

<https://doi.org/10.69639/arandu.v11i2.272>

Optimización del nivel de aceptabilidad de un dulce de apio

Optimizing the acceptability level of a celery candy

Bibian Navarrete Juarez

bibiannavarrete@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-4662-885X>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Hidalgo – México

Laura García Curiel

laura.garcia@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-8961-2852>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Hidalgo – México

Jesús Guadalupe Pérez Flores

jesus_perez@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-9654-3469>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Hidalgo – México

Elizabeth Contreras López

elizac@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-9678-1264>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Hidalgo – México

Emmanuel Pérez Escalante

emmanuel_perez@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-4268-9753>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Hidalgo – México

Meyli Claudia Escobar Ramírez

meylic@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8334-1331>

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
Querétaro – México

Gabriela Sánchez Olguín

gabrielasanchez@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-8854-4971>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Hidalgo – México

Artículo recibido: 20 julio 2024

- *Aceptado para publicación: 26 agosto 2024*
Conflictos de intereses: Ninguno que declarar

RESUMEN

Las tendencias actuales en el mercado de la confitería se orientan hacia productos con un contenido reducido de azúcar y/o con un valor nutricional añadido. El objetivo de esta investigación fue optimizar el nivel de aceptación general de un dulce confitado de apio utilizando un diseño de mezclas de vértices extremos y modelos de regresión para desarrollar un producto atractivo. Se emplearon *scripts* en R para realizar el diseño experimental, estableciendo restricciones específicas para cada factor: harina de apio ($60 \leq x_1 \leq 70$ g), mezcla de chiles ($50 \leq x_2 \leq 60$) y la sal ($20 \leq x_3 \leq 25$). Estas restricciones permitieron generar combinaciones de ingredientes dentro de los límites definidos. La mezcla se optimizó mediante el algoritmo L-BFGS-B, y todos los scripts se subieron a la plataforma GitLab para su consulta e implementación. Se analizaron modelos de regresión lineal, cuadrático y cúbico especial para determinar la relación entre los factores y el nivel de aceptabilidad general (y) del producto. El modelo lineal mostró un buen ajuste y fue considerado práctico en el marco experimental de la investigación. Los factores más influyentes en el nivel de aceptabilidad general fueron x_1 y x_2 , mientras que x_3 no tuvo un impacto significativo. Experimentos confirmatorios validaron la efectividad del modelo lineal, logrando un nivel de aceptabilidad general de 117, indicando que el producto fue bien recibido. En conclusión, el uso de modelos cuantitativos en el diseño de mezclas permitió desarrollar un dulce confitado de apio con alta aceptabilidad.

Palabras clave: confitería saludable, diseño de vértices extremos, apio, tamachew, aceptabilidad sensorial

ABSTRACT

Current trends in the confectionery market are shifting towards products with reduced sugar content and/or added nutritional value. This research aimed to optimize the overall acceptance level of sugar-coated celery confections using an extreme vertices mixture design and regression models to develop an appealing product. *Scripts* in R were used to carry out the experimental design, setting specific restrictions for each factor: celery powder ($60 \leq x_1 \leq 70$ g), chili mix ($50 \leq x_2 \leq 60$ g), and salt ($20 \leq x_3 \leq 25$ g). These restrictions allowed for the generation of ingredient combinations within defined limits. The mixture was optimized using the L-BFGS-B algorithm, and all scripts were uploaded to the GitLab platform for consultation and implementation. Linear, quadratic, and special cubic regression models were analyzed to determine the relationship between the factors and the product's overall acceptability level (y). The linear model showed a good fit and was considered practical within the experimental framework of the study. The most influential factors on the overall acceptability level were x_1 and x_2 , while x_3 had no significant impact. Confirmatory experiments validated the effectiveness of the linear model, achieving an overall acceptability level of 117, indicating that the product was well-received. In conclusion, using quantitative models in mixture design allowed the development of highly acceptable sugar-coated celery confections.

Keywords: healthy confectionery, extreme vertices design, celery, tamachew, sensory acceptability

INTRODUCCIÓN

El apio (*Apium graveolens L.*) es una planta bienal de la familia botánica *Apiaceae* (*Umbelliferae*) que ha sido utilizada desde la antigüedad con fines medicinales por griegos, chinos, egipcios y romanos. Entre las especies cultivadas, la variedad “dulce”, apreciada mundialmente por sus pecíolos comestibles y sus hojas aromáticas, es la más importante económicamente en la actualidad. Los pecíolos de apio se consumen generalmente frescos en ensaladas o junto con las hojas en la preparación de sopas y otros platos calientes. Además, el apio es un ingrediente en varios condimentos utilizados para sazonar platos en la cocina tradicional y la gastronomía (Reale et al., 2021). A pesar de que esta planta es apreciada por sus propiedades culinarias, también se ha investigado su potencial en la industria alimentaria, como la utilización de pectina de tubérculos de apio en emulsiones alimentarias (Petrova et al., 2017), el análisis de los compuestos bioactivos presentes en las semillas de apio (Yan et al., 2024), y la composición química de su aceite esencial, rico en ftálicos con propiedades nutraceuticas (Adelakun et al., 2021). No obstante, no hay artículos relacionados con el uso del apio en la producción de grageas o de otros productos de confitería.

El uso del apio en la industria de la confitería se justifica por varias razones. En primer lugar, el apio posee un perfil nutricional interesante, siendo bajo en calorías y rico en fibra, vitaminas y minerales y aminoácidos esenciales como el triptófano (Boonruamkaew et al., 2020; Consentino et al., 2020; Golubkina et al., 2020; Saleh et al., 2019), lo que se alinea con la tendencia actual de aumentar el valor nutricional de los productos alimenticios y reducir su contenido calórico (González-Otamendi et al., 2024). A nivel global, la confitería es uno de los sectores más competitivos de la industria alimentaria, con nuevas marcas y propuestas de dulces cada año. Los dulces confitados masticables, típicamente formulados con sacarosa, glucosa y almidón, son productos de consumo masivo con un alto aporte calórico. Sin embargo, no existen muchas alternativas en el mercado que ofrezcan un contenido calórico reducido y un alto valor nutricional.

Los dulces confitados o grageas se elaboran a partir de un núcleo o centro, que puede ser natural (como cacahuates o almendras) o fabricado mediante otros procesos (como chicle de bola, caramelo macizo, caramelo suave, dulces comprimidos, bases de goma o centros de chocolate, entre otros) (Ponce-Luna et al., 2024). A estos núcleos se les aplica un proceso de preconfitado para asegurar una buena adhesión, especialmente si el núcleo es grasoso. Este preconfitado utiliza gomas como la arábica, gelatina o maltodextrina. Posteriormente, se realiza un recubrimiento con capas sucesivas de microcristales, obtenidas mediante la adición consecutiva de jarabes de sacarosa con jarabe de maíz (Hartel et al., 2018; Ponce-Luna et al., 2024). Finalmente, se incorporan colorantes, saborizantes, acidulantes y agentes abrillantadores o de glaseado. Este proceso se lleva a cabo en un bombo de grageado o bombo para confitería (Figura 2a), un

recipiente elíptico fabricado en cobre o acero inoxidable. Las capas resultantes pueden tener diferentes texturas, desde duras y quebradizas hasta suaves, dependiendo de la composición de los jarabes (Ponce-Luna et al., 2024). Un ejemplo popular en México de este tipo de productos es un dulce grageado con un centro masticable de sabor tamarindo, conocido como tamachú (tamachew) (Figura 2b), el cual puede ser encontrado en dulcerías en diferentes colores, abarcando el rojo, verde, amarillo y azul.

