

Introducción

El proceso de **fritura** es una técnica culinaria ampliamente usada tanto en la industria alimentaria como en los hogares, esto es debido a que provoca en los alimentos una propiedades organolépticas y sensoriales totalmente únicas. Siendo los alimentos más usados para este proceso los ricos en almidón y más concretamente las papas fritas [1,2].

Proceso de fritura: introducir un alimento en un aceite o grasa a altas temperaturas durante un periodo de tiempo y en presencia de aire.

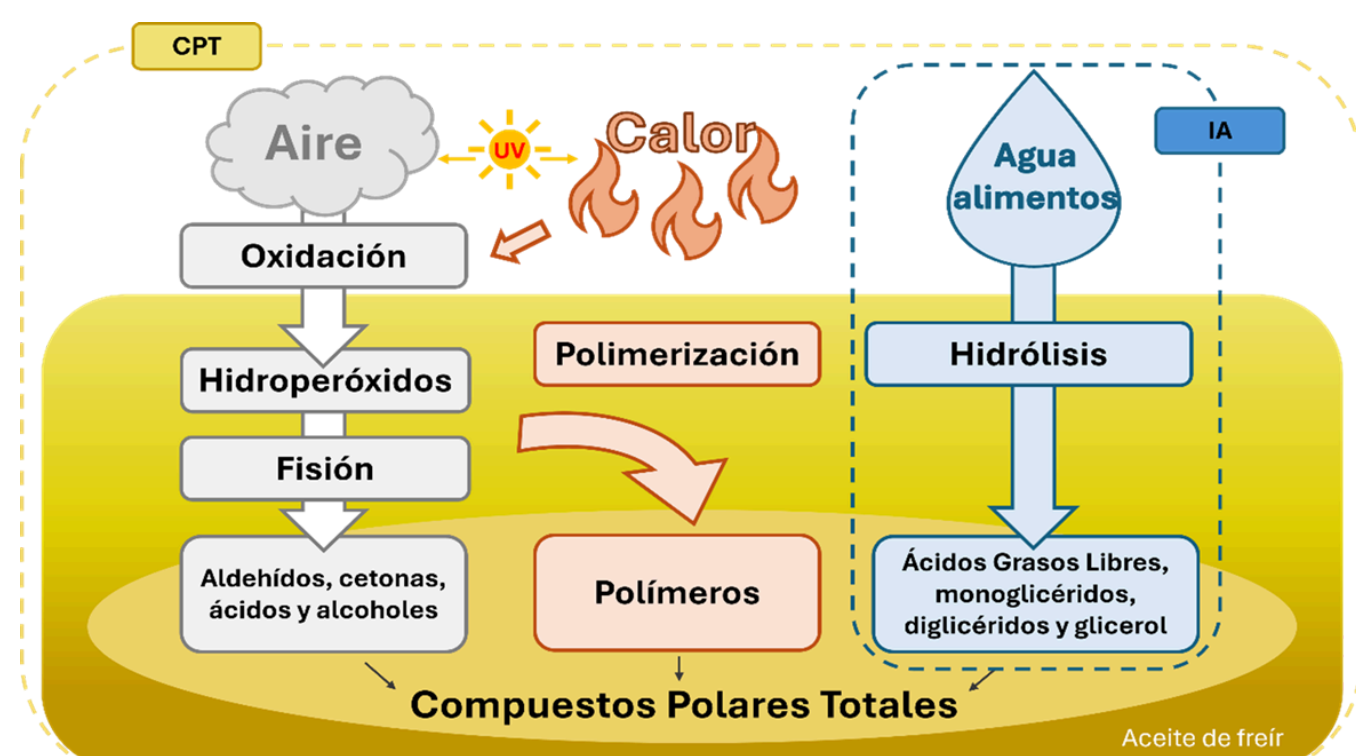


Figura 1. Principales reacciones y compuestos que se forman en el proceso de fritura [1,2].

Este proceso desencadena una serie de reacciones físico químicas que se ven favorecidas por las altas temperaturas, el oxígeno, el tiempo, el aceite de fritura, la calidad y el agua del alimento y los materiales del envase usado.

Evaluación de la calidad del aceite



Estos compuestos en exceso pueden afectar a la calidad organoléptica de los alimentos y llegar a comprometer la salud del consumidor [2].

