

DOI: <https://doi.org/10.70747/cr.v5i3.1173>

Robustez y Variabilidad de una Región de Alta Aceptabilidad en un Dulce de Zanahoria: Análisis Mediante Diseño de Mezclas y Simulación de Monte Carlo

Yeimi Carolina Hernández Callejas

<https://orcid.org/0009-0009-4141-1782>

yeimihernandez2412@gmail.com

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
Tula de Allende – México

Jesús Guadalupe Pérez Flores

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

jesus_perez@uaeh.edu.mx

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
Pachuca de Soto – México

Laura García Curiel

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

laura.garcia@uaeh.edu.mx

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
Pachuca de Soto – México

Emmanuel Pérez Escalante

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

emmanuel_perez@uaeh.edu.mx

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
Pachuca de Soto – México

Elizabeth Contreras López

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

elizac@uaeh.edu.mx

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
Pachuca de Soto – México

Israel Oswaldo Ocampo-Salinas

<https://orcid.org/0000-0002-5507-4889>

iocampo@uaeh.edu.mx

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
Pachuca de Soto – México

RESUMEN

La formulación de alimentos basada en diseños de mezclas permite identificar regiones sensoriales prometedoras, aunque los óptimos predichos pueden resultar inestables cuando el dominio experimental es limitado. Este estudio caracterizó la estructura interna, la variabilidad y la robustez de una región de alta aceptabilidad delimitada para un dulce de zanahoria, mediante muestreo restringido de mezclas, un metamodelo cúbico especial y simulación de Monte Carlo. Se realizó un análisis computacional con polvo de zanahoria, una mezcla de chiles y sal como componentes restringidos. Se generaron combinaciones aleatorias dentro del simplex factible, se filtraron según los límites experimentales y se evaluaron mediante el metamodelo de referencia. Posteriormente, se analizaron la distribución de la aceptabilidad predicha, la robustez regional, la sensibilidad local, la incertidumbre predictiva y las formulaciones candidatas. La región experimental mostró una aceptabilidad heterogénea predicha, con zonas diferenciadas en lugar de un desempeño uniforme. Una subregión más estrecha presentó respuestas más estables y una mayor proporción de mezclas por encima del umbral de desempeño. La simulación de Monte Carlo mostró que la incertidumbre predictiva fue relevante, por lo que la selección de candidatas se basó en la aceptabilidad esperada, la probabilidad de cumplir el umbral y la amplitud del intervalo. En conclusión, la región delimitada se presentó como un espacio heterogéneo, dentro del cual la subregión prometedora ofreció una base consistente para seleccionar mezclas candidatas a la validación sensorial.

Palabras clave: *Dirichlet, Scheffer, diseño de mezclas, optimización, Monte Carlo*

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

El Editor y los Revisores declararon no tener conflicto de intereses.

Licencia: 

Robustness and Variability of a High Acceptability Region in a Carrot Candy: Analysis Using Mixture Design and Monte Carlo Simulation

ABSTRACT

Food formulation based on mixture designs can identify promising sensory regions, although predicted optima may be unstable when the experimental domain is limited. This study characterized the internal structure, variability, and robustness of a high-acceptability region delimited for a carrot-based confection using constrained mixture sampling, a special cubic metamodel, and Monte Carlo simulation. A computational analysis was conducted using carrot powder, a chili blend, and salt as constrained components. Random combinations were generated within the feasible simplex, filtered according to the experimental limits, and evaluated using the reference metamodel. Subsequently, the distribution of predicted acceptability, regional robustness, local sensitivity, predictive uncertainty, and candidate formulations was analyzed. The experimental region showed heterogeneous predicted acceptability, with differentiated zones rather than uniform performance. A narrower subregion showed more stable responses and a higher proportion of mixtures above the performance threshold. Monte Carlo simulation showed that predictive uncertainty was relevant; therefore, candidate selection was based on expected acceptability, the probability of meeting the threshold, and interval width. In conclusion, the delimited region was characterized as a heterogeneous space, within which the promising subregion provided a consistent basis for selecting candidate mixtures for sensory validation.

Keywords: *Dirichlet, Scheffé, mixture design, optimization, Monte Carlo*

The authors declare no conflict of interest.

The Editor and the Reviewers declared no conflict of interest.

License: 

INTRODUCCIÓN

La formulación de alimentos constituye un problema multicomponente, ya que sus propiedades sensoriales, fisicoquímicas y funcionales dependen de las proporciones de los ingredientes. Los diseños de mezclas permiten estudiar estas respuestas bajo la restricción de suma constante y modelar atributos como textura, reología, color, aroma y aceptabilidad general en productos alimentarios (Nadal et al., 2021; Silva et al., 2016; Skaltsi et al., 2022; Squeo et al., 2021). La aceptabilidad general integra la percepción de color, sabor, textura, aroma y apariencia; por ello, pequeñas variaciones composicionales pueden modificar el desempeño tecnológico y sensorial. Frente a las estrategias unifactoriales, estos diseños relacionan composición y respuesta con menos ensayos (Squeo et al., 2021).

La optimización mediante diseños de mezclas suele apoyarse en modelos polinomiales, análisis de varianza, superficies de respuesta y funciones de deseabilidad. En pasteles libres de gluten, un diseño D-óptimo evaluó el efecto de harina de arroz, harina de coco y goma xantana sobre calidad, actividad de agua, textura, color y aceptación sensorial, seguido de una confirmación experimental mediante intervalos de predicción (Taromsari & Ghiassi Tarzi, 2024).

La interpretación de estos modelos exige cautela cuando se dispone de pocas corridas. La validación, el análisis de coeficientes y el riesgo de sobreajuste son problemas recurrentes, mientras que los óptimos obtenidos mediante gráficos de contorno o superficies de respuesta requieren verificación experimental (Skaltsi et al., 2022; Squeo et al., 2021). En estudios con pocos puntos experimentales, la estimación del óptimo puede ser sensible a pequeñas variaciones en los datos, al nivel de exploración del espacio factible y a la complejidad del modelo ajustado (Y. Liu et al., 2021; Wang et al., 2021).

Para evaluar la estabilidad de las predicciones pueden emplearse estrategias

complementarias que cumplen funciones distintas. El muestreo mediante distribuciones Dirichlet permite generar composiciones que satisfacen la restricción de suma unitaria propia de los diseños de mezclas y, tras aplicar los límites de cada componente, explorar de manera sistemática el simplex factible (Pal & Heumann, 2022). En este trabajo, se utilizó este procedimiento para ampliar computacionalmente la exploración del espacio de formulación e identificar la distribución espacial de la aceptabilidad predicha y las zonas de desempeño favorable. En una etapa diferente, la simulación de Monte Carlo se empleó para propagar la incertidumbre paramétrica del metamodelo, mediante la variación conjunta de sus coeficientes, y estimar para cada formulación la distribución de las predicciones, la probabilidad de superar un umbral de desempeño y la amplitud de los intervalos de incertidumbre (Kuk et al., 2019; Serban et al., 2019). Ambos procedimientos son herramientas computacionales y no constituyen una validación experimental. Esta última requiere contrastar las formulaciones seleccionadas con nuevas observaciones sensoriales, por lo que, en el presente estudio, se plantea como una etapa posterior destinada a comprobar empíricamente el desempeño de las mezclas candidatas (Squeo et al., 2021; Taromsari & Ghiassi Tarzi, 2024).

La delimitación de regiones de formulación ofrece más información que la selección de un óptimo puntual. Permite reconocer zonas donde la respuesta permanece favorable ante cambios moderados en la composición y evaluar la influencia de los parámetros, las aproximaciones del modelo y las condiciones de entrada sobre las estimaciones (Serban et al., 2019; Skaltsi et al., 2022; Squeo et al., 2021).

