, Ferrero C. Gluten-free lentil cakes with optimal technological and nutritional characteristics. *J Sci Food Agric*. 2024;104(10):6298-310.
- [20] Malvano F, Laudisio M, Albanese D, d'Amore M, Marra F. Olive Oil-Based Oleogel as Fat Replacer in a Sponge Cake: A Comparative Study and Optimization. *Foods*. 31 de agosto de 2022;11(17):2643.
- [21] Zhang Y, Shen Y, Ding J, Zhou H, Zhao H, Cheng H, et al. Optimization of Microbial Consortium Formulation for Oily Food Waste Composting Using Mixture Design Methodology. *Microorganisms*. 2025;13(9):2066.
- [22] Parthasarathi S, Anandharamakrishnan C. Modeling of shrinkage, rehydration and textural changes for food structural analysis: A review. *J Food Process Eng*. 2014;37(2):199-210.
- [23] Miani M, Dunnhofer M, Rondinella F, Manthos E, Valentin J, Micheloni C, et al. Bituminous Mixtures Experimental Data Modeling Using a Hyperparameters-Optimized Machine Learning Approach. *Appl Sci*. enero de 2021;11(24):11710.
- [24] Mondal IH, Rangan L, Uppaluri RV. Process-product characteristics of tray-dried Benincasa hispida. *J Food Process Preserv*. 2020;44(9):e14697.

- [25] Navarrete Juarez B, García Curiel L, Pérez Flores JG, Contreras López E, Pérez Escalante E, Escobar Ramírez MC, et al. Optimización del nivel de aceptabilidad de un dulce de apio. *Arando UTIC*. 11 de septiembre de 2024;11(2):358-78.
- [26] Lawson J, Willden C. Mixture Experiments in R Using mixexp. *J Stat Softw* [Internet]. 2016 [citado 20 de febrero de 2025];72(Code Snippet 2). Disponible en: <http://www.jstatsoft.org/v72/c02/>
- [27] Cruz-Enriquez JA, García-Curiel L, Pérez-Flores JG, Contreras-López E, Pérez-Escalante E, Soto-Vega K, et al. Lemon-Flavored Gummy Candies: Sourness, Flavor and Overall Acceptance Optimization Using Lattice-Simplex Mixture Design Implemented with Python Programming Language. En: *The 5th International Electronic Conference on Foods* [Internet]. MDPI; 2025 [citado 21 de noviembre de 2025]. p. 41. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2673-9976/40/1/41>
- [28] Sotomayor A, Pitizaca S, Sánchez M, Burbano A, Díaz A, Nicolalde J, et al. Evaluación físico química de fruta de pitahaya *Selenicereus megalanthus* en diferentes estados de desarrollo. *Enfoque UTE*. marzo de 2019;10(1):89-96.
- [29] Nikolovski BG, Ilić JD, Sovilj MN. How to Formulate a Stable and Monodisperse Water-in-Oil Nanoemulsion Containing Pumpkin Seed Oil: The Use of Multiobjective Optimization. *Braz J Chem Eng*. diciembre de 2016;33(4):919-31.
- [30] Wanyonyi M, Kiluyi JW, Okango AA. Optimization of a Functional Beverage Formulation Using a Constrained Mixture Design with Multiple Responses. *Asian J Probab Stat*. 1 de enero de 2025;27(1):1-16.
- [31] Cuevas J, Reslow F, Crossa J, Ortiz R. Modeling genotype × environment interaction for single and multitrait genomic prediction in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Jannink JL*, editor. *G3*. 9 de febrero de 2023;13(2):jkac322.
- [32] 32. Kodili EG, Elechi ON. Evaluation and Optimization of the Physical and Sensory Properties of Enhanced Bread Produced From Wheat Flour and Chemically Modified African Yam Bean and Cassava Starches. *Int J Res Sci Innov*. 2022;09(04):110-23.
- [33] 33. Qi NP, Ibrahim NH, Hasim AS. Effect of Pea Protein Isolate, Carboxymethyl Cellulose, Pectin and Their Interaction on Physicochemical and Oxidative Stability of Oil-in-Water Emulsions. *Univ Malays Teren J Undergrad Res*. 30 de abril de 2019;1(2):8-18.
- [34] Frank B. The formation of consumer attitudes and intentions towards fast food restaurants: How do teenagers differ from adults? *Manag Serv Qual Int J*. 11 de mayo de 2012;22(3):260-82.
- [35] Godstime I. Sustainable Energy from Waste: Experimental Investigation and Optimization of Hybrid Biomass Briquette Production Using a Modified Briquetting Machine [Internet]. In *Review*; 2025 [citado 21 de noviembre de 2025]. Disponible en: <https://www.researchsquare.com/article/rs-7909513/v1>
- [36] Sadiq FA, De Reu K, Burmølle M, Maes S, Heyndrickx M. Synergistic interactions in multispecies biofilm combinations of bacterial isolates recovered from diverse food processing industries. *Front Microbiol*. 13 de abril de 2023;14:1159434.