Objetivos

Establecer condiciones óptimas de fritura para minimizar el contenido de AGL en el aceite y proporcionar una base científica sólida para la industria alimentaria, para mejorar la calidad y seguridad de los alimentos fritos, prolongando la vida útil del aceite y garantizando la satisfacción del consumidor.

1. Empleo de la Metodología de Superficie de Box-Behnken (BBD), considerando tres variables independientes: **temperatura de fritura (T), tiempo de fritura y relación masa de papas/masa de aceite (mpapa/maceite); y como variable dependiente, la inversa del índice de acidez (1/IA)**
2. Realización de los experimentos de fritura de papas siguiendo el **diseño BBD**
3. Análisis de **contenido de AGL** del aceite después de ser sometido al proceso de fritura
4. Análisis de datos y modelado

Metodología

Materias primas: aceite de girasol alto oleico, seleccionado debido a su mayor estabilidad en la fritura que el aceite común [2] y las **papas fritas congeladas** por ser un alimento popular y presentar homogeneidad en su preparación.

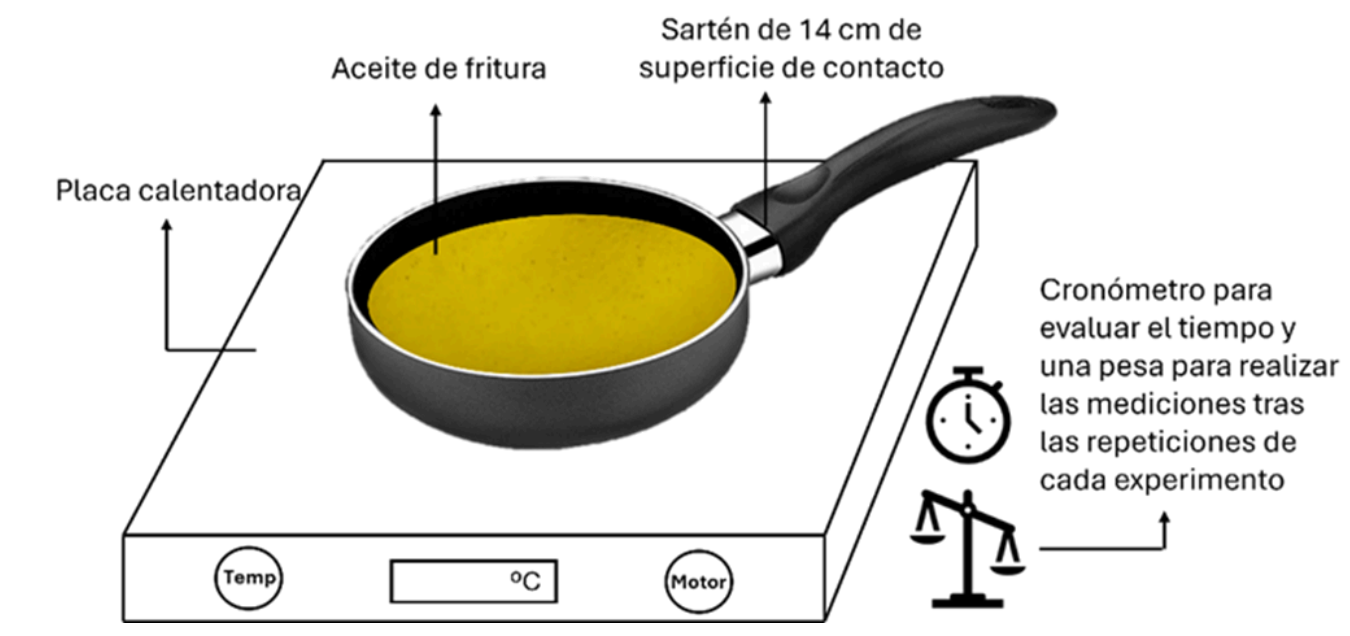


Figura 2. Dispositivo experimental En todos los experimentos se mantuvo constante la cantidad de aceite (180 g).

Evaluación del aceite: índice de acidez (IA) del aceite tras ser sometido a tres ciclos de fritura en las mismas condiciones.

IA: Número de miligramos de hidróxido potásico necesarios para neutralizar los ácidos grasos libres presentes en un gramo de aceite.