El objetivo de este trabajo fue caracterizar, mediante un enfoque computacional, la estructura interna, la variabilidad y la robustez de una región de alta aceptabilidad general delimitada para un dulce enchilado a base de zanahoria. Para ello, se aplicó un muestreo restringido del

espacio de mezclas, se estimó la respuesta mediante un metamodelo cúbico especial y se evaluó la incertidumbre mediante simulación de Monte Carlo. El análisis permitió describir la distribución de la aceptabilidad predicha, identificar zonas de desempeño consistente y seleccionar formulaciones candidatas. El alcance del estudio se limitó a la caracterización computacional de la región y a la priorización de mezclas, por lo que la validación sensorial de las formulaciones seleccionadas se plantea como una etapa experimental posterior.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño general del análisis

Se desarrolló una etapa computacional complementaria a partir de los datos experimentales previamente publicados para un dulce enchilado a base de zanahoria (Pérez-Flores et al., 2026). Del estudio previo proceden las nueve formulaciones generadas mediante un diseño de mezclas de vértices extremos, los datos de aceptabilidad general obtenidos mediante evaluación sensorial, los límites experimentales de los componentes y el modelo cúbico especial ajustado a dicha respuesta. En ese estudio también se realizaron el ajuste y diagnóstico inicial del modelo, la exploración mediante superficies de respuesta y una optimización numérica; por tanto, estos elementos se consideraron en el presente trabajo como información experimental y metodológica de referencia, y no como nuevos datos sensoriales. Se analizaron tres componentes ajustables: polvo de zanahoria (x_1), mezcla de chiles (x_2) y sal (x_3). Las proporciones se restringieron a $0.30 \leq x_1 \leq 0.60$, $0.20 \leq x_2 \leq 0.50$ y $0.10 \leq x_3 \leq 0.20$, rangos establecidos en el diseño experimental previo. Para la nueva exploración computacional se impuso explícitamente la condición composicional $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ en todas las mezclas evaluadas. Esta restricción permitió limitar el análisis al simplex factible y evitar soluciones no composicionales como la obtenida en la etapa de optimización numérica del estudio previo.

La contribución analítica del presente manuscrito consistió en ampliar la exploración de ese dominio mediante muestreo computacional restringido y en caracterizar la variabilidad y robustez de las predicciones dentro del espacio factible. Para ello, se generaron composiciones aleatorias mediante muestreo Dirichlet y se evaluaron con el modelo cúbico especial de referencia. A partir de estas predicciones se caracterizaron la región experimental completa y una subregión previamente señalada como prometedora, se cuantificó la proporción de mezclas que superaban un umbral de desempeño, se examinó la sensibilidad local de la respuesta y se propagó la incertidumbre de los coeficientes del metamodelo mediante simulación de Monte Carlo. Adicionalmente, se comparó el comportamiento predictivo del modelo cúbico especial con el de un modelo cuadrático especial y se integraron la aceptabilidad esperada, la probabilidad de superar el umbral y la amplitud del intervalo de incertidumbre para priorizar formulaciones candidatas.

El ajuste y los diagnósticos del modelo de referencia se recalcularon a partir de los datos experimentales originales con el propósito de establecer una línea de base consistente para estos análisis posteriores; su inclusión no representa una nueva etapa experimental. No se generaron nuevas observaciones sensoriales. Por ello, los resultados obtenidos en este estudio corresponden exclusivamente a una caracterización y priorización computacional dentro del dominio experimental previamente establecido. Las formulaciones candidatas resultantes se proponen para una etapa posterior de validación sensorial experimental.

Los análisis se realizaron en R con una semilla fijada mediante 'set.seed(123)' para asegurar la reproducibilidad. Se utilizaron los paquetes 'stats', 'mixexp', 'MCMCpack', 'MASS', 'ggplot2' y 'lmtest' para el ajuste y diagnóstico de modelos, el muestreo Dirichlet, la simulación de coeficientes, la visualización y la evaluación de heterocedasticidad.

Modelo de referencia

El modelo cúbico especial previamente desarrollado a partir de las nueve formulaciones experimentales se reconstruyó con los datos originales para disponer de un metamodelo de referencia consistente con los análisis computacionales realizados en este estudio. Esta etapa no generó nuevas observaciones sensoriales ni se consideró una nueva validación experimental del modelo. El metamodelo se evaluó mediante análisis de varianza, métricas de ajuste y diagnóstico residual. Se examinaron los gráficos de residuos frente a valores ajustados, Q-Q, escala-localización y residuos frente al apalancamiento. La normalidad y la homocedasticidad se evaluaron mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Breusch-Pagan, respectivamente. La relación entre la aceptabilidad observada y la aceptabilidad predicha se analizó mediante una regresión auxiliar, junto con el cálculo de R^2 , RMSE y MAE.

Debido al reducido número de formulaciones experimentales ($n = 9$) y al carácter prácticamente saturado del modelo cúbico especial, estas métricas y diagnósticos se utilizaron exclusivamente para describir el comportamiento local del metamodelo dentro del dominio experimental. En estas condiciones, los procedimientos de remuestreo como la validación *leave-one-out* pueden resultar especialmente variables, ya que la exclusión de una sola formulación modifica de manera importante un ajuste realizado con muy pocos grados de libertad; por ello, no se utilizaron como evidencia independiente de capacidad predictiva en el presente análisis. La incertidumbre asociada al modelo se abordó posteriormente mediante la propagación de los coeficientes y de su matriz de varianzas y covarianzas en la simulación de Monte Carlo. En consecuencia, el modelo de referencia se empleó como una aproximación local para caracterizar computacionalmente el espacio de mezclas, y el alcance de sus predicciones se restringió a los límites experimentales previamente establecidos.

Muestreo restringido del espacio de mezclas

Se generaron 50,000 combinaciones aleatorias mediante una distribución Dirichlet con parámetros $\alpha = (1, 1, 1)$, lo que permitió conservar la restricción composicional $x_1 + x_2 + x_3 = 1$. Posteriormente, las mezclas se filtraron para mantener únicamente aquellas que cumplieron de manera simultánea los límites experimentales de cada componente.

La región experimental se definió mediante los intervalos $0.30 \leq x_1 \leq 0.60$, $0.20 \leq x_2 \leq 0.50$ y $0.10 \leq x_3 \leq 0.20$. Además, se delimitó una subregión prometedora definida por $0.50 \leq x_1 \leq 0.60$, $0.20 \leq x_2 \leq 0.30$ y $0.10 \leq x_3 \leq 0.15$, correspondiente a una zona previamente identificada con potencial sensorial favorable. El tamaño inicial de muestreo se estableció para obtener una cobertura suficiente del simplex factible y conservar un número adecuado de mezclas después del filtrado por restricciones.

La estabilidad numérica del muestreo se verificó mediante la condición $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ antes de aplicar los filtros regionales. Las mezclas externas al dominio experimental se descartaron para evitar extrapolaciones.

Predicción, robustez y sensibilidad local

Las combinaciones retenidas en la región experimental y en la subregión prometedora se evaluaron mediante el modelo cúbico especial. La distribución de la aceptabilidad predicha se describió con medidas de tendencia central, dispersión, valores extremos y percentiles.

La robustez regional se calculó como la proporción de combinaciones con aceptabilidad predicha igual o superior a 113:

Robustez = número de combinaciones con $\hat{y} \geq 113$ / número total de combinaciones evaluadas

El umbral de 113 se estableció con base en el comportamiento del modelo y en los valores de aceptabilidad asociados con formulaciones previamente identificadas como favorables.

Esta clasificación permitió comparar la región experimental completa con la subregión prometedora y distinguir zonas de alto desempeño dentro del espacio de formulación.

En la subregión prometedora, la sensibilidad local se evaluó mediante correlaciones entre cada componente y la aceptabilidad predicha. También se ajustó un modelo lineal local con $\hat{y}$ como variable dependiente y las proporciones de zanahoria, chile y sal como variables independientes. Los resultados se interpretaron únicamente dentro de la subregión, debido a que los efectos composicionales dependen de la restricción de suma unitaria y del balance entre ingredientes.

Propagación de incertidumbre y selección de formulaciones candidatas

La incertidumbre se propagó mediante 1,000 simulaciones de Monte Carlo. Este número se estableció como un tamaño de simulación suficiente para obtener estimaciones probabilísticas con una precisión adecuada para el propósito comparativo y exploratorio del estudio, manteniendo un costo computacional razonable. Los coeficientes del modelo cúbico especial se generaron a partir de una distribución normal multivariada definida por los coeficientes estimados y su matriz de varianzas y covarianzas. Para cada combinación de la subregión se calcularon la media, la mediana, los percentiles 5 y 95, el ancho del intervalo de incertidumbre del 90 % y la probabilidad de superar el umbral $\hat{y} \geq 113$.

La simulación no correspondió a una cadena de Markov; por ello, no se aplicaron criterios de convergencia MCMC. Las estimaciones obtenidas con las 1,000 simulaciones se resumieron mediante la media y la mediana de la probabilidad de alto desempeño y del ancho del intervalo de incertidumbre del 90 %. No se realizó un análisis adicional incrementando progresivamente el número de simulaciones; por tanto, la estabilidad numérica frente al tamaño de la simulación se reconoce como una limitación del análisis.