Los diseños de mezclas son fundamentales en la formulación de alimentos, ya que permiten determinar las proporciones ideales de los ingredientes para lograr productos finales con las características deseadas. Estos diseños son especialmente útiles en la industria alimentaria, donde la interacción entre diferentes componentes puede afectar significativamente las propiedades físicas, sensoriales y nutricionales de los alimentos. De hecho, al utilizar estos diseños, es posible determinar la influencia de cada componente en propiedades como la textura, el color, la firmeza y la aceptabilidad sensorial de los alimentos (Adiba et al., 2024; Caniyilmaz et al., 2016; Franklin et al., 2019; Santos et al., 2018). Entre los diseños de mezclas más comunes se encuentran, el diseño de malla simple (simplex-lattice), diseño de centroide simple (simplex-centroid), diseño axial simple (simplex axial) y el diseño de vértices extremos (Galvan et al., 2021). En particular, el diseño de vértices extremos se utiliza en casos donde se buscan optimizar las formulaciones de alimentos al explorar los límites extremos de los ingredientes. Este enfoque permite identificar las combinaciones óptimas de ingredientes al considerar los extremos de las variables involucradas. Por ejemplo, en la optimización de la formulación de productos como pasteles, galletas, helados, embutidos y suplementos alimenticios, el diseño de vértices extremos ha demostrado ser una herramienta eficaz (Narayana Reddy et al., 2020).

En el contexto de todo lo anterior, el objetivo de esta contribución fue desarrollar y optimizar la formulación de un dulce de apio confitado tipo tamachew utilizando un diseño de mezclas de vértices extremos, con el fin de mejorar el nivel de aceptabilidad general del producto final y de obtener un producto de confitería atractivo y nutritivo.

Figura 1

Esquema de un fragmento del apio

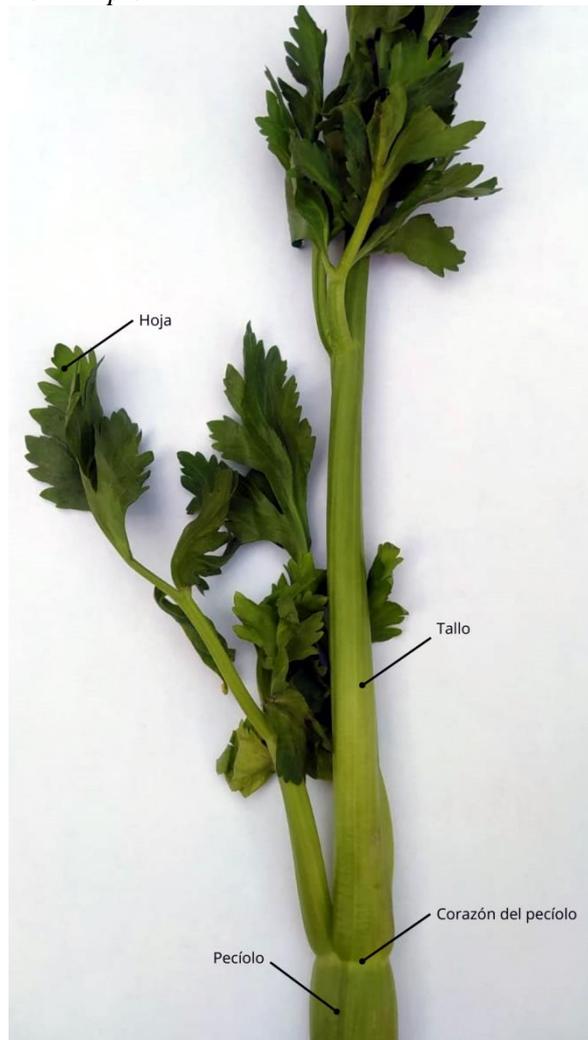
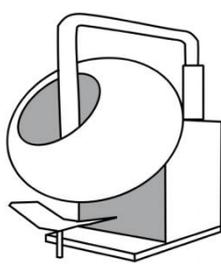


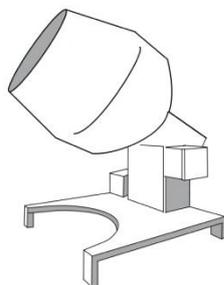
Figura 2

Dulces confitados o grageas. (a) Tipos de bombos de grageado o bombos para confitería. (b)

Dulce confitado con centro de sabor a tamarindo conocido como Tamachew.



Bombo circular



Bombo en forma de tulipán

(a)



(b)

MATERIALES Y MÉTODOS

Materias primas

Todos los ingredientes y aditivos alimentarios fueron proporcionados por una empresa de confitería establecida en Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

Elaboración de los centros de apio para confitar

Los centros para confitar se elaboraron siguiendo una formulación y un proceso artesanal (Figura 3), proporcionados con fines académicos por una empresa de confitería establecida en Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. Debido a la naturaleza del proyecto, no se permitió citar los detalles específicos del proceso ni las cantidades exactas de los ingredientes y aditivos alimentarios utilizados, excepto las relacionadas con la harina de apio (x_1), una mezcla de chile guajillo y de chile de árbol en polvo (2:1, m/m) (x_2) y la sal de mesa (NaCl) (x_3), que sumaron 107 g en una formulación total de 582 g. Estas fracciones se ajustaron de acuerdo con la matriz experimental del diseño de vértices extremos, como se muestra en la Tabla 1. Los 475 g restantes de la formulación incluyeron agua, hidrocoloides, sacarosa refinada, jarabe de maíz y agentes conservantes.

Con los ingredientes y aditivos alimentarios mencionados anteriormente, se preparó una pasta para cada formulación. Esta pasta se cortó en porciones de aproximadamente 6 g, que luego se bolearon para formar los centros. Estos centros pasaron por un proceso de engomado descrito en la sección “2.5. Proceso de engomado y confitado”. Finalmente, los centros elaborados con las diferentes formulaciones se almacenaron en recipientes herméticos de vidrio en un lugar fresco y seco hasta su uso en el análisis sensorial.