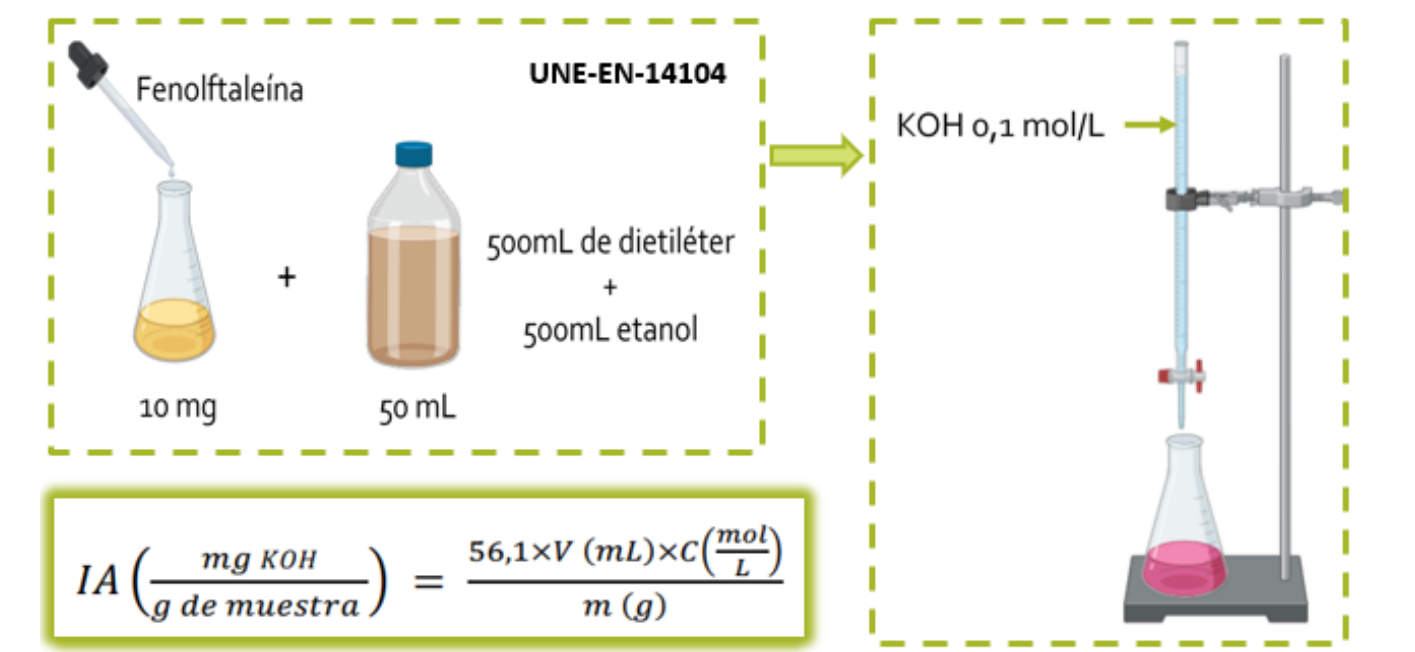


Figura 3. Método del Índice de acidez según la norma UNE-EN-14104 [3].

Metodología superficie respuesta (MSR) basada en un diseño Box-Behnken (BBD), de tres niveles y tres factores [4].

Se desarrollaron los cuatro pasos de los que consta la MSR, a) diseño de los experimentos, b) realización de los experimentos, c) modelización de la superficie respuesta y d) optimización de la variable respuesta.

Se estimó la relación entre las tres variables independientes (X_1 , X_2 y X_3) y la respuesta ($1/IA$) mediante un modelo de regresión polinómica.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 \beta_{ij} X_i X_j$$

Ecuación 1. Modelo de regresión polinómica.

Variables independientes	Símbolo	Niveles de los factores		
		-1	0	1
T (°C)	X_1	250	270	290
Tiempo (min)	X_2	5	7,5	10
m_{papa}/m_{aceite} (g/g)	X_3	0,2	0,35	0,5
Variable dependiente	$1/IA$ (1/mg KOH/g aceite)	Y Optimizar		

Statgraphics Centurion XVI, versión 16.1.18

Tabla 1. Variables con sus rangos y niveles para cada variable independiente en BBD.