Como control de sensibilidad del modelo, se comparó el modelo cúbico especial con un

modelo cuadrático especial ajustado con los mismos componentes, pero sin el término de interacción ternaria. Para ambos modelos se calcularon métricas de desempeño y se compararon las predicciones generadas dentro de la subregión prometedora. La diferencia entre predicciones se calculó como $\hat{y}$ cúbico – $\hat{y}$ cuadrático, con el propósito de identificar posibles desplazamientos asociados con la complejidad del modelo.

Las formulaciones candidatas se seleccionaron en la subregión prometedora utilizando el percentil 90 (P90) de la aceptabilidad general predicha como criterio de preselección. Este punto de corte se empleó como un criterio operativo para conservar el decil superior de la distribución, en lugar de seleccionar únicamente la formulación con el máximo predicho. Su elección buscó equilibrar selectividad y disponibilidad de alternativas, manteniendo un conjunto reducido de mezclas con desempeño esperado alto sobre el cual incorporar posteriormente los criterios de incertidumbre. El P90 no se consideró un umbral inferencial ni un criterio de optimalidad por sí mismo. Las combinaciones con $\hat{y} \geq P90$ se ordenaron de mayor a menor valor de $\hat{y}$ y se expresaron en proporciones y en gramos, considerando una masa total de 107 g para la fase sólida evaluada. La selección final integró aceptabilidad esperada, probabilidad de superar el umbral y amplitud del intervalo de incertidumbre. De esta manera, el valor predicho se utilizó para la preselección, mientras que las métricas derivadas de Monte Carlo permitieron discriminar entre formulaciones con desempeños esperados similares. Las formulaciones resultantes se propusieron como alternativas prioritarias para validación experimental posterior.

RESULTADOS

Ajuste del metamodelo de referencia

El modelo cúbico especial presentó un ajuste global adecuado para describir la aceptabilidad general dentro del dominio experimental evaluado. El análisis de varianza mostró un

estadístico $F = 601.5$ y un valor de $p = 0.001661$, lo que indica que la estructura del modelo explicó una proporción relevante de la variabilidad observada en la respuesta sensorial.

El análisis por términos indicó que los componentes lineales de zanahoria y chile aportaron la mayor parte de la varianza explicada. La sal, las interacciones binarias y la interacción ternaria presentaron menor evidencia estadística individual. En este dominio, la respuesta estuvo dominada por el balance principal entre zanahoria y chile, mientras que la sal y las interacciones contribuyeron al comportamiento regional de las mezclas.

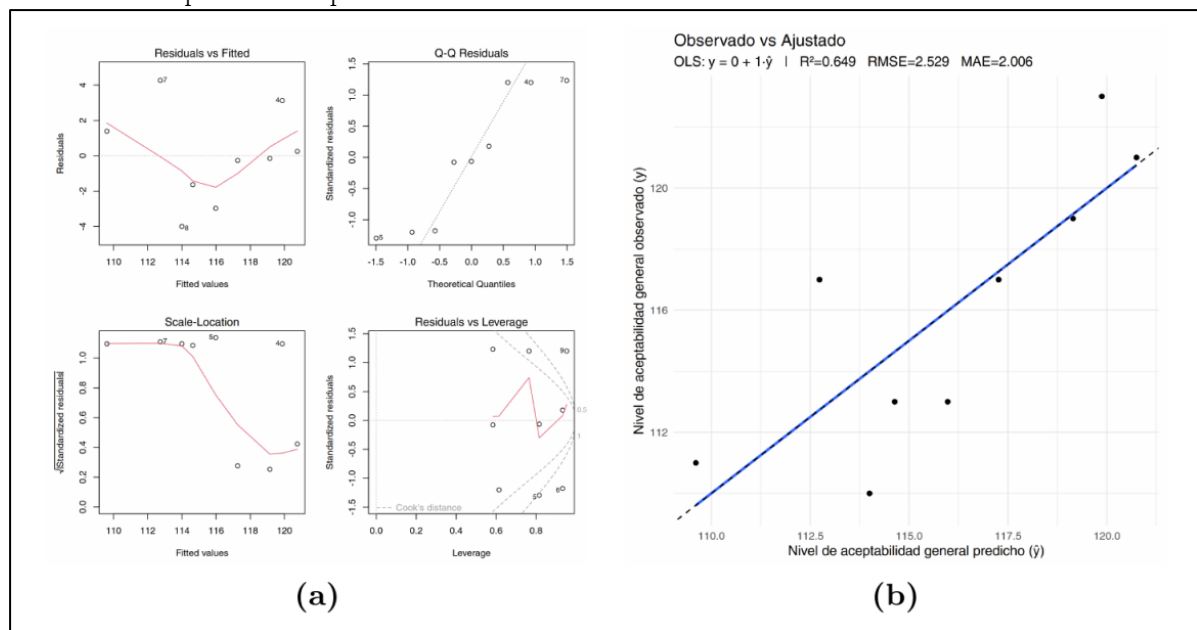
Los diagnósticos residuales mostraron una distribución alrededor de cero. El gráfico de residuos frente a valores ajustados presentó cierta curvatura en la línea suavizada; el gráfico Q-Q mostró una alineación razonable con la recta teórica, con desviaciones en los extremos; el gráfico de escala-localización evidenció cambios en la dispersión residual, y el gráfico de residuos frente al apalancamiento mostró observaciones con influencia relativamente alta.

Las pruebas complementarias fueron consistentes con la inspección visual. La prueba de Shapiro-Wilk no indicó desviación estadística respecto a la normalidad de los residuos ($W = 0.97492$; $p = 0.9332$), y la prueba de Breusch-Pagan no mostró evidencia de heterocedasticidad ($BP = 8.0026$; $p = 0.2379$).

La comparación entre valores observados y ajustados mostró una relación positiva. La recta de calibración presentó un intercepto cercano a cero y una pendiente de 1, compatible con ausencia de sesgo sistemático global. El desempeño predictivo fue moderado, con $R^2 = 0.6489$, $RMSE = 2.5294$ y $MAE = 2.0060$. Los residuos del ajuste observado-predicho variaron entre -4.0000 y 4.2641 unidades de aceptabilidad.

Con base en el ajuste global, los diagnósticos residuales y la ausencia de sesgo sistemático evidente, el modelo cúbico especial se utilizó como base para la caracterización computacional posterior.

Figura 1. Ajuste y diagnóstico del modelo de referencia para la aceptabilidad general del dulce enchilado a base de zanahoria. (a) Gráficos diagnósticos del modelo cúbico especial, incluyendo residuos frente a valores ajustados, gráfico Q–Q de residuos, gráfico de escala-localización y residuos frente al apalancamiento con distancia de Cook. (b) Relación entre los valores observados y ajustados de aceptabilidad general, con la línea de ajuste y la de referencia de predicción perfecta.



Fuente: Elaboración propia

Exploración computacional de la región experimental

La exploración computacional permitió describir la distribución de la aceptabilidad predicha dentro del espacio de mezcla definido por los límites de zanahoria, chile y sal. Las combinaciones retenidas dentro de las restricciones experimentales mostraron gradientes internos de desempeño.

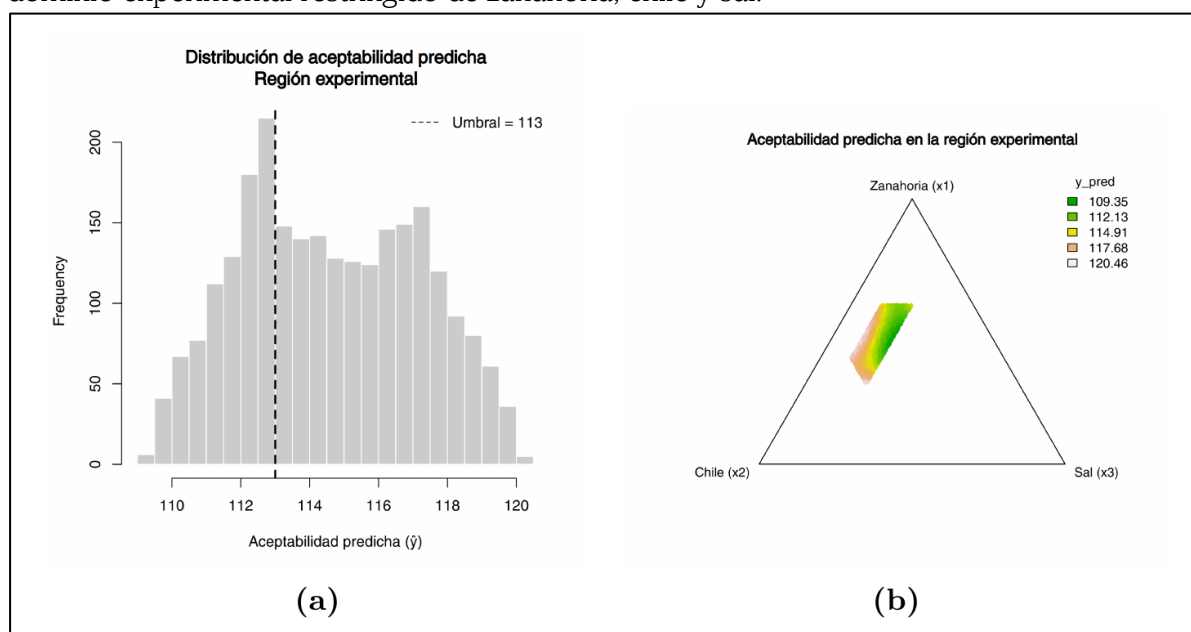
La aceptabilidad predicha en la región experimental varió entre 109.35 y 120.46. La media fue de 114.61 y la mediana de 114.43, por encima del umbral de alto desempeño establecido en $\hat{y} \geq 113$. La desviación estándar fue de 2.59, lo que evidencia variabilidad interna dentro del dominio evaluado.

