

IMPORTANCIA DEL DISEÑO Y ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS EN INGENIERÍA DE ALIMENTOS

JOHANNES DELGADO OSPINA

INTRODUCCIÓN

La investigación científica es un proceso dinámico, sistemático y ordenado de indagación en el que se aplican métodos rigurosos para adquirir nuevo conocimiento, desarrollar teorías o buscar soluciones a fenómenos específicos (Gutiérrez y De la Vara, 2013). El proceso debe ser riguroso y tener argumentos legítimos explicados a través de procesos deductivos para incluir premisas verdaderas y alcanzar una conclusión lógica. Al ser un proceso sistemático, cuenta con una serie de pasos que aseguran la idoneidad de los resultados y permiten que el estudio sea reproducible por otros investigadores o personas interesadas.

Los ingenieros de alimentos, ingenieros agroindustriales o afines utilizan diferentes metodologías de investigación para el desarrollo de nuevos productos: la reingeniería, evaluar el efecto de remplazar un ingrediente de la formulación, el mejoramiento de sus procesos y la aplicación de tecnologías emergen-

tes, entre otras. Esto les permite estar a la vanguardia en la producción y brindarle al consumidor la mejor experiencia de usuario.

En general, para que una investigación sea exitosa es fundamental seguir con atención una serie de sencillos pasos, que permitirán tener un análisis estadístico sólido que soporte las conclusiones a las que se llega al final del experimento.

En primer lugar, se inicia con la observación del fenómeno que se quiere explicar o investigar, es la base para poder desarrollar el estudio. Continúa con la formulación de la pregunta a la que se le busca respuesta, es decir, se debe identificar de manera precisa qué es lo que se quiere saber sobre el fenómeno observado. Luego se construye una hipótesis, que es la suposición formal con respecto a la observación realizada. La hipótesis trata de explicar o responder la pregunta mediante una suposición que se pueda probar, esto se constituye entonces en una teoría.

A continuación, se debe definir el diseño experimental que permita analizar adecuadamente la relación entre variables y hacer que ese análisis sea lo más objetivo posible.

Un diseño experimental adecuado permite probar las relaciones existentes entre las variables. La variable independiente es aquella que el investigador controla o modifica para medir su efecto sobre las variables de respuesta o también llamadas variables dependientes. El control o testigo también es una parte muy importante en un diseño experimental; en los experimentos, permite al investigador medir la respuesta de la variable dependiente sin el efecto de la variable independiente, es decir, controla cómo se introduce esa intervención en el entorno de la experimentación. Un diseño experimental aplicado de manera correcta puede establecer una relación causal entre la variable independiente y las variables dependientes.

Una vez establecido el diseño experimental, se deben definir y aplicar las metodologías (fase experimental) que están al alcance de los investigadores y que sirven para medir los atributos buscados en las variables de respuesta. Las metodologías usadas pueden ser cuantitativas, cuando se pueden obtener datos que son medibles o cuantificables; cualitativas, cuando se enfocan en obtener información de experiencias y percepciones, y mixtas, cuando combinan tanto las metodologías cualitativas como las cuantitativas.

El experimento tiene como finalidad probar la veracidad de la predicción y de este se obtienen datos cualitativos o cuantitativos que deberán ser analizados de acuer-

do con el diseño experimental escogido con ayuda de herramientas estadísticas o *software* de análisis estadístico que permiten validar las relaciones existentes entre las variables estudiadas.

Finalmente, se discuten los resultados obtenidos en el experimento, teniendo en cuenta el diseño experimental y el análisis estadístico, y se emiten las conclusiones pertinentes. Cuando mediante los resultados del experimento no se encuentra una respuesta que satisfaga la hipótesis, los científicos pueden crear un nuevo proceso basándose en estos resultados.

La mayoría de las oportunidades de mejora o problemas que se presentan en la industria están condicionados por el tiempo y el presupuesto, lo que supone una limitación importante a la hora de experimentar. Por lo que para tener un experimento sólido que permita disminuir el error y tener el número adecuado de unidades experimentales ahorrando tiempo y recursos, todas las industrias o empresas deberían buscar la forma de obtener de los experimentos la mayor información posible y de la manera más eficiente.