Análisis sensorial

El análisis sensorial fue realizado como se describe en una investigación anterior, pero con algunas modificaciones (Plustea et al., 2024). La evaluación sensorial para determinar el nivel de aceptabilidad general de los centros para confitar, hechos conforme a las especificaciones detalladas en la Tabla 1, fue realizada por un grupo de 30 panelistas capacitados, todos ellos estudiantes de la Licenciatura en Química de Alimentos de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. Las muestras se presentaron a los evaluadores de forma individual en platos de cartón, cada uno etiquetado con un código de tres dígitos. Los panelistas asignaron puntuaciones del 1 al 5 para el atributo evaluado, utilizando la siguiente escala: 1 = no me gusta, 2 = ni me gusta ni me disgusta, 3 = me gusta ligeramente, 4 = me gusta moderadamente y 5 = me gusta mucho.

El número de puntuaciones de cada punto de la escala hedónica se multiplicó por el coeficiente correspondiente y se calculó la suma acumulada de cada formulación evaluada para utilizar el valor como variable de respuesta. La Ecuación 1 representa esto:

$$y = \sum_{i=1}^5 n_i c_i \quad (1)$$

Donde y es el valor de la respuesta (nivel de aceptabilidad general), n_i es el número de puntuaciones para el punto i en la escala y c_i es el coeficiente para el punto i en la escala.

Diseño de vértices extremos

Todos los *scripts* utilizados para producir los resultados de los análisis presentados en este documento se desarrollaron utilizando el lenguaje de programación R (v.4.1.2, “Bird Hippie”) y el entorno de desarrollo integrado RStudio® (v.2024.04.2), en una computadora con el sistema operativo elementary OS 7.1 Horus (basado en Ubuntu 22.04.3 LTS, Linux 6.5.0-44-generic). Todos los *scripts* en R han sido subidos a la plataforma GitLab, donde están disponibles para su acceso, análisis e implementación (https://gitlab.com/FoodChem-DataSci-Lab/dulce_de_apio_r).

Para el diseño de mezclas, se utilizó un enfoque de vértices extremos con restricciones específicas para cada componente. Este enfoque permitió explorar detalladamente las combinaciones de los componentes dentro de límites establecidos, evaluando la influencia conjunta de la harina de apio (x_1), mezcla de chile guajillo con de chile de árbol (x_2) y la sal de mesa (x_3) en el nivel de aceptabilidad general (y). Al no realizar experimentos en los vértices individuales, que no eran de interés, se aseguraron combinaciones prácticas y viables. Además, la aleatorización y la inclusión de centroides añadieron robustez y reproducibilidad al diseño. Se utilizó la librería ‘mixexp’ en R para realizar el diseño y su visualización (Lawson & Willden, 2016).

En primer lugar, se creó el diseño de mezclas con los 3 componentes (Wang et al., 2020). Las restricciones superiores e inferiores para cada componente fueron establecidas como se muestra en la Ecuación 2, asegurando que las combinaciones de los componentes estuvieran dentro de los límites especificados.

$$\begin{aligned} 0.60 &\geq x_1 \geq 0.30 \\ 0.50 &\geq x_2 \geq 0.20 \\ 0.20 &\geq x_3 \geq 0.10 \end{aligned} \quad (2)$$

Posteriormente, se codificaron los factores y los niveles de cada componente en gramos, multiplicando las fracciones de cada componente por 107 g. Esta transformación permitió una fácil interpretación de los resultados experimentales en términos de cantidades reales de los ingredientes.

Para garantizar la reproducibilidad y evitar sesgos, los experimentos fueron aleatorizados. Se utilizó una semilla fija (‘set.seed(789)’) para la aleatorización, lo cual facilitó la repetición del experimento bajo las mismas condiciones. Los experimentos aleatorizados fueron mostrados en la matriz de experimentos resultante (Tabla 1), que proporcionó las diferentes combinaciones de

los componentes dentro de las restricciones establecidas, las dimensiones de los centroides y los valores codificados en gramos, resultando en un total de 9 corridas.

La columna “dimen” en la Tabla 1 indica la dimensión o el orden de los centroides en el diseño de mezclas, clasificando los puntos experimentales en diferentes niveles: un valor de 0 representa los vértices puros del diseño (puntos extremos donde una de las proporciones es máxima y las otras son mínimas), un valor de 1 indica los puntos medios o centroides de aristas (promedios entre dos vértices) y un valor de 2 corresponde a puntos interiores del diseño, como los centroides de caras o de volumen, que son equilibrados y no se encuentran en los límites extremos de las proporciones. Esto puede ser observado en la Figura 3, la cual permite una clara representación visual del diseño experimental.

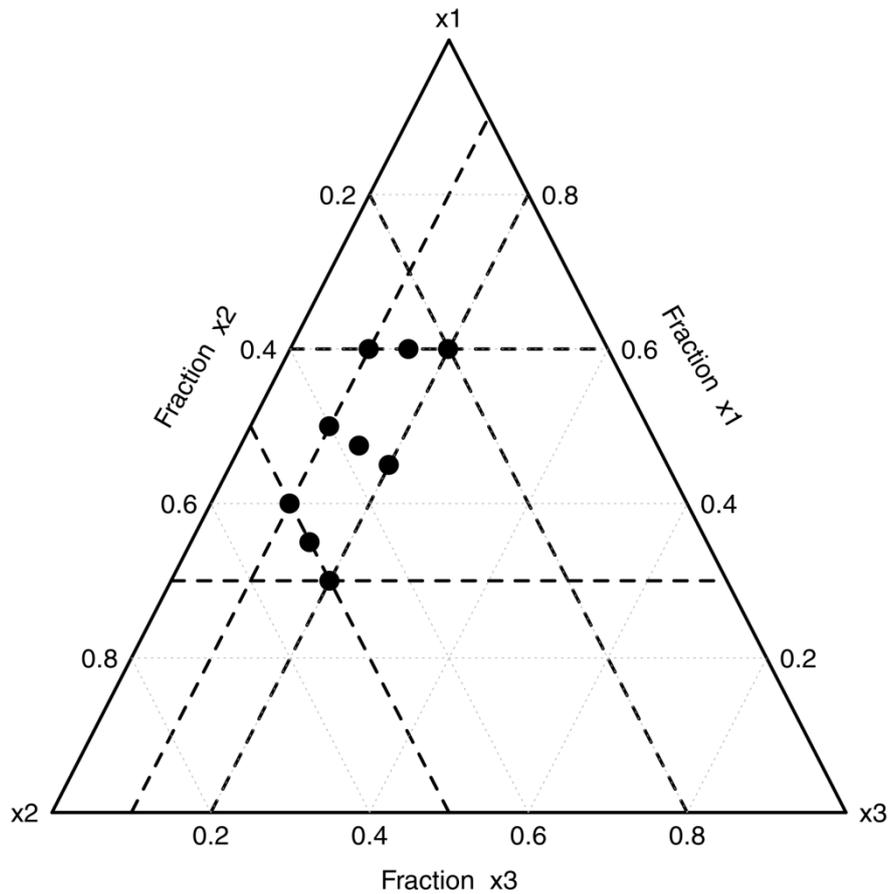
Tabla 1

Diseño de vértices extremos para la mezcla de tres componentes: harina de apio, mezcla de chiles y sal