La proporción de combinaciones por encima del umbral fue de 66.7 %, correspondiente a 1657 de las 2484 mezclas simuladas dentro de la región experimental. El percentil 10 fue de 111.27, mientras que el percentil 90 alcanzó 118.15, lo que demuestra la presencia de mezclas

con niveles contrastantes de aceptabilidad predicha dentro del mismo espacio factible.

El mapa ternario mostró que los puntos simulados cubrieron únicamente la región delimitada por los límites experimentales de cada componente. En ese dominio, los valores más altos de aceptabilidad predicha se concentraron en una franja asociada con mayor proporción relativa de zanahoria y niveles controlados de chile y sal.

Figura 2. Caracterización computacional de la región experimental mediante la aceptabilidad predicha. (a) Distribución de frecuencias de la aceptabilidad general predicha en la región experimental, con una línea punteada que indica el umbral de alto desempeño establecido en 113. (b) Mapa ternario de aceptabilidad predicha para las mezclas simuladas dentro del dominio experimental restringido de zanahoria, chile y sal.



Fuente: Elaboración propia

Delimitación y desempeño de la subregión prometedora

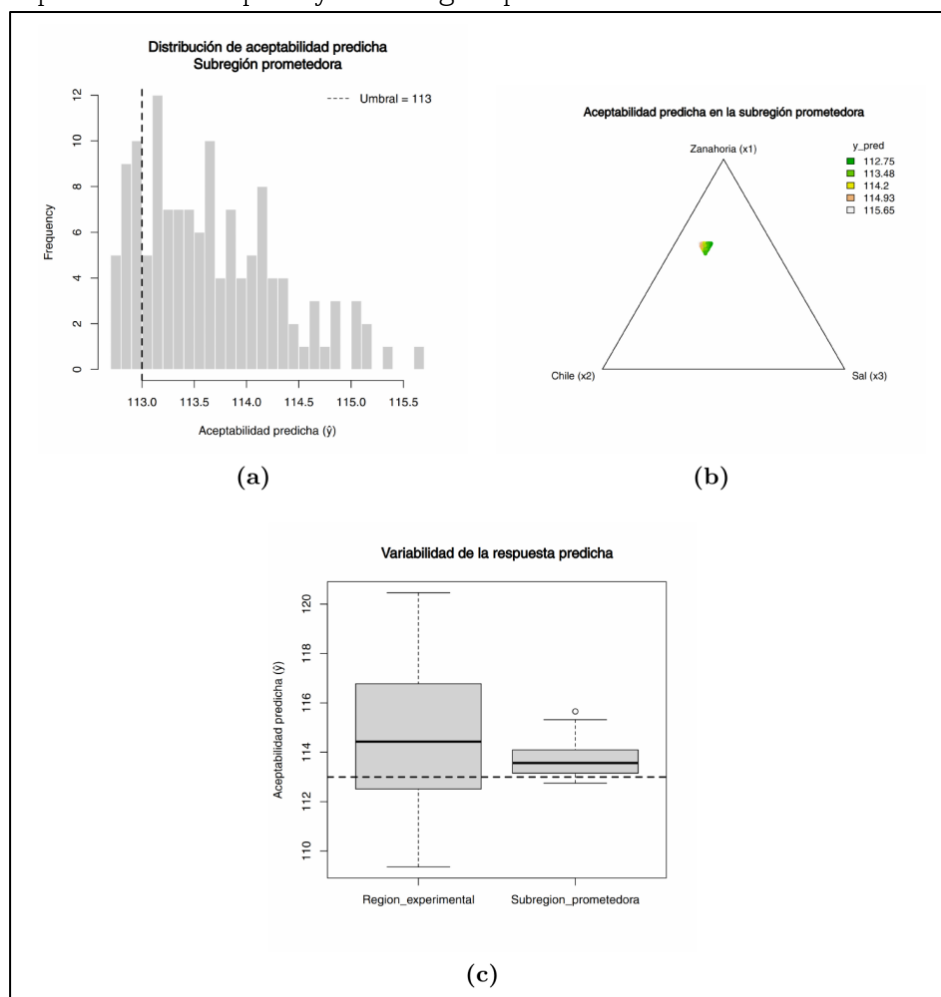
La subregión prometedora permitió acotar el análisis a una zona del espacio de mezcla con menor dispersión de la respuesta predicha. La aceptabilidad en esta subregión varió entre 112.75 y 115.65. La media fue de 113.66 y la mediana de 113.57, ambas ligeramente por encima del umbral de alto desempeño. La desviación estándar fue de 0.66, menor que la observada en la región experimental completa.

El percentil 10 fue de 112.90 y el percentil 90 de 114.64, lo que indica una distribución más compacta de la respuesta. De las 131 combinaciones evaluadas en esta zona, 107 superaron

$\hat{y} \geq 113$, equivalente al 81.7 %. Esta proporción fue mayor que la obtenida para la región experimental completa, donde el valor fue de 66.7 %.

El mapa ternario ubicó la subregión en una zona compacta del simplex, asociada con proporciones relativamente altas de zanahoria y niveles controlados de chile y sal. La comparación mediante boxplot mostró que la región experimental completa tuvo mayor amplitud, con valores máximos más altos y valores mínimos más bajos, mientras que la subregión concentró la respuesta en un intervalo más estrecho y favorable.

Figura 3. Análisis comparativo de la subregión prometedora frente a la región experimental completa. (a) Distribución de frecuencias de la aceptabilidad general predicha en la subregión prometedora, con una línea punteada que indica el umbral de alto desempeño establecido en 113. (b) Mapa ternario de aceptabilidad predicha para las mezclas simuladas en la subregión prometedora, definida por altas proporciones de zanahoria y niveles controlados de chile y de sal. (c) Comparación de la variabilidad de la aceptabilidad predicha entre la región experimental completa y la subregión prometedora.



Fuente: Elaboración propia

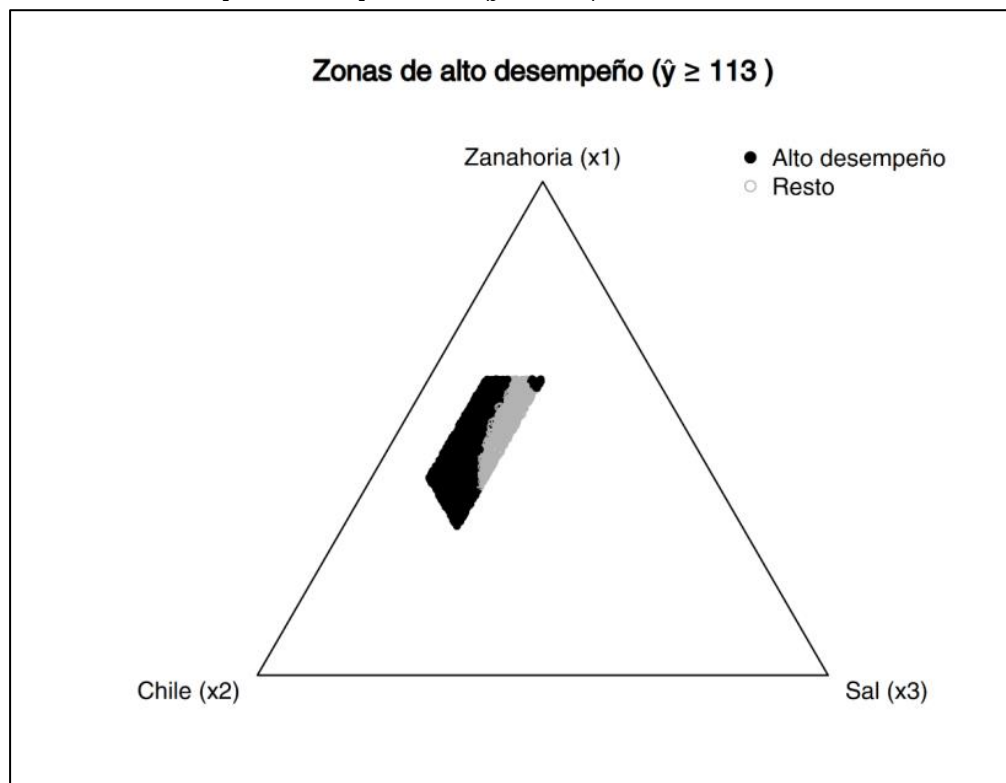
Robustez y sensibilidad local del espacio de formulación