- [37] 37. Michael HU, Rapulana AM, Smit T, Xulu N, Danaviah S, Ramlall S, et al. The Association Between Serum Mature and Precursor Brain-Derived Neurotrophic Factor and Neurocognitive Function in People With Human Immunodeficiency Virus: A Longitudinal Study. *Open Forum Infect Dis*. 30 de julio de 2024;11(8):ofae463.
- [38] Ronquillo CE, Dahinten VS, Bungay V, Currie LM. Differing Effects of Implementation Leadership Characteristics on Nurses' Use of mHealth Technologies in Clinical Practice: Cross-Sectional Survey Study. *JMIR Nurs*. 25 de agosto de 2023;6:e44435.
- [39] Smith RA, Brown MG, Schiltz JJ, Sowl S, Schulz JM, Grady KA. The Value of Interpersonal Network Continuity for College Students in Disruptive Times. *Innov High Educ*. agosto de 2023;48(4):719-38.
- [40] Jeradechachai T, Hall C. Development of a gluten-free bread with added heat-treated yellow pea flour: Application of response surface methodology. *Cereal Chem*. enero de 2024;101(1):85-98.
- [41] Mahawar MK, Jalgaonkar K, Bibwe B, Kulkarni T, Bhushan B, Meena VS. Optimization of mixed aonla-guava fruit bar using response surface methodology. *Nutr Food Sci*. 10 de julio de 2018;48(4):621-30.
- [42] Patel M, Lee R, Merchant EV, Juliani HR, Simon JE, Tepper BJ. Descriptive aroma profiles of fresh sweet basil cultivars (*Ocimum spp.*): Relationship to volatile chemical composition. *J Food Sci*. julio de 2021;86(7):3228-39.
- [43] Prabsangob N, Hangsalad S, Udomrati S. Okra cellulose crystals stabilized Pickering emulsion: A practical tool for soybean oil inclusion to improve nutritive profile of sausages. *Food Chem X*. abril de 2025;27:102356.
- [44] Zhang J, Zhang R, Wang P, Wen P, Zhang W, Liu S, et al. Impact of chitosan on lipid digestion under simulated gastro-intestinal conditions. *Food Chem X*. octubre de 2025;31:103014.
- [45] Abasiokong KS, Nwabueze TU, Akobundu EN. Optimization of African Breadfruit Based Complementary Food Using Mixture Response Surface Methodology. *Asian Food Sci J*. 1 de abril de 2023;22(4):1-9.
- [46] Chandar AG, Sivasankari K, Lakshmi SL, Sugumaran S, Kannadhasan S, Balakumar S. An innovative smart agriculture system utilizing a deep neural network and embedded system to enhance crop yield. *Multidiscip Sci J*. 13 de noviembre de 2023;6(5):2024063.
- [47] Li A, Yang K. Digital Phenotyping of Sensation Seeking: A Machine Learning Approach Using Gait Analysis. *Behav Sci*. 9 de septiembre de 2025;15(9):1222.
- [48] Xu HR, Zhang YQ, Wang S, Wang WD, Yu NN, Gong H, et al. Optimization of functional compounds extraction from Ginkgo biloba seeds using response surface methodology. *Qual Assur Saf Crops Foods*. 5 de abril de 2022;14(1):102-12.
- [49] Lv R, Zuo C, Tu K, Pan L, Liu L, Peng J. Optimizing chitosan-enriched salicylic acid coating to extend the shelf-life of fresh-cut radishes using response surface methodology. *Food Bioeng*. diciembre de 2023;2(4):328-38.
- [50] Tang Z, Chen Z, Gao Y, Xue R, Geng Z, Bu Q, et al. A Strategy for the Acquisition and Analysis of Image-Based Phenome in Rice during the Whole Growth Period. *Plant Phenomics*. 2023;5:0058.
- [51] Rios F, Lobo M, Samman N. Acceptability of beehive products as ingredients in quinoa bars. *J Sci Food Agric*. enero de 2018;98(1):174-82.
- [52] 52. Gonçalves DM, Henriques R, Costa RS. Predicting metabolic fluxes from omics data via machine learning: Moving from knowledge-driven towards data-driven approaches. *Comput Struct Biotechnol J*. 2023;21:4960-73.
- [53] Yan J, Yan X, Hu S, Zhu H, Yan B. Comprehensive Interrogation on Acetylcholinesterase Inhibition by Ionic Liquids Using Machine Learning and Molecular Modeling. *Environ Sci Technol*. 2 de noviembre de 2021;55(21):14720-31.
- [54] Benitez LO, Petelin R, Malvasio M, Monetta D, Rasia M, Musumeci MA, et al. Rice bran oil-in-water optimized emulsions for the development of plant-based foods and beverages. *Explor Foods Foodomics*. 27 de febrero de 2024;2(1):67-82.
- [55] Peter EL, Sesazi CD. D-optimal mixture design optimized solid formulation containing fruits extracts of *Momordica charantia* and *Abelmoschus esculentus*. *Bhattarai A*, editor. *PLOS ONE*. 24 de junio de 2022;17(6):e0270547.
- [56] Oh E, Kim U, Lee BJ, Moon C. Multivariate Statistical Optimization of Tablet Formulations Incorporating High Doses of a Dry Herbal Extract. *Pharmaceutics*. 13 de febrero de 2019;11(2):79.