Mezclas	x_1	x_2	x_3	dimen	Harina de apio (g)	Mezcla de chiles (g)	Sal (g)
4	0.40	0.50	0.10	0	42.80	53.50	10.70
6	0.35	0.50	0.15	1	37.45	53.50	16.05
2	0.30	0.50	0.20	0	32.10	53.50	21.40
7	0.50	0.40	0.10	1	53.50	42.80	10.70
3	0.60	0.30	0.10	0	64.20	32.10	10.70
1	0.60	0.20	0.20	0	64.20	21.40	21.40
5	0.60	0.25	0.15	1	64.20	26.75	16.05
9	0.47	0.38	0.15	2	50.82	40.13	16.05
8	0.45	0.35	0.20	1	48.15	37.45	21.40

Figura 3

Gráfico ternario con las limitaciones de contorno y los puntos experimentales del diseño de vértices extremos para un sistema de tres componentes.



La relación matemática del nivel de aceptabilidad general del producto (y) en función de las tres variables independientes (x_1 , x_2 y x_3) se determinó utilizando los modelos lineal, cuadrático y cúbico especial, sin incluir el intercepto. Estos modelos se presentan en las Ecuaciones 3 a 5, respectivamente (Delgado-Pando et al., 2019; Galvan et al., 2021; Homayouni Rad et al., 2019; Lawson & Willden, 2016). En esta ecuación, β_1 , β_2 , β_3 , β_{12} , β_{13} , β_{23} y β_{123} son los coeficientes constantes para cada término de interacción lineal y no lineal. Esta ecuación fue la función objetivo de esta metodología.

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \quad (3)$$

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 \quad (4)$$

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (5)$$

Optimización de mezclas utilizando el algoritmo L-BFGS-B con restricciones de caja

Para calcular la mezcla de x_1 , x_2 y x_3 que resultara en el mayor nivel de aceptabilidad general (y) del centro para confitar, se utilizó el método L-BFGS-B (*Limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno with Box constraints*), adecuado para manejar problemas con restricciones de caja (Li, 2020). En este enfoque se utilizaron como funciones objetivo, los

modelos ajustados con las Ecuaciones 3 a 5. Las restricciones en las variables fueron establecidas con los límites inferiores y superiores para cada componente, mostrados en la Ecuación 2.

Para iniciar la optimización, se utilizó un punto inicial (0.45, 0.35, 0.15) dentro de los límites establecidos. El algoritmo L-BFGS-B iteró ajustando las variables dentro de las restricciones hasta encontrar la combinación óptima de x_1 , x_2 y x_3 que maximiza el nivel de aceptabilidad general del producto (y), asegurando combinaciones prácticas y viables dentro de los límites especificados. Los detalles pueden ser observados en el script de R mostrado en el repositorio de GitLab (https://gitlab.com/FoodChem-DataSci-Lab/dulce_de_apio_r).

Proceso de engomado y confitado

El proceso de confitado se realizó únicamente con los centros elaborados según la formulación óptima (Figura 4a), es decir, aquella que logró el mayor nivel de aceptabilidad general. Este procedimiento se llevó a cabo siguiendo una formulación y un método proporcionados con fines académicos por una empresa de confitería establecida en Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

Primero, los centros se introdujeron en un bombo (Figura 4b), donde se llevó a cabo el engomado, que consistió en recubrir los centros con una dispersión de goma arábiga mientras se mantenían en rotación. Posteriormente, se les adicionó azúcar glas para secarlos. Luego, se extendieron en una charola y se dejaron reposar por un tiempo específico (Figura 4c).

Después, se reintrodujeron en el bombo para confitería en rotación y se recubrieron con un cierto número de capas de un jarabe compuesto de agua, sacarosa refinada y jarabe de maíz, cocido a una temperatura específica. Tras ser retirados, se dejaron reposar por un tiempo determinado. Finalmente, se volvieron a introducir en el bombo, donde se recubrieron con un jarabe que, además de agua, sacarosa refinada y jarabe de maíz, contenía colorante verde, esencia de limón y agentes acidulantes. Los centros confitados se retiraron del bombo y se dejaron reposar una última vez antes de ser empaquetados (Figura 4d).

Figura 4

Proceso de elaboración de dulces confitados con harina de apio: (a) Centros para confitar hechos con harina de apio, (b) bombo de confitería con los centros para confitar, (c) centros engomados y (d) prototipo final de dulces de apio confitados.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis comparativo de modelos de regresión

La Tabla 2 muestra los resultados de tres modelos de regresión (lineal, cuadrático y cúbico) aplicados para optimizar el nivel de aceptabilidad general de los centros de apio para confitar.

Se presentaron coeficientes significativos para x_1 y x_2 en el modelo lineal, con valores p de 0.000424 y 0.000342, respectivamente. Se mostró un valor p extremadamente bajo para el modelo lineal (7.798×10^{-8}), fue el más bajo de los 3 modelos evaluados, indicando una fuerte relación entre las variables independientes y la variable dependiente. Se registraron altos valores

de R^2 y R^2 ajustado (0.9967 y 0.9951, respectivamente), sugiriendo que la mayor parte de la variabilidad en los datos fue explicada por el modelo. Se obtuvo un error estándar residual de 6.986, que fue aceptable aunque no el más bajo comparado con otros modelos. Se predijo el nivel de aceptabilidad general (y) para los valores óptimos de x_1 (64.20 g de harina de apio), x_2 (53.50 g de mezcla de chiles) y x_3 (21.40 g de sal), resultando en un valor de 129.155.

El modelo cuadrático incluyó interacciones entre las variables, mejorando ligeramente el ajuste con un R^2 de 0.9989 y un R^2 ajustado de 0.9968. Aunque el valor p (0.000155) del modelo fue muy bajo, lo cual es favorable, algunos coeficientes no fueron significativos (x_1 : 0.872, x_2 : 0.134, x_3 : 0.504, $x_1:x_2$: 0.989, $x_1:x_3$: 0.343, $x_2:x_3$: 0.688). Se observó un error estándar residual más bajo que el del modelo lineal (5.657), indicando un mejor ajuste a los datos. Sin embargo, la predicción del nivel de aceptabilidad general (y) para los valores óptimos $x_1=64.2$, $x_2=53.5$ y $x_3=21.4$, fue de 198.55, superior al del modelo lineal y excediendo el límite práctico de la escala hedónica. Esto es importante, ya que, en un caso hipotético, si todos los panelistas evaluaran la formulación óptima con “me gusta mucho (5)”, se obtendría un puntaje total de 150.