La evaluación de robustez permitió clasificar el espacio de formulación con base en el umbral de aceptabilidad predicha. Las combinaciones con $\hat{y} \geq 113$ se consideraron de alto desempeño, mientras que las restantes quedaron fuera del criterio definido.

En la región experimental completa, 1657 de 2484 combinaciones superaron el umbral, con una robustez de 66.7 %. En la subregión prometedora, la robustez aumentó a 81.7 %, con 107 de 131 combinaciones por encima del umbral. Las mezclas de alto desempeño se agruparon en una franja específica del mapa ternario, lo que indica una distribución espacial diferenciada dentro del dominio factible.

La clasificación binaria también mostró diferencias en la respuesta predicha. En el grupo de alto desempeño, la aceptabilidad presentó una media de 116.05, con valores entre 113.00 y 120.46. En las combinaciones restantes, la media fue de 111.73, con valores entre 109.35 y 113.00. La salida de optimización de referencia generó una combinación con $x_1 = 0.60$, $x_2 = 0.50$ y $x_3 = 0.10$, cuya suma fue 1.20. Esta solución no cumplió la restricción $x_1 + x_2 + x_3 = 1$; por ello, la evaluación en el simplex restringido permitió conservar únicamente mezclas composicionalmente factibles.

Figura 4. Evaluación de la robustez del espacio de formulación mediante zonas de alto desempeño. Mapa ternario de mezclas simuladas en la región experimental, clasificadas según el umbral de aceptabilidad predicho ($\hat{y} \geq 113$).



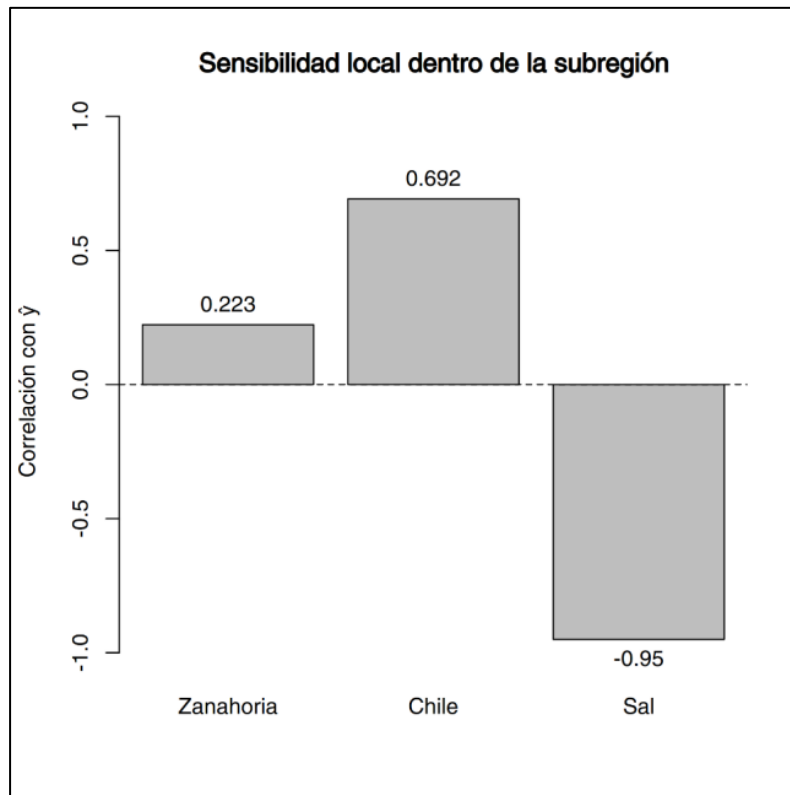
Fuente: Elaboración propia

El análisis de sensibilidad local indicó que, exclusivamente dentro de la subregión prometedora evaluada, la sal presentó la asociación negativa más fuerte con la aceptabilidad predicha ($r = -0.950$). El chile mostró una correlación positiva alta ($r = 0.692$), mientras que la zanahoria presentó una correlación positiva menor ($r = 0.223$). Estas correlaciones describen únicamente la covariación entre composición y respuesta predicha en esta porción restringida del simplex; debido a la naturaleza composicional de los datos y al carácter local del análisis, no representan efectos independientes de los componentes ni pueden generalizarse al dominio experimental completo.

El modelo lineal local presentó $R^2 = 0.9687$ y R^2 ajustado = 0.9682. Debido a la restricción de mezcla, uno de los componentes quedó no estimable por singularidad. Bajo esta parametrización, los coeficientes estimados para zanahoria y chile fueron positivos, con valores de 47.43 y 64.16, respectivamente. Al igual que las correlaciones, estos coeficientes

describen el comportamiento de la respuesta únicamente dentro de la subregión analizada y no se utilizaron para inferir efectos globales en el espacio completo de formulación.

Figura 5. Sensibilidad local de la aceptabilidad predicha en la subregión prometedora. Correlación entre las proporciones de zanahoria, chile y sal y la aceptabilidad general predicha en la subregión seleccionada.

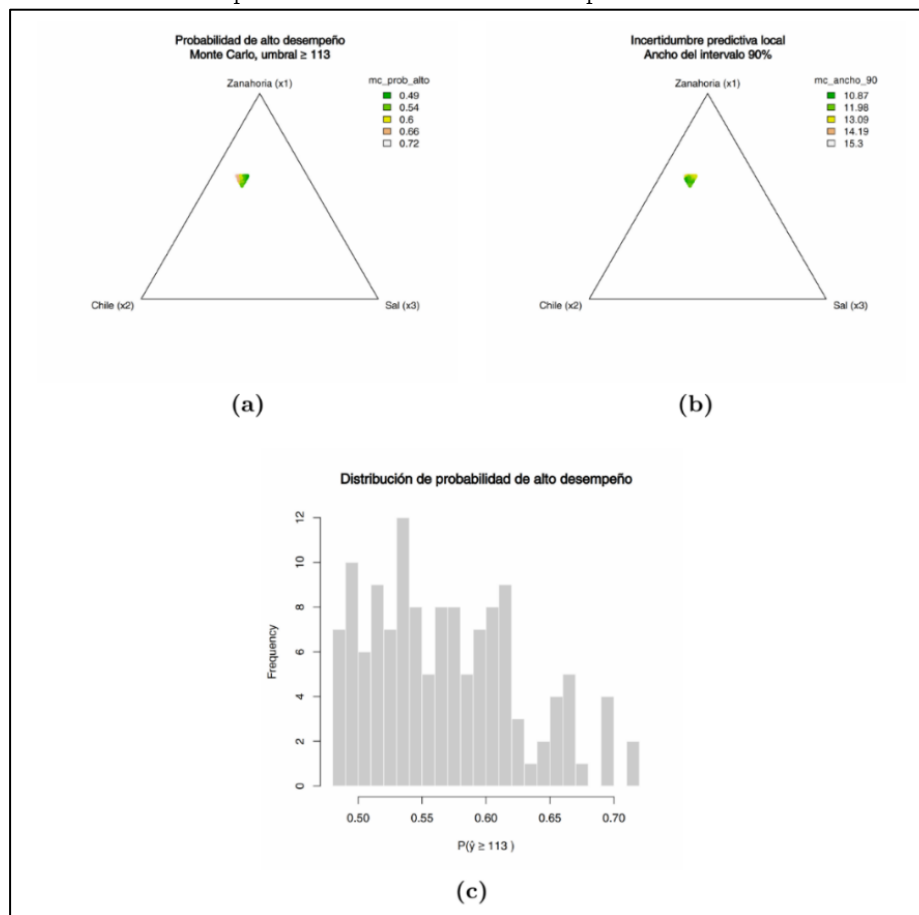


Fuente: Elaboración propia

Incertidumbre predictiva y comparación de modelos

La simulación de Monte Carlo permitió evaluar la estabilidad de las predicciones en la subregión prometedora. La probabilidad de alto desempeño, definida como $P(\hat{y} \geq 113)$, varió entre 0.486 y 0.717, con una media de 0.569 y una mediana de 0.563. Estos valores indican que la probabilidad de superar el umbral cambió entre combinaciones dentro de la misma subregión. La incertidumbre predictiva local también presentó variación. El ancho del intervalo del 90 % osciló entre 10.87 y 15.30 unidades de aceptabilidad, con una media de 12.08 y una mediana de 11.91. Las combinaciones con mayor aceptabilidad esperada no siempre presentaron el menor intervalo de incertidumbre.