Resultados

Experimento	T(°C)	Tiempo (min)	m_{papa}/m_{aceite} (g/g)	1/IA (1/mg KOH/g)
1	270	10	0,5	4,46
2	250	7,5	0,2	4,32
3	290	7,5	0,5	3,96
4	270	5	0,5	3,66
5	250	7,5	0,5	4,75
6	270	10	0,2	4,75
7	250	5	0,35	4,92
8	270	5	0,2	3,57
9	290	5	0,35	5,48
10	290	7,5	0,2	4,75
11	250	10	0,35	5,70
12	290	10	0,35	4,75
13	270	7,5	0,35	4,46
14	270	7,5	0,35	4,46
15	270	7,5	0,35	4,46

Tabla 2. Matriz del diseño experimental Box-Behnken junto con los valores de la variable respuesta.

Experimento	Valores Observados	Valores Ajustados	Residuos	Inferior 95,0% para Media	Superior 95,0% para Media
1	4,46	4,20	0,26	3,51	4,88
2	4,32	4,30	0,02	3,62	4,99
3	3,96	3,98	-0,02	3,30	4,66
4	3,66	3,88	-0,22	3,20	4,56
5	4,75	4,78	-0,03	4,09	5,46
6	4,75	4,53	0,22	3,85	5,21
7	4,92	4,67	0,25	3,99	5,36
8	3,57	3,83	-0,26	3,14	4,51
9	5,48	5,25	0,23	4,56	5,93
10	4,75	4,73	0,02	4,05	5,41
11	5,70	5,94	-0,24	5,26	6,63
12	4,75	5,00	-0,25	4,32	5,68
13	4,46	4,46	0	4,00	4,91
14	4,46	4,46	0	4,00	4,91
15	4,46	4,46	0	4,00	4,91

Tabla 3. Resultados estimados para 1/IA.

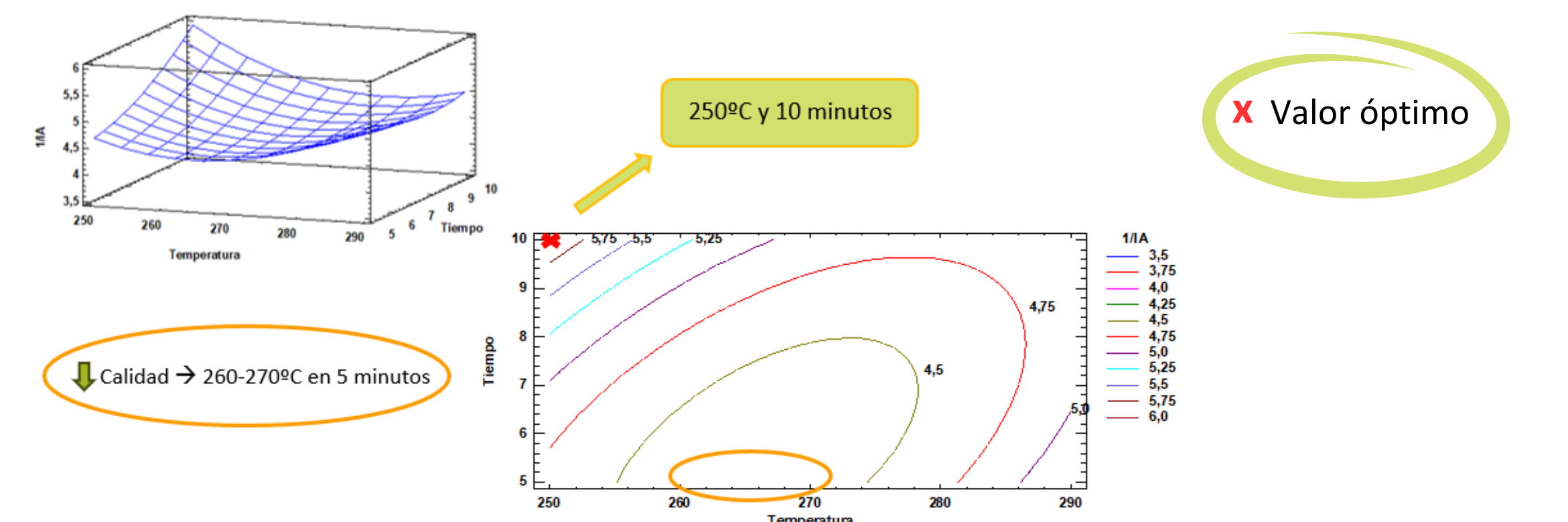


Figura 6. a) Perfil de superficie-respuesta en 3D y b) gráfico de contorno para la interacción entre la temperatura y el tiempo con una relación mpapa/maceite inicial de 0,35 para la inversa del índice de acidez.