El modelo cúbico incluye interacciones de tercer grado, alcanzando el R^2 más alto (0.9991) y un R^2 ajustado de 0.9962. Sin embargo, este modelo presenta coeficientes con altos errores estándar y algunos no son significativos (x_1 : 0.536, x_2 : 0.832, x_3 : 0.423, $x_1:x_2$: 0.553, $x_1:x_3$: 0.381, $x_2:x_3$: 0.496, $x_1:x_2:x_3$: 0.544). El error estándar residual fue 6.167, mayor que el del modelo cuadrático, pero menor que el del lineal. La predicción del nivel general de aceptabilidad (y) fue la más alta (271.247393), lo que podría indicar sobreajuste.

Aunque todos los modelos tienen valores de R^2 ajustado altos, el modelo cuadrático ofrece el mejor equilibrio entre ajuste y simplicidad. Tiene un error estándar residual más bajo que los otros modelos y un valor p muy bajo, lo que sugiere un buen ajuste a los datos sin sobreajustar como podría ser el caso del modelo cúbico. Sin embargo, al seleccionar un modelo para fines prácticos y confirmatorios, es importante considerar además del ajuste estadístico, la aplicabilidad práctica de las predicciones. El modelo lineal, con una predicción de 129.15, se alinea con los límites de la escala hedónica y es realizable dentro del contexto del análisis sensorial de este estudio. Su simplicidad y la significancia de sus coeficientes lo hacen adecuado para la interpretación y validación experimental. Además, su alto R^2 y R^2 ajustado aseguraron que captura adecuadamente la relación entre las variables sin introducir complejidad en el modelo. Además, no se encontraron efectos sinérgicos o antagónicos significativos en los otros modelos. Este criterio de selección del modelo también fue reportado en una investigación previa en donde se evaluó el nivel de aceptabilidad general de un producto cárnico, en donde también se evaluaron diferentes modelos de regresión (Delgado-Pando et al., 2019).

Tabla 2

Desempeño de los modelos de regresión en la optimización del nivel de aceptabilidad general de los centros de apio para confitar

Modelo	Coefficientes	R ²	R ² Ajustado	Error estándar residual	Valor p	Estadístico F
Lineal	x_1 : 94.24	0.9967	0.9951	6.986	7.798×10^{-8}	605.5
	x_2 : 110.87					
	x_3 : 85.89					
Cuadrático	x_1 : -12.031	0.9989	0.9968	5.657	0.000155	462.7
	x_2 : 184.119					
	x_3 : -873.904					
	$x_1 \cdot x_2$: -3.675					
	$x_1 \cdot x_3$: 1815.972					
	$x_2 \cdot x_3$: 716.748					
Cúbico especial	x_1 : -198.8	0.9991	0.9962	6.167	0.002991	333.7
	x_2 : -96.3					
	x_3 : -2034.9					
	$x_1 \cdot x_2$: 933.0					
	$x_1 \cdot x_3$: 4295.5					
	$x_2 \cdot x_3$: 3734.9					
	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$: -5386.4					

Influencia de los factores en el nivel de aceptabilidad general

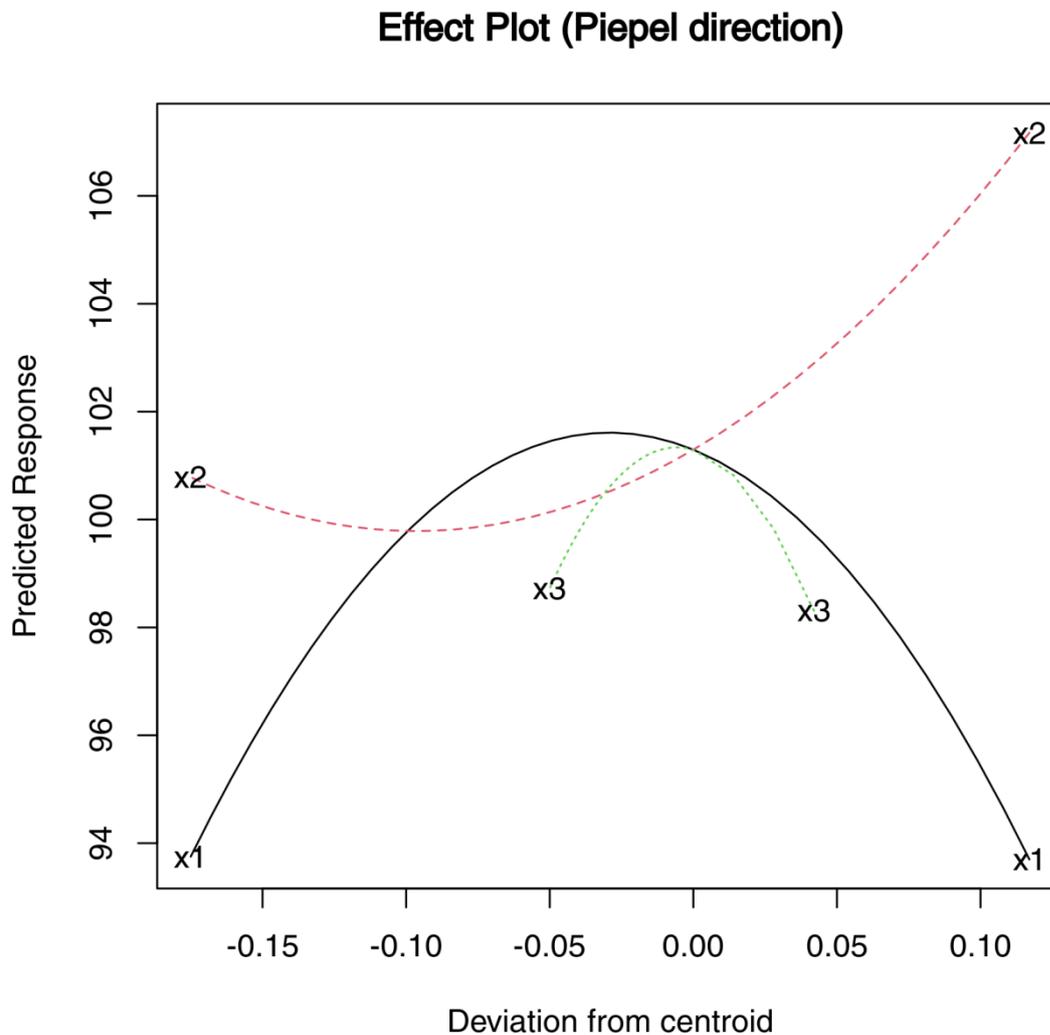
Los resultados obtenidos para el modelo lineal, mostraron que los factores con mayor influencia sobre el nivel de aceptabilidad general (y) fueron la cantidad de harina de apio (x_1) y la cantidad de la mezcla de chiles (x_2), ya que ambos tienen coeficientes significativamente diferentes de cero y con valores p muy bajos (x_1 : 0.000424, x_2 : 0.000342). Estos factores tuvieron un impacto positivo en el nivel de aceptabilidad general, como se evidencia por sus coeficientes estimados (x_1 : 94.24, x_2 : 110.87). En cambio, la cantidad de sal (x_3) no tuvo un impacto significativo en el nivel de aceptabilidad general (y), dado que su valor p es relativamente alto (0.127297), indicando que su influencia no es significativa en este modelo. De hecho, estos resultados concuerdan con lo observado en el gráfico de efectos o gráfico de Piepel, mostrado en la Figura 5 (Piepel, 1982).