Figura 6. Evaluación de la incertidumbre predictiva mediante simulación de Monte Carlo en la subregión prometedora. (a) Mapa ternario de la probabilidad de alto desempeño, estimada como la proporción de simulaciones de Monte Carlo en las que la aceptabilidad predicha superó el umbral $\hat{y} \geq 113$. (b) Mapa ternario de incertidumbre predictiva local, expresada como el ancho del intervalo del 90 % de las predicciones simuladas. (c) Distribución de frecuencias de la probabilidad de alto desempeño en las mezclas simuladas de la subregión.

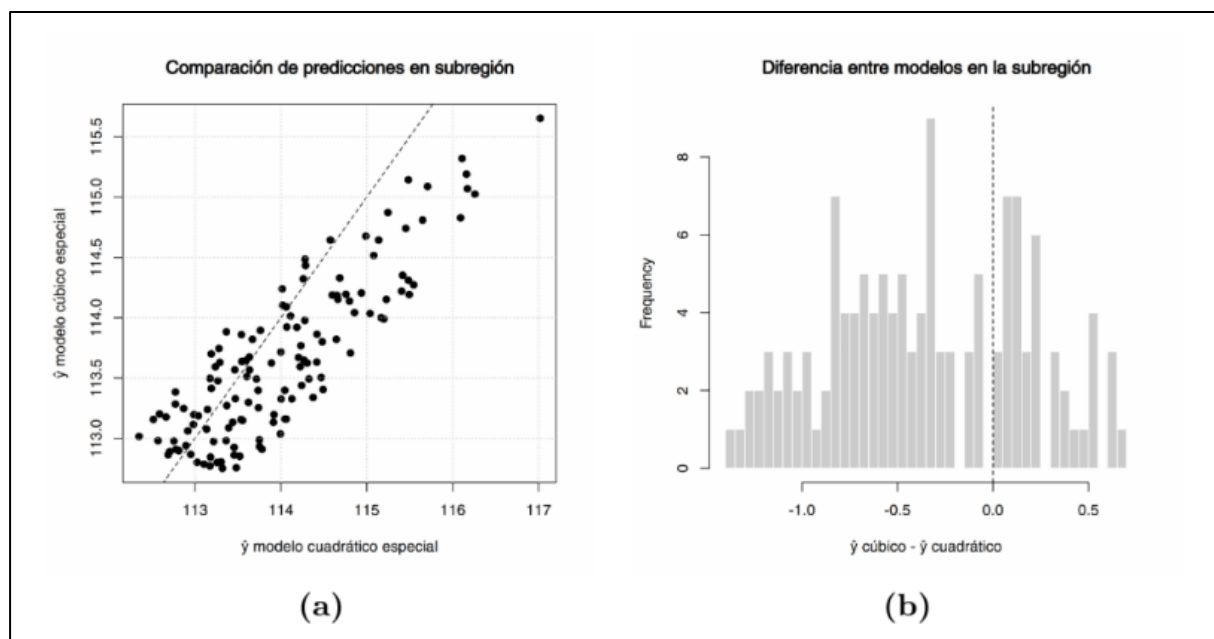


Fuente: Elaboración propia

La comparación entre el modelo cúbico especial y el modelo cuadrático especial permitió evaluar la dependencia de las predicciones respecto a la complejidad del modelo. El modelo cuadrático especial presentó $R^2 = 0.9993$, R^2 ajustado = 0.9980 y $p = 7.621 \times 10^{-5}$. En el ANOVA, los componentes lineales de zanahoria y chile concentraron los mayores aportes, mientras que las interacciones binarias presentaron menor evidencia estadística individual. La relación entre las predicciones de ambos modelos en la subregión mostró una tendencia positiva. Las mezclas con valores altos en un modelo tendieron a conservar valores altos en el otro. Sin embargo, varios puntos quedaron por debajo de la línea de igualdad, lo que indica

que el modelo cúbico generó predicciones menores que el cuadrático en parte de las combinaciones. La diferencia $\hat{y}$ cúbico – $\hat{y}$ cuadrático presentó una media de -0.355 unidades y una mediana de -0.374 , con valores entre -1.364 y 0.667 . Esta distribución, desplazada hacia valores negativos, indica que el modelo cúbico fue ligeramente más conservador en la subregión. En la comparación observado-ajustado del conjunto experimental original, el modelo cúbico mostró mejor desempeño relativo que el cuadrático, con $R^2 = 0.6489$, $RMSE = 2.5294$ y $MAE = 2.0060$, frente a $R^2 = 0.5028$, $RMSE = 3.0099$ y $MAE = 2.4375$ para el modelo cuadrático.

Figura 7. Comparación entre el modelo cúbico especial y el modelo cuadrático especial en la subregión prometedora. (a) Relación entre las predicciones de aceptabilidad general generadas por el modelo cuadrático especial y por el modelo cúbico especial para las mezclas simuladas en la subregión. La línea diagonal representa la igualdad entre ambos modelos. (b) Distribución de las diferencias entre predicciones, calculadas como $\hat{y}$ cúbico – $\hat{y}$ cuadrático; la línea punteada indica una diferencia igual a cero.



Fuente: Elaboración propia

Formulaciones candidatas para validación experimental

Las formulaciones candidatas se seleccionaron dentro de la subregión prometedora a partir del segmento superior de aceptabilidad predicha. Para la presentación de resultados se conservaron las cinco mezclas con mayor $\hat{y}$, considerando además la probabilidad de superar

el umbral y el ancho del intervalo de incertidumbre.

Las candidatas presentaron valores de $\hat{y}$ entre 115.09 y 115.65, por encima de la media de la subregión (113.66) y del percentil 75 (114.10). Su composición se concentró en un intervalo estrecho: zanahoria entre 0.585 y 0.599, chile entre 0.295 y 0.300 y sal entre 0.103 y 0.115. En una base de 107 g de fase sólida, estas proporciones correspondieron aproximadamente a 62.63–64.10 g de zanahoria, 31.61–32.08 g de mezcla de chiles y 11.06–12.29 g de sal.

La formulación C1 presentó el mayor valor de aceptabilidad predicha ($\hat{y} = 115.65$), junto con el mayor ancho del intervalo de incertidumbre (15.30). La formulación C4 mostró una aceptabilidad predicha ligeramente menor ($\hat{y} = 115.14$), con la mayor probabilidad de superar el umbral (0.717) y un intervalo de incertidumbre más estrecho (11.53).

Tabla 1. Formulaciones candidatas sugeridas para validación experimental.

Candidata	x_1 Zanahoria	x_2 Chile	x_3 Sal	Zanahoria (g)	Chile (g)	Sal (g)	$\hat{y}$	$P(\hat{y} \geq 113)$	Ancho IC 90 %
C1	0.599	0.298	0.103	64.10	31.84	11.06	115.65	0.696	15.30
C2	0.592	0.298	0.110	63.34	31.89	11.78	115.32	0.712	12.63
C3	0.594	0.295	0.110	63.60	31.61	11.79	115.19	0.691	12.86
C4	0.585	0.300	0.115	62.63	32.08	12.29	115.14	0.717	11.53
C5	0.590	0.297	0.114	63.08	31.77	12.14	115.09	0.700	11.91

Fuente: Elaboración propia

DISCUSIONES

Ajuste del metamodelo de referencia

El modelo cúbico especial se consideró dentro de las restricciones del diseño original, debido a que fue ajustado con nueve formulaciones y pocos grados de libertad residuales. En diseños de mezclas aplicados a alimentos, la elección entre modelos cuadráticos o cúbicos especiales depende del equilibrio entre ajuste, parsimonia, diagnóstico residual y capacidad predictiva

dentro del dominio experimental (Loubes et al., 2016; Squeo et al., 2021; Taromsari & Ghiassi Tarzi, 2024).