Esto solo es posible con el uso de un diseño experimental adecuado, por esto, este capítulo tiene como objetivo presentar una breve descripción teórica del proceso de planificación del diseño de los experimentos y mostrar algunos de los modelos estadísticos que pueden emplear los ingenieros de alimentos, ingenieros agroindustriales o profesiones afines en el diseño de sus experimentos.

7.1. Elementos de un diseño experimental

Unidad experimental: también conocida como unidad de muestreo o unidad de observación, es la principal unidad de interés que es objeto del experimento y a la que se aplica de manera directa uno o varios tratamientos.

Factores: son también llamadas variables independientes, que se modifican durante la experimentación para observar cómo afectan a las variables de respuesta o variables dependientes.

Niveles: son los distintos estados o valores que asumen los factores, es decir, son las variaciones o modificaciones que se realizan para aplicar los factores.

Tratamientos: es la combinación de niveles evaluados para un conjunto de factores.

Controles o testigos: es el punto de referencia con el que se compara el efecto de aplicar los tratamientos. En la mayoría de los experimentos, el control se basa en medir las variables de respuesta a las unidades experimentales a las que no se les aplican los tratamientos (control absoluto). Pero pueden existir otros controles a los que sí se les aplica un tratamiento diferente, cuyos resultados son conocidos o simplemente se desean confrontar (control relativo).

Repeticiones: es el número de unidades experimentales a las que se les aplica un mismo tratamiento. Durante toda experimentación se deben repetir los experimentos para disminuir la probabilidad de que se presente el error.

Tipos de experimentos: los tipos de experimentos dependen del número de factores que se analizan en el experimento. Se denomina experimento simple, cuando se analiza un solo factor el número de tratamientos corresponde también al número de niveles del factor. Mientras que se denomina experimento factorial cuando se analizan dos o más factores; en este caso, el número de tratamientos que se van a ensayar surge de la combinación de los niveles de los factores estudiados.

Error experimental: es la diferencia entre el valor observado de la variable respuesta sobre una unidad experimental y su valor esperado (de acuerdo con el modelo estadístico empleado). Es el responsable de la variación que se observa entre las unidades experimentales sometidas al mismo tratamiento.

El error experimental puede estar compuesto por tres fuentes: el error de medición, es la variación en la respuesta que introduce el instrumento o el procedimiento de medición; el error de muestreo, es la variación debida a la heterogeneidad de las unidades experimentales; y el error de tratamiento, es la variación debida a los errores en la reproducción del tratamiento.

7.2. Diseño completamente al azar (DCA) o análisis de varianza (Anova) de un factor

Es el más simple de los diseños de experimentos que comparan tres o más tratamientos, puesto que considera que los tratamientos y el error aleatorio son las dos únicas fuentes de variabilidad. En este caso se utiliza Anova para comprobar si existen diferencias en las medias. El Anova de un factor se utiliza cuando se tiene un solo factor o variable independiente y el objetivo es investigar si las variaciones o los diferentes niveles de ese factor tienen un efecto medible sobre la variable depen-

diente. Se utiliza cuando la variable dependiente se distribuye de manera normal en cada uno de los grupos y la variabilidad dentro de cada grupo es similar en todos los grupos. En este diseño se comparan las medias de tres o más grupos y puede indicar si al menos un par de medias es significativamente diferente, pero no puede indicar cuál de ellas, por lo que requiere una prueba de comparación de medias.

En este método se prueba la hipótesis nula (H_0), es decir, que no hay diferencias entre las medias poblacionales, las medias son iguales. Contrastada con la hipótesis alternativa (H_a) que implica que al menos una de las medias es diferente.

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_i$$

$$H_a = \text{al menos una de las medias es diferente}$$

μ_i es la media del i-ésimo nivel del factor.

Se explica mejor el Anova de un factor mediante el siguiente ejemplo.

Ejemplo

Una empresa de alimentos que produce carne para hamburguesa empacada al vacío quiere innovar en su formulación al añadir un ingrediente adicional que permite que la carne pierda menos volumen al ser llevada a cocción. Deciden diseñar un experimento para evaluar si el producto funciona como lo indica el proveedor.

La pregunta de investigación puede ser formulada así: ¿El nuevo ingrediente cumple la función que indica el proveedor?

El Anova de un factor se utiliza cuando se tiene un solo factor o variable independiente y el objetivo es investigar si las variaciones o los diferentes niveles de ese factor tienen un efecto medible sobre la variable dependiente. Se utiliza cuando la variable dependiente se distribuye de manera normal en cada uno de los grupos y la variabilidad dentro de cada grupo es similar en todos los grupos.