En la Figura 5 se muestra la influencia de los factores en la respuesta predicha del modelo de aceptabilidad general. El eje horizontal indica la desviación de cada factor desde su valor promedio, mientras que el eje vertical muestra el nivel de aceptabilidad general predicho. La curva de x_1 (línea negra sólida) es parabólica, sugiriendo que un aumento inicial en x_1 incrementa la aceptabilidad hasta un punto máximo, después del cual disminuye. La curva de x_2 (línea roja discontinua) sigue una tendencia ascendente, indicando que x_2 tiene un impacto positivo creciente en la aceptabilidad. La curva de x_3 (línea verde discontinua) también es parabólica, mostrando un aumento inicial en la aceptabilidad seguido de una disminución después de alcanzar un pico. En comparación, x_2 tiene el efecto más fuerte y consistentemente positivo, mientras que x_1 y x_3 tienen

puntos óptimos específicos donde maximizan la aceptabilidad antes de que esta comience a disminuir con incrementos adicionales en estos factores.

Figura 5

Gráfico de efectos o gráfico de Piepel.



La Figura 6 presenta los gráficos de contorno de los modelos matemáticos ajustados en el espacio de componentes reales (*Actual Component Space*) y en la zona experimental (*Pseudo Component Space*) para tres tipos de modelos: lineal, cuadrático y cúbico especial. Estos gráficos permiten visualizar la influencia de las combinaciones de los factores sobre la respuesta predicha (Caniyilmaz et al., 2016; Delgado-Pando et al., 2019; Lawson & Willden, 2016).

En la Figura 6a se observa que la aceptabilidad general incrementa de manera lineal con aumentos en x_1 y x_2 , mientras que x_3 tiene un impacto menos significativo. En el espacio de componentes reales, se puede ver que las zonas con mayor aceptabilidad se encuentran en las combinaciones donde x_1 y x_2 son mayores. En el espacio de pseudo componentes, esta tendencia

es confirmada, mostrando que x_1 y x_2 contribuyen positivamente a la aceptabilidad general, mientras que x_3 tiene un efecto más neutral.

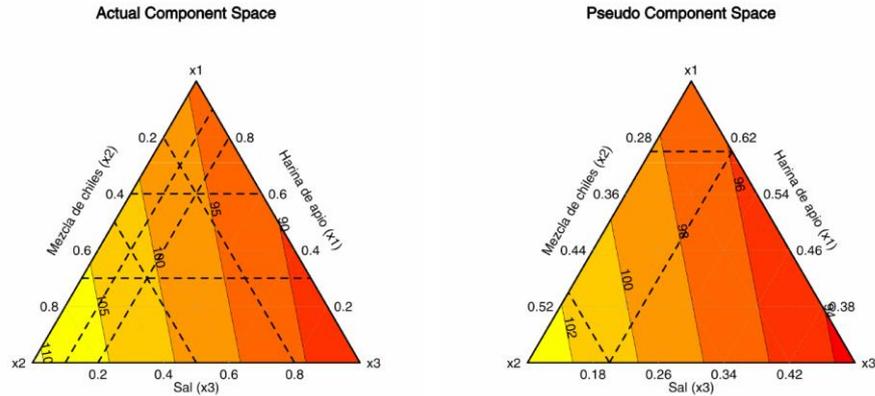
En la Figura 6b se muestra una relación más compleja entre los factores y la respuesta. En el espacio de componentes reales, se observa una zona óptima donde la combinación de x_1 y x_2 es intermedia y x_3 tiene una contribución moderada. La forma parabólica de las curvas indica que hay interacciones significativas entre los factores. En el espacio de pseudo componentes, se puede ver que las interacciones entre x_1 y x_2 son más pronunciadas, y el efecto de x_3 se mantiene relativamente constante, sugiriendo un ajuste más fino del modelo para capturar las interacciones entre los factores.

En la Figura 6c se mostró una relación aún más compleja y no lineal entre los factores y la aceptabilidad general. En el espacio de componentes reales, se pueden identificar varias zonas óptimas y subóptimas, lo que indica que las interacciones de tercer grado son significativas. El espacio de pseudo componentes confirma estas observaciones, mostrando varias crestas y valles en la superficie de respuesta, lo que sugiere que el modelo cúbico especial captura mejor las complejas interacciones entre x_1 , x_2 y x_3 .

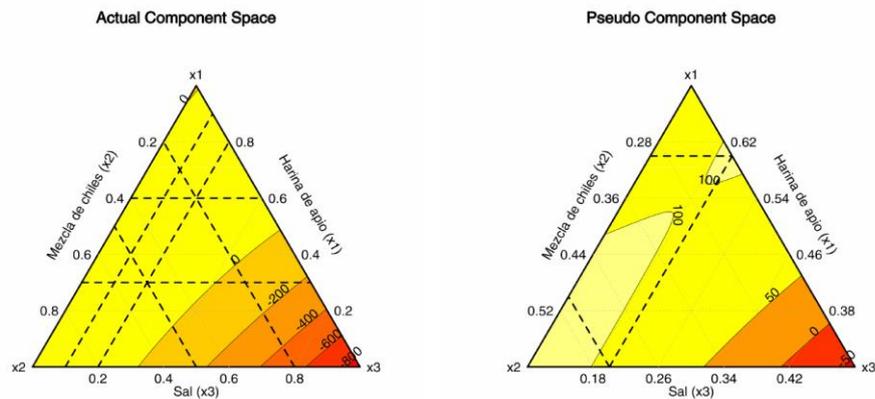
La aplicación de modelos lineales y no lineales en la predicción y mejora de la aceptabilidad de los productos es una práctica común en la investigación de alimentos y puede proporcionar información valiosa para la formulación y desarrollo de productos alimenticios (Dutcosky et al., 2006).