La menor evidencia estadística individual de la sal y las interacciones debe analizarse considerando la geometría del simplex. Debido a la restricción de suma unitaria, los coeficientes no representan efectos independientes; las superficies de respuesta, los mapas ternarios y los análisis regionales proporcionan una interpretación más adecuada del comportamiento de la mezcla (Adeyeye et al., 2022; Becerra & Goos, 2023; Oguaghamba & Onyia, 2019).

Los diagnósticos respaldaron su uso como aproximación local dentro del dominio experimental. La distribución de los residuos, la ausencia de heterocedasticidad estadística y la relación entre valores observados y ajustados proporcionaron elementos para utilizar el metamodelo en la caracterización computacional posterior. Sin embargo, el tamaño del conjunto experimental y la influencia relativa de algunas observaciones exigen considerar las predicciones como hipótesis de formulación que deben confirmarse sensorialmente (Buruk Sahin et al., 2016; Loubes et al., 2016; Squeo et al., 2021; Taromsari & Ghiassi Tarzi, 2024).

Exploración computacional de la región experimental

La exploración computacional reveló zonas con diferentes niveles de aceptabilidad predicha, lo que indica que la factibilidad composicional no implica un desempeño sensorial uniforme. En diseños de mezclas, la respuesta debe interpretarse dentro del simplex, donde los mapas ternarios y las superficies permiten reconocer patrones espaciales asociados con la composición (Adeyeye et al., 2022; Becerra & Goos, 2023).

La amplitud de la distribución mostró que el dominio incluye combinaciones favorables y mezclas de menor desempeño. La selección de formulaciones debe considerar esta estructura interna y mantenerse dentro de los límites evaluados para evitar extrapolaciones (Loubes

et al., 2016; Squeo et al., 2021).

La concentración de valores altos en una franja del mapa ternario justificó la delimitación de una subregión. Las predicciones del modelo permiten priorizar zonas y formulaciones, aunque su adopción tecnológica o sensorial requiere confirmación experimental (Squeo et al., 2021; Taromsari & Ghiassi Tarzi, 2024).

Delimitación y desempeño de la subregión prometedora

El acotamiento composicional concentró respuestas más estables que las observadas en la región experimental completa. Este resultado concuerda con el uso de superficies de respuesta para identificar zonas de alto desempeño y reducir la dependencia de máximos puntuales (De Souza et al., 2012; L. Liu et al., 2020).

La menor dispersión indica que una ventana más estrecha puede favorecer la consistencia de la aceptabilidad predicha. En formulaciones alimentarias, las regiones acotadas se emplean para equilibrar atributos sensoriales y tecnológicos y seleccionar candidatas más consistentes para evaluaciones posteriores (BenJemaa et al., 2022; Giannakourou et al., 2020; Hu et al., 2025; Martin-Diana et al., 2017).

La ubicación de la subregión también es coherente con el producto: la zanahoria constituye la base, mientras que el chile y la sal deben mantenerse en proporciones que conserven el carácter enchilado y el agrado general. Este balance sugiere que la respuesta depende de las proporciones relativas y de las interacciones entre componentes (Becerra & Goos, 2023; De Souza et al., 2012).

En consecuencia, la subregión reduce el espacio de búsqueda a un conjunto manejable de mezclas factibles y estables, evitando que la selección se base únicamente en el máximo predicho.

Robustez, sensibilidad local e incertidumbre predictiva

Las mezclas de alto desempeño se agruparon en una zona definida, lo que es coherente con un patrón de aceptabilidad predicha asociado al balance composicional y a la posición de las formulaciones dentro del simplex.

La sensibilidad local mostró una asociación negativa de la sal con la aceptabilidad, una asociación positiva del chile y una asociación positiva menor de la zanahoria. Estas relaciones se limitan a la subregión evaluada, pues las asociaciones observadas entre cada componente y la respuesta predicha están condicionadas por la suma unitaria y el ajuste simultáneo de los ingredientes restantes (Becerra & Goos, 2023; Oguaghamba & Onyia, 2019). Por tanto, estos patrones deben considerarse descriptores locales del comportamiento del metamodelo y no efectos sensoriales independientes de los componentes.

La simulación de Monte Carlo incorporó la incertidumbre del metamodelo a la selección. Las diferencias en la probabilidad de superar el umbral y en la amplitud de los intervalos mostraron que, bajo la incertidumbre propagada del modelo, formulaciones con aceptabilidad esperada similar podían presentar diferentes perfiles de incertidumbre predictiva. Los criterios probabilísticos resultan útiles cuando el modelo procede de un conjunto experimental reducido (Kuk et al., 2019; Serban et al., 2019).

La comparación con el modelo cuadrático especial proporcionó un control adicional. El modelo cúbico generó predicciones ligeramente más conservadoras en la subregión y presentó métricas relativamente más favorables en la comparación entre valores observados y ajustados. Estos resultados son consistentes con diferencias locales asociadas a la estructura y complejidad de ambos modelos, pero no constituyen una validación independiente de la superioridad del modelo cúbico. Los modelos flexibles pueden describir patrones locales en formulaciones con interacciones, pero deben evaluarse considerando el tamaño de muestra,

la incertidumbre y la necesidad de validación posterior (Boateng et al., 2023; Jiang et al., 2025).

Formulaciones candidatas para validación experimental

La selección integró el desempeño regional, la robustez, la sensibilidad local y la incertidumbre predictiva. Este procedimiento redujo la exploración computacional a un conjunto de mezclas factibles, conservando la condición $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ y evitando extrapolaciones fuera del dominio estudiado (Becerra & Goos, 2023; De Souza et al., 2012).

Las candidatas compartieron una proporción alta de zanahoria, un nivel moderado-alto de chile y una cantidad controlada de sal, en concordancia con la sensibilidad local. El mayor valor predicho no coincidió necesariamente con el mejor balance probabilístico; por ello, la aceptabilidad esperada se interpretó junto con la probabilidad de superar el umbral y la amplitud de la incertidumbre.

Esta forma de priorización permite seleccionar mezclas con mayor solidez para la validación, sin depender únicamente del máximo estimado por el modelo (Anaya-Esparza et al., 2023; Ramírez-Brewer et al., 2024). Las cinco formulaciones propuestas deben entenderse como alternativas prioritarias para la siguiente etapa experimental: mezclas composicionalmente factibles, con aceptabilidad predicha favorable y distintos balances entre probabilidad e incertidumbre.

CONCLUSIONES

La caracterización computacional mostró que la región de alta aceptabilidad previamente delimitada presentó una estructura interna diferenciada, con zonas de mayor consistencia predictiva y con variabilidad suficiente para justificar una selección regional de formulaciones. Los resultados computacionales sugieren que la subregión prometedora constituyó un espacio de priorización con mayor estabilidad predictiva que la región experimental completa, al concentrar mezclas con desempeño esperado favorable y criterios probabilísticos más

favorables para orientar su selección hacia una etapa de validación sensorial. Por lo tanto, los resultados fueron parcialmente consistentes con la hipótesis planteada, ya que la subregión permitió reducir el espacio experimental y orientar la selección de formulaciones candidatas, aunque el desempeño estimado quedó condicionado por la incertidumbre del metamodelo y requiere confirmación mediante nuevas evaluaciones sensoriales.