Se realizaron un total de 15 experimentos, con tres réplicas en los puntos centrales de las variables independientes y usando orden aleatorio.

La ecuación que ajusta la relación entre la variable respuesta ($1/IA$) con las variables independientes se trata de una ecuación polinómica de segunda orden.

$$1/IA = 78,3261 - 0,653203X_1 + 1,73936X_2 + 46,3803X_3 + 0,00137258 X_1^2 - 0,00759034 X_1X_2 - 0,10203 X_1X_3 + 0,0335245 X_2^2 - 0,259 X_2X_3 - 24,8016X_3^2$$

Ecuación 2. Ecuación polinómica de segunda orden.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
X_1	0,0690817	1	0,0690817	0,73	0,4304
X_2	0,522081	1	0,522081	5,55	0,0650
X_3	0,0400139	1	0,0400139	0,43	0,5429
X_1^2	1,113	1	1,113	11,84	0,0184
X_2^2	0,576132	1	0,576132	6,13	0,0561
X_3^2	0,374767	1	0,374767	3,99	0,1024
X_1X_2	0,162099	1	0,162099	1,72	0,2461
X_1X_3	0,0377331	1	0,0377331	0,40	0,5542
X_2X_3	1,1498	1	1,1498	12,23	0,0173
Falta de ajuste	0,469979	3			
Error puro	0,0	2	0,0		
Total (corr.)	4,70604	14			
R^2	0,900133				
R_{adj}^2	0,720372				

Tabla 4. Análisis ANOVA

La ecuación describe satisfactoriamente la relación entre las variables y la función respuesta.

- El coeficiente de determinación explica el 90,0133% del porcentaje de la inversa del índice de acidez.
- Según estudios [5] para que el modelo sea capaz de predecir la respuesta de forma significativa y explicar el 95% de la variabilidad, la diferencia de $R^2 - RADJ^2$ debe ser inferior a 0,2. Dicha condición se cumple en este caso, $R^2 - RADJ^2 = 0,179761$.

Las interacciones cuadráticas de la temperatura (X_1^2) y mpapa/maceite (X_3^2) son significativas, sugiriendo efectos no lineales importantes de estos factores.