Figura 6

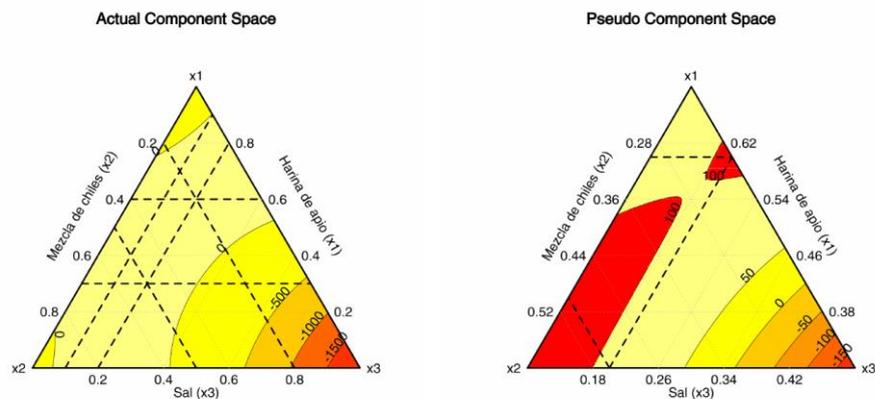
Gráficos de contorno de los modelos matemáticos ajustados (Actual Component Space) y de la zona experimental (Pseudo Component Space): (a) Modelo lineal, (b) modelo cuadrático y (c) modelo cúbico especial



(a)



(b)



(c)

Validación de resultados experimentales

Los experimentos confirmatorios realizados con la combinación óptima de factores ($x_1 = 64.20$ g de harina de apio, $x_2 = 53.50$ g de mezcla de chiles y $x_3 = 21.4$ g de sal) resultaron en una suma de aceptabilidad general de 117, basada en las calificaciones de los panelistas: 0 “no me gusta”, 2 “ni me gusta ni me disgusta”, 5 “me gusta ligeramente”, 17 “me gusta moderadamente” y 6 “me gusta mucho”. Para establecer rangos para la escala hedónica en función de los niveles de aceptabilidad general, el rango total (30-150) fue dividido en segmentos que correspondieran a diferentes categorías del nivel de aceptabilidad. Se propuso una distribución equitativa en cinco categorías: No me gusta (30-54), Ni me gusta ni me disgusta (55-79), Me gusta ligeramente (80-104), Me gusta moderadamente (105-129) y Me gusta mucho (130-150). Aunque la predicción del modelo lineal sugería un nivel de aceptabilidad general de 129.15, los resultados experimentales reales fueron algo inferiores. Las discrepancias observadas pueden atribuirse a varias fuentes de variación, incluyendo diferencias inherentes en las condiciones experimentales en comparación con las simulaciones del modelo, la percepción sensorial individual de los panelistas, así como variaciones entre los productos analizados (Su et al., 2022). Aun así, la combinación de factores optimizada proporcionó un alto nivel de aceptabilidad general (117 = “Me gusta moderadamente”), demostrando que el modelo lineal es efectivo para predecir y mejorar la aceptación del producto dentro del marco experimental establecido. El centro elaborado con la formulación óptima fue confitado para producir un prototipo, el cual puede observarse en la Figura 4d.

La validación y mejora de modelos de aceptación de productos a través de enfoques cuantitativos es fundamental para la industria alimentaria. La predicción de la aceptabilidad del consumidor mediante mediciones físicas y modelado multivariado es una práctica común y efectiva para garantizar la calidad y aceptación de los productos alimentarios (Nunes et al., 2017).

CONCLUSIONES

La utilización de modelos cuantitativos en el diseño de mezclas permitió desarrollar un dulce confitado de apio con alto nivel de aceptabilidad, cumpliendo el objetivo de crear un producto saludable y atractivo. Los principales hallazgos indican que el modelo cúbico tuvo el mejor ajuste, aunque con algunos coeficientes no significativos, mientras que el modelo cuadrático ofreció el mejor equilibrio entre ajuste y simplicidad. El modelo lineal, aunque menos complejo, también mostró un buen ajuste y fue considerado práctico. Los factores más influyentes en la aceptabilidad fueron la cantidad de harina de apio y la mezcla de chiles, mientras que la sal no tuvo un impacto significativo. Experimentos confirmatorios validaron la efectividad del modelo lineal, logrando un nivel de aceptabilidad general de 117, indicando que el producto fue bien recibido. La metodología utilizada, que incluyó el uso del diseño de mezclas y modelos de regresión implementados mediante software libre como R, demostró ser viable y efectiva,

facilitando la interpretación de resultados y la identificación de combinaciones óptimas de factores. Este enfoque permitió obtener un alto nivel de aceptabilidad general del producto y destacó la importancia de utilizar herramientas accesibles y robustas en la investigación y desarrollo de productos alimenticios, promoviendo prácticas científicas replicables y sustentables.

Las perspectivas de esta investigación incluyen la exploración de otros ingredientes y combinaciones para mejorar aún más la aceptabilidad y el perfil nutricional del producto. Además, se podrían realizar estudios adicionales para evaluar la estabilidad del producto a lo largo del tiempo y su aceptación en diferentes mercados. La aplicación de técnicas avanzadas de modelado y análisis sensorial podría proporcionar una comprensión más profunda de las preferencias del consumidor y guiar el desarrollo de nuevos productos alimentarios.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por el soporte brindado. Finalmente, los autores dedican esta investigación a la memoria del Dr. Santiago Ricardo Tomás Filardo Kerstupp (1945-2021).

REFERENCIAS

- Adelakun, E. A., Achuenu, C., Ngurukwem, E. C., & Chuwang, D. J. (2021). *Gas Chromatography- Mass Spectrometry Analysis of Phthalide Composition of Celery oil from *Apium graveolens* L. cultivated in Nigeria*. *Journal of Chemical Society of Nigeria*, 46(2). <https://doi.org/10.46602/jcsn.v46i2.605>
- Adiba, I. F., Sae-tan, S., Katekhong, W., Ritthiruangdej, P., Chaveesuk, R., & Ratanasumawong, S. (2024). *Effect of ingredients on cooking quality, textural properties, and microstructure of fresh mung bean by-product gluten-free pasta*. *International Journal of Food Science & Technology*, 59(4), 2581-2591. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16997>
- Boonruamkaew, P., Sukketsiri, W., & Chonpathompikunlert, P. (2020). *Celery. En Nutritional Composition and Antioxidant Properties of Fruits and Vegetables (pp. 107-120)*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812780-3.00007-6>
- Caniyilmaz, E., Uçarkuş, B., & Karaman, S. (2016). *Optimization of Formulation Ingredients and Aging Time for Ice Cream Processing Using Combined Design Approach: Optimization of Ingredients for Ice Cream Processing*. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(6), 1325-1338. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12718>
- Consentino, B. B., Virga, G., La Placa, G. G., Sabatino, L., Roupheal, Y., Ntatsi, G., Iapichino, G., La Bella, S., Mauro, R. P., D'Anna, F., Tuttolomondo, T., & De Pasquale, C. (2020). *Celery (*Apium graveolens* L.) Performances as Subjected to Different Sources of Protein Hydrolysates*. *Plants*, 9(12), 1633. <https://doi.org/10.3390/plants9121633>
- Delgado-Pando, G., Allen, P., Kerry, J. P., O'Sullivan, M. G., & Hamill, R. M. (2019). *Optimising the acceptability of reduced-salt ham with flavourings using a mixture design*. *Meat Science*, 156, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.05.010>
- Dutcosky, S. D., Grossmann, M. V. E., Silva, R. S. S. F., & Welsch, A. K. (2006). *Combined sensory optimization of a prebiotic cereal product using multicomponent mixture experiments*. *Food Chemistry*, 98(4), 630-638. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.06.029>
- Franklin, M. E. E., Pushpadass, H. A., Kamaraj, M., Muthurayappa, M., & Battula, S. N. (2019). *Application of D-optimal mixture design and fuzzy logic approach in the preparation of chhana podo (baked milk cake)*. *Journal of Food Process Engineering*, 42(5), e13121. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13121>
- Galvan, D., Effting, L., Cremasco, H., & Conte-Junior, C. A. (2021). *Recent Applications of Mixture Designs in Beverages, Foods, and Pharmaceutical Health: A Systematic Review and Meta-Analysis*. *Foods*, 10(8), 1941. <https://doi.org/10.3390/foods10081941>
- Golubkina, N. A., Kharchenko, V. A., Moldovan, A. I., Koshevarov, A. A., Zamana, S., Nadezhkin, S., Soldatenko, A., Sekara, A., Tallarita, A., & Caruso, G. (2020). *Yield*