Como perspectiva, las formulaciones candidatas deberán evaluarse mediante ensayos sensoriales confirmatorios con panelistas y consumidores objetivo, incorporando mediciones instrumentales de textura, color y estabilidad durante almacenamiento; además, será necesario evaluar experimentalmente el desempeño de la subregión mediante diseños con réplicas, modelos alternativos y criterios de optimización multirrespuesta que integren aceptabilidad, pungencia, salinidad y factibilidad tecnológica bajo condiciones reales de elaboración.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adeyeye, A. D., Akpan, O. U., & Adedeji, P. A. (2022). Mixture model with inverse terms for weld-metal chemistry prediction as a function of saw flux ingredients. *Nigerian Journal of Technology*, 41(5), 870-878. <https://doi.org/10.4314/njt.v41i5.7>
- Anaya-Esparza, L. M., Aurora-Vigo, E. F., Villagrán, Z., Rodríguez-Lafitte, E., Ruvalcaba-Gómez, J. M., Solano-Cornejo, M. Á., Zamora-Gasga, V. M., Montalvo-González, E., Gómez-Rodríguez, H., Aceves-Aldrete, C. E., & González-Silva, N. (2023). Design of Experiments for Optimizing Ultrasound-Assisted Extraction of Bioactive Compounds from Plant-Based Sources. *Molecules*, 28(23), 7752. <https://doi.org/10.3390/molecules28237752>

- Becerra, M., & Goos, P. (2023). Bayesian D- and I-optimal designs for choice experiments involving mixtures and process variables. *Food Quality and Preference*, 110(104928). <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2023.104928>
- BenJemaa, M., Rahali, F. Z., Falleh, H., Beji-Serairi, R., Megdiche-Ksouri, W., Hamrouni, I., Hammami, M., Nehme, R., Pereira, R. B., Andrés, S., Bouhallab, S., Pereira, D. M., Ceciliani, F., Abdennebi-Najar, L., & Ksouri, R. (2022). Essential Oil Stabilisation by Response Surface Methodology (RSM): Nanoemulsion Formulation, Physicochemical, Microbiological, and Sensory Investigations. *Molecules*, 27(21), 7330. <https://doi.org/10.3390/molecules27217330>
- Boateng, I. D., Kuehnelt, L., Daubert, C. R., Agliata, J., Zhang, W., Kumar, R., Flint-Garcia, S., Azlin, M., Somavat, P., & Wan, C. (2023). Updating the status quo on the extraction of bioactive compounds in agro-products using a two-pot multivariate design. A comprehensive review. *Food & Function*, 14(2), 569-601. <https://doi.org/10.1039/D2FO02520E>
- Buruk Sahin, Y., Aktar Demirtaş, E., & Burnak, N. (2016). Mixture design: A review of recent applications in the food industry. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 22(4), 297-304. <https://doi.org/10.5505/pajes.2015.98598>
- De Souza, V. R., Pereira, P. A. P., Pinheiro, A. C. M., Nunes, C. A., Silva, T. L. T., Borges, S. V., & Queiroz, F. (2012). Multivariate approaches for optimization of the acceptance: Optimization of a Brazilian Cerrado fruit jam using mixture design and parallel factor analysis. *Journal of Sensory Studies*, 27(6), 417-424. <https://doi.org/10.1111/joss.12005>

- Giannakourou, M. C., Lazou, A. E., & Dermesonlouoglou, E. K. (2020). Optimization of Osmotic Dehydration of Tomatoes in Solutions of Non-Conventional Sweeteners by Response Surface Methodology and Desirability Approach. *Foods*, 9(10), 1393. <https://doi.org/10.3390/foods9101393>
- Hu, Y., Lu, Z., Hu, Z., Liu, G., Li, G., Huang, J., Chin, Y., Yuan, C., & Wang, D. (2025). Deep-sea salt as a novel additive for 3D-printed surimi: Boosting protein bonding, antioxidant capacity, and digestibility. *Food Chemistry: X*, 30, 102942. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102942>
- Jiang, Y., Bin Noor Azlee, N. I., Ko, W. S., Chen, K., Lim, B. G., & Nelson, A. Z. (2025). Plant-based protein extrusion optimization: Comparison between machine learning and conventional experimental design. *Current Research in Food Science*, 11, 101157. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2025.101157>
- Kuk, D.-H., Ha, E.-S., Ha, D.-H., Sim, W.-Y., Lee, S.-K., Jeong, J.-S., Kim, J.-S., Baek, I., Park, H., Choi, D. H., Yoo, J.-W., Jeong, S. H., Hwang, S.-J., & Kim, M.-S. (2019). Development of a Resveratrol Nanosuspension Using the Antisolvent Precipitation Method without Solvent Removal, Based on a Quality by Design (QbD) Approach. *Pharmaceutics*, 11(12), 688. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics11120688>
- Liu, L., Yang, X., Bhandari, B., Meng, Y., & Prakash, S. (2020). Optimization of the Formulation and Properties of 3D-Printed Complex Egg White Protein Objects. *Foods*, 9(2), 164. <https://doi.org/10.3390/foods9020164>
- Liu, Y., Zhou, S., Han, W., Li, C., Liu, W., Qiu, Z., & Chen, H. (2021). Detection of Adulteration in Infant Formula Based on Ensemble Convolutional Neural Network and Near-Infrared Spectroscopy. *Foods*, 10(4), 785. <https://doi.org/10.3390/foods10040785>

- Loubes, M. A., Flores, S. K., & Tolaba, M. P. (2016). Effect of formulation on rice noodle quality: Selection of functional ingredients and optimization by mixture design. *LWT - Food Science and Technology*, 69, 280-286. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.01.055>
- Martin-Diana, A. B., Izquierdo, N., Albertos, I., Sanchez, M. S., Herrero, A., Sanz, M. A., & Rico, D. (2017). Valorization of Carob's Germ and Seed Peel as Natural Antioxidant Ingredients in Gluten-Free Crackers: Carob Antioxidant By-Products in Gluten-Free Snack. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(2), e12770. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12770>
- Nadal, J., Ávila, S., Boing, L., Pereira, M. M., Quadros, D. A. D., Gibbert, L., Silva, A. D., Frizon, C. N. T., Krüger, C. C. H., & Ferreira, S. M. R. (2021). Influence of binary mixtures of cassava starch and rice flour on the chemical and sensory characteristics of gluten-free bread. *Research, Society and Development*, 10(3), e13910313120. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i3.13120>
- Oguaghamba, O. A., & Onyia, M. E. (2019). Modified and generalized full cubic polynomial response surface methodology in engineering mixture design. *Nigerian Journal of Technology*, 38(1), 52-59. <https://doi.org/10.4314/njt.v38i1.8>
- Pal, S., & Heumann, C. (2022). Clustering compositional data using Dirichlet mixture model. *PLOS ONE*, 17(5), e0268438. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268438>
- Pérez-Flores, J. G., Hernández-Callejas, Y. C., García-Curiel, L., Ocampo-Salinas, I. O., Pérez-Escalante, E., Ángel-Jijón, C., & Trejo-Díaz, G. N. (2026). Delimitación de una región de alta aceptabilidad para un dulce de zanahoria mediante diseño de vértices extremos. *Boletín Científico de las Ciencias Económico Administrativas del ICEA*, 14, 98-108. <https://doi.org/10.29057/icea.v14iEspecial.16650>

- Ramírez-Brewer, D., Quintana, S. E., & García-Zapateiro, L. A. (2024). Modeling and optimization of microwave-assisted extraction of total phenolics content from mango (*Mangifera indica*) peel using response surface methodology (RSM) and artificial neural networks (ANN). *Food Chemistry: X*, 22, 101420. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101420>
- Serban, R., Wang, Y., Choi, K. K., & Jayakumar, P. (2019). Special Issue: Sensitivity Analysis and Uncertainty Quantification. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 14(2), 020301. <https://doi.org/10.1115/1.4042262>
- Silva, L. B. D., Queiroz, M. B., Fadini, A. L., Fonseca, R. C. C. D., Germer, S. P. M., & Efraim, P. (2016). Chewy candy as a model system to study the influence of polyols and fruit pulp (açaí) on texture and sensorial properties. *LWT*, 65, 268-274. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.08.006>
- Skaltsi, A., Marinopoulou, A., Poriazi, A., Petridis, D., & Papageorgiou, M. (2022). Development and optimization of gluten-free biscuits with carob flour and dry apple pomace. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(10), e15938. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15938>
- Squeo, G., De Angelis, D., Leardi, R., Summo, C., & Caponio, F. (2021). Background, Applications and Issues of the Experimental Designs for Mixture in the Food Sector. *Foods*, 10(5), 1128. <https://doi.org/10.3390/foods10051128>
- Taromsari, A., & Ghiassi Tarzi, B. (2024). Optimization of Functional Gluten-Free Cake Formulation Using Rice Flour, Coconut Flour, and Xanthan Gum via D-Optimal Mixture Design. *Food Science & Nutrition*, 12(12), 10734-10755. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4523>

Wang, J., Chen, Q., Belwal, T., Lin, X., & Luo, Z. (2021). Insights into chemometric algorithms for quality attributes and hazards detection in foodstuffs using Raman/surface enhanced Raman spectroscopy. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(3), 2476-2507. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12741>

La Revista utiliza códigos para identificar al Editor y al equipo de
PARES REVISORES. Si tiene dudas o consultas, contacte a:
contacto@cienciayreflexion.org

Código de Editor: 105
Código de Revisores: 1173