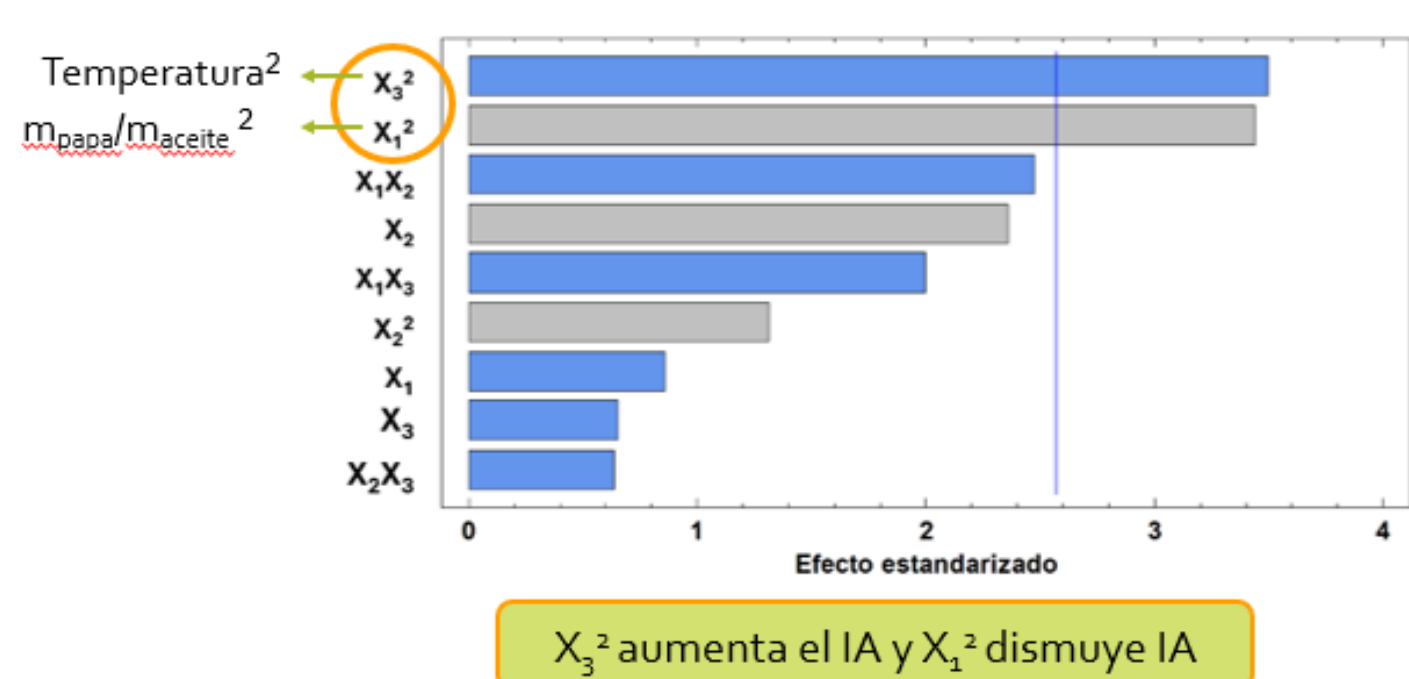


Figura 4. Diagrama de Pareto.

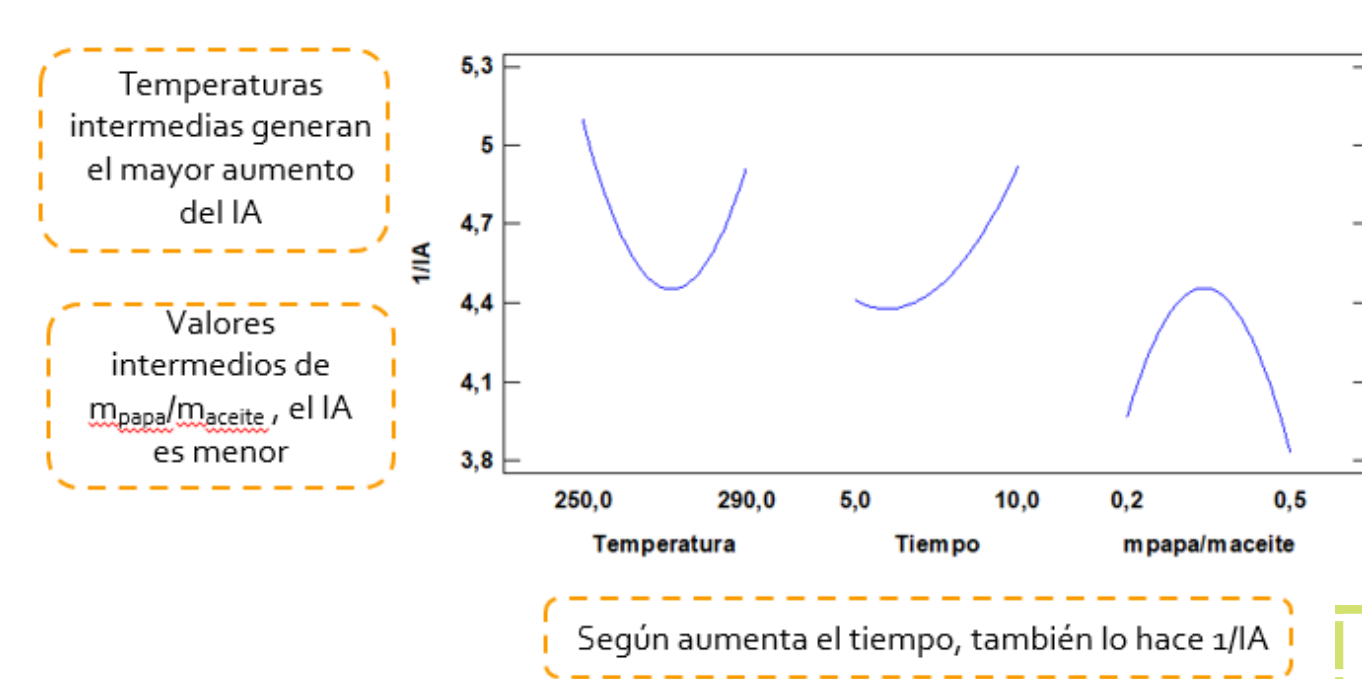


Figura 5. Efectos principales para la inversa del índice de acidez.