- Growth, Quality, Biochemical Characteristics and Elemental Composition of Plant Parts of Celery Leafy, Stalk and Root Types Grown in the Northern Hemisphere. Plants*, 9(4), 484. <https://doi.org/10.3390/plants9040484>
- González-Otamendi, M. D. J., Pérez-Flores, J. G., Contreras-López, E., Soto-Vega, K., García-Curiel, L., Pérez-Escalante, E., Islas-Martínez, D., Jijón, C. Á., & Portillo-Torres, L. A. (2024). *Uso de Polioles en la Industria de la Confitería. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(3), 499-528. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3.11259
- Hartel, R. W., Von Elbe, J. H., & Hofberger, R. (2018). *Sugar and Sugar-Free Panned Confections. En R. W. Hartel, J. H. Von Elbe, & R. Hofberger, Confectionery Science and Technology (pp. 361-391). Springer International Publishing.* https://doi.org/10.1007/978-3-319-61742-8_13
- Homayouni Rad, A., Pirouzian, H. R., Toker, O. S., & Konar, N. (2019). *Application of simplex lattice mixture design for optimization of sucrose-free milk chocolate produced in a ball mill. LWT*, 115, 108435. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108435>
- Lawson, J., & Willden, C. (2016). *Mixture Experiments in R Using mixexp. Journal of Statistical Software*, 72(Code Snippet 2). <https://doi.org/10.18637/jss.v072.c02>
- Li, X. (2020). *A limited memory BFGS subspace algorithm for bound constrained nonsmooth problems. Journal of Inequalities and Applications*, 2020(1), 135. <https://doi.org/10.1186/s13660-020-02398-6>
- Narayana Reddy, K. A., Kunchithapatham, J., Dang, R., & Ramnarayanan, C. (2020). *Design and Development of Darunavir loaded Self Micro Emulsifying Drug Delivery System using Extreme Vertices Mixture Design in a Quality by Design Framework. Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research*, 54(2), 337-348. <https://doi.org/10.5530/ijper.54.2.39>
- Nunes, C. A., Souza, V. R., Rodrigues, J. F., Pinheiro, A. C. M., Freitas, M. P., & Bastos, S. C. (2017). *Prediction of consumer acceptance in some thermoprocessed food by physical measurements and multivariate modeling. Journal of Food Processing and Preservation*, 41(5), e13178. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13178>
- Petrova, Iv., Petkova, N., Ognyanov, M., Simitchiev, Ap., Todorova, M., & Denev, P. (2017). *Food emulsions with amidated pectin from celery (Apium graveolens var. Rapaceum D.C.) tubers. Agricultural Science and Technology*, 9(3), 246-250. <https://doi.org/10.15547/ast.2017.03.046>
- Piepel, G. F. (1982). *Measuring Component Effects in Constrained Mixture Experiments. Technometrics*, 24(1), 29-39. <https://doi.org/10.1080/00401706.1982.10487706>
- Plustea, L., Dossa, S., Dragomir, C., Cocan, I., Negrea, M., Obistioiu, D., Poiana, M.-A., Voica, D., Berbecea, A., & Alexa, E. (2024). *Comparative Study of the Nutritional, Phytochemical, Sensory Characteristics and Glycemic Response of Cookies Enriched*

- with Lupin Sprout Flour and Lupin Green Sprout. *Foods*, 13(5), 656. <https://doi.org/10.3390/foods13050656>
- Ponce-Luna, A., Pérez-Flores, J. G., Pérez-Escalante, E., Portillo-Torres, L. A., García-Curiel, L., & Contreras-López, E. (2024). *Potencial del nopal para su incursión en la industria de la confitería. Padi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 11(22), 28-33. <https://doi.org/10.29057/icbi.v11i22.11074>
- Reale, S., Di Cecco, V., Di Donato, F., Di Martino, L., Manzi, A., Di Santo, M., & D'Archivio, A. A. (2021). *Characterization of the Volatile Profile of Cultivated and Wild-Type Italian Celery (Apium graveolens L.) Varieties by HS-SPME/GC-MS. Applied Sciences*, 11(13), 5855. <https://doi.org/10.3390/app11135855>
- Saleh, S., Liu, G., Liu, M., Liu, W., He, H., & Abdelhamid, M. T. (2019). *Do NH 4 :NO 3 ratio and harvest time affect celery (Apium graveolens) productivity and product quality? Folia Horticulturae*, 31(2), 343-353. <https://doi.org/10.2478/fhort-2019-0027>
- Santos, F. G., Fratelli, C., Muniz, D. G., & Capriles, V. D. (2018). *Mixture Design Applied to the Development of Chickpea-Based Gluten-Free Bread with Attractive Technological, Sensory, and Nutritional Quality. Journal of Food Science*, 83(1), 188-197. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14009>
- Su, Y., Wang, H., Wu, Z., Zhao, L., Huang, W., Shi, B., He, J., Wang, S., & Zhong, K. (2022). *Sensory Description and Consumer Hedonic Perception of Ultra-High Temperature (UHT) Milk. Foods*, 11(9), 1350. <https://doi.org/10.3390/foods11091350>
- Wang, L., Shao, Y., Zhao, Z., Chen, S., & Shao, X. (2020). *Optimized utilization studies of dredging sediment for making water treatment ceramsite based on an extreme vertex design. Journal of Water Process Engineering*, 38, 101603. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101603>
- Yan, J., He, L., Huang, Z., Wang, H., Yu, L., & Zhu, W. (2024). *Investigating the Impact of Origins on the Quality Characteristics of Celery Seeds Based on Metabolite Analysis through HS-GC-IMS, HS-SPME-GC-MS and UPLC-ESI-MS/MS: Foods*, 13(10), 1428. <https://doi.org/10.3390/foods13101428>