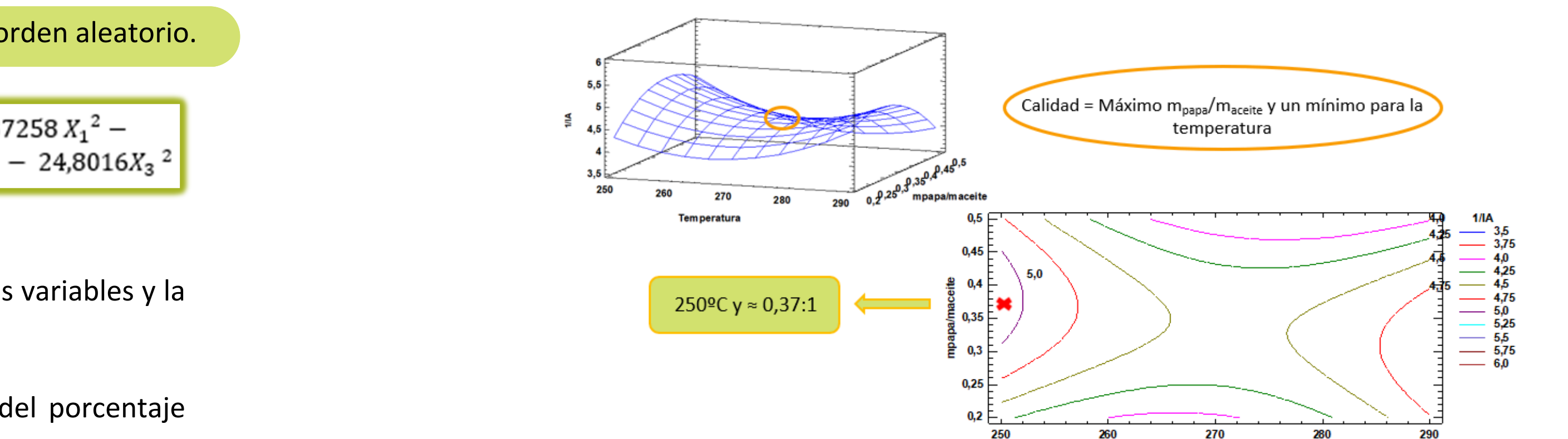


Figura 7. a) Perfil de superficie-respuesta en 3D y b) gráfico de contorno para la interacción entre la temperatura y la relación mpapa/maceite con un tiempo de 7,5 min para la inversa del índice de acidez.

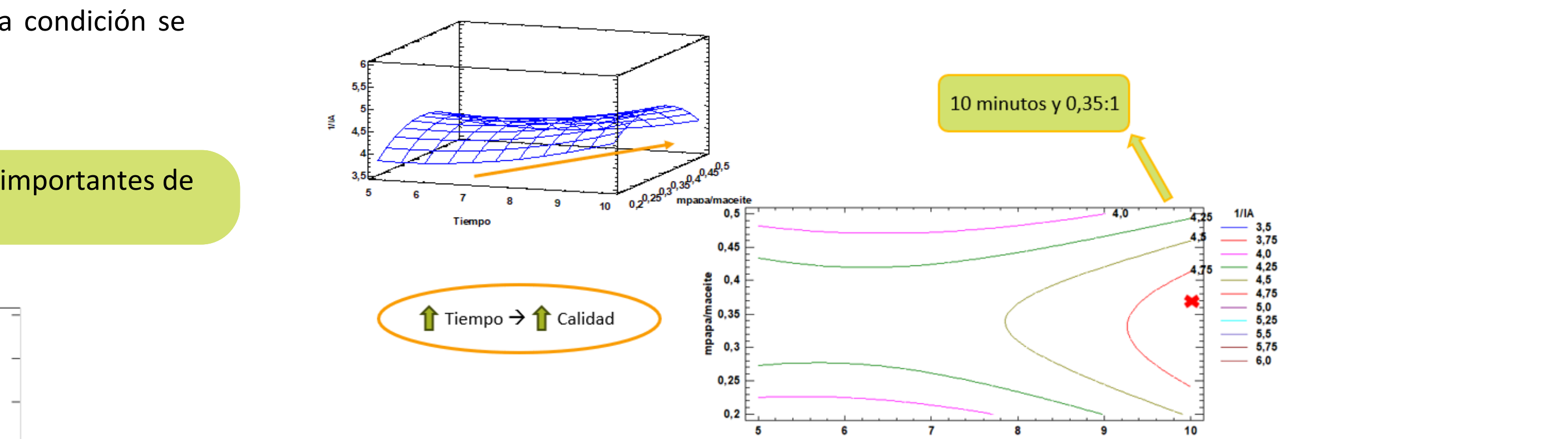


Figura 8. a) Perfil de superficie-respuesta en 3D y b) gráfico de contorno para la interacción entre el tiempo y la relación mpapa/maceite con una temperatura de 270°C para la inversa del índice de acidez.

A mayor tiempo, valores bajos o intermedios de temperatura y mpapa/maceite es cuando el valor del IA es más bajo y se mantiene la calidad del aceite durante más tiempo, más cercano a su IA inicial (0,16 mgKOH/g). El aceite no supera el 25% establecido por la normativa, podría seguir utilizándose [6].

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Temperatura	250,0	290,0	250,0
Tiempo	5,0	10,0	9,99987
m_{papa}/m_{aceite}	0,2	0,5	0,368366

Tabla 5. Condiciones óptimas para la inversa del índice de acidez.

Conclusiones

1. La optimización mediante el diseño experimental BBD permitió reducir el número de experimentos a 15, lo cual supone una reducción en el gasto económico, cantidad de materia prima, desechos generados y tiempo en la comparación de las variables para llegar a su optimización.
2. Se observó una tendencia general en los experimentos realizados: a más tiempo, menor temperatura y utilizando una mpapa/maceite media (0,35:1), la 1/IA aumenta y, por lo tanto, menor será su IA y mayor calidad conserva el aceite.
3. Ecuación de la relación entre $1/IA$ y las variables independientes

$$1/IA = 78,3261 - 0,653203X_1 + 1,73936X_2 + 46,3803X_3 + 0,00137258 X_1^2 - 0,00759034 X_1X_2 - 0,10203 X_1X_3 + 0,0335245 X_2^2 - 0,259 X_2X_3 - 24,8016X_3^2$$
4. La diferencia entre R^2 y $RADJ^2$ es próxima a 0,2 con lo que el modelo obtenido puede predecir la respuesta de forma significativa y explicar el 95% de la variabilidad.
5. Las condiciones óptimas para obtener el valor más alto de $1/IA$ (5,9513 1/mgKOH/g) son: **250°C, 10 minutos y relación mpapa/maceite de 0,37**.
6. En las condiciones óptimas, el porcentaje de compuestos polares es del **8%**, por debajo del límite establecido por la normativa de 25%.

Bibliografía

- [1] Ambra R, Lucchetti S, Pastore G. A Review of the Effects of Olive Oil-Cooking on Phenolic Compounds. Molecules. 20 de enero de 2022;27(3):661.
- [2] Sayyad R. Effects of deep-fat frying process on the oil quality during French fries preparation. J Food Sci Technol. julio de 2017;54(8):2224-9.
- [3] AENORMas. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). [citado 21 de junio de 2024]. UNE-EN 14104:2021:Fat and Oil Derivatives—Fatty Acid Methyl Esters (FAME)—Determination of the number of acids. Disponible en: https://plataforma-aenormas-aenor-com.accedes2.bbt.ull.es/standard/UNE/N0066636
- [4] Chueluecha N, Kaewchada A, Jaree A. Enhancement of biodiesel synthesis using co-solvent in a packed-microchannel. J Ind Eng Chem. 25 de julio de 2017;51:162-71.
- [5] Hashemzadeh Gargari M, Sadrameli SM. Investigating continuous biodiesel production from linseed oil in the presence of a Co-solvent and a heterogeneous based catalyst in a packed bed reactor. Energy. 1 de abril de 2018;148:888-95.
- [6] Ministerio de Relaciones con las Cortes y de la Secretaría del Gobierno. Orden de 26 de enero de 1989 por la que se aprueba la Norma de Calidad para los Aceites y Grasas Calentados [Internet]. Sec. 1, Orden ene 31, 1989 p. 2665-7. Disponible en: https://www.boe.es/eli/es/o/1989/01/26/1)