Mientras que la hipótesis nula es: el nuevo ingrediente no modifica la pérdida del volumen cuando la carne de la hamburguesa es sometida a cocción, la hipótesis alterna será: el nuevo ingrediente modifica la pérdida del volumen cuando la carne de la hamburguesa es sometida a cocción.

En este DCA, el factor es la concentración del nuevo ingrediente con tres niveles (0,5 %, 1,0 % y 1,5 %) que se encuentran dentro del rango de aplicación sugerido por el proveedor del ingrediente y un control absoluto. La variable de respuesta será el porcentaje de pérdida de volumen de la carne de hamburguesa después de la cocción. Para tener una menor probabilidad de error deciden usar cinco repeticiones en cada uno de los tratamientos.

El número de unidades experimentales se obtiene después de multiplicar el número de factores por los tratamientos incluido el control y las repeticiones, es decir: Unidades experimentales = 1 factor x (3 tratamientos + 1 control) x 5 repeticiones = 20.

Conociendo esto, inician con la experimentación, teniendo en cuenta llevar a cabo la aplicación de los tratamientos a muestras obtenidas de manera aleatoria y obtienen los resultados tabulados en la tabla 7.1.

Tabla 7.1. *Pérdida de volumen de la carne de hamburguesa después de cocción para cada uno de los tratamientos aplicados*

Concentración nuevo ingrediente (% p/p)	Pérdida de volumen después de cocción (%)				
Control	21,4	20,5	20,1	19,4	19,6
0,5	15,4	16,9	14,5	16,2	14,9
1,0	13,6	12,7	11,8	12,7	11,0
1,5	13,7	14,8	13,6	13,1	14,3

Fuente: elaboración propia.

Los investigadores realizan el Anova a un nivel de significancia alfa 0,05, obteniendo los resultados consignados en la tabla 7.2.

Tabla 7.2. Resultados Anova a un nivel de significancia alfa 0,05 para los datos de la tabla 7.1. Diseño completamente al azar.

Resumen				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Control	5	101	20,2	0,635
0,5	5	77,9	15,58	0,947
1	5	61,8	12,36	0,983
1,5	5	69,5	13,9	0,435

Análisis de varianza						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Tratamientos	172,578	3	57,526	76,701333	1,03426E-9	3,238871
Error aleatorio	12,0	16	0,75			
Total	184,578	19				

Fuente: elaboración propia.



Como el valor de F calculado (76,70) es mayor que F crítico (3,23) se puede concluir que F es significativo y se descarta la hipótesis nula, por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna que dice que el nuevo ingrediente modifica la pérdida del volumen cuando la carne de la hamburguesa es sometida a cocción, es decir, no todos los tratamientos son iguales. Adicionalmente, como el valor de la probabilidad ($1,03426E-9$) es menor al valor de la significación que se ha elegido (0,05), se descarta la hipótesis nula.

El siguiente paso se hace para conocer cuáles de los tratamientos son diferentes entre sí, para esto se pueden realizar diferentes test de comparaciones múltiples como el test HSD (*Honestly-Significant-Difference*) de Tukey (tabla 7.3), que permite comparar las medias de los niveles de un factor.

Tabla 7.3. Resultados del test HSD de Tukey para los datos de la Tabla 7.1. Diseño completamente al azar

Comparaciones	Nivel de significancia
Control vs. 0,5 %	$P < 0,01$
Control vs. 1,0 %	$P < 0,01$
Control vs. 1,5 %	$P < 0,01$
0,5 % vs. 1,0 %	$P < 0,01$
0,5 % vs. 1,5 %	$P < 0,05$
1,0 % vs. 1,5 %	No significativo

Fuente: elaboración propia.

El test HSD de Tukey les muestra a los investigadores que solo los tratamientos que incorporan el nuevo ingrediente en concentraciones de 1,0 % y 1,5 % son estadísticamente iguales. Mientras que los demás son estadísticamente diferentes.

Los investigadores concluyen de acuerdo con la pregunta de investigación que la incorporación del nuevo ingrediente en cualquiera de las concentraciones evaluadas sí cumple la función indicada por el proveedor y logra disminuir el porcentaje de pérdida de volumen de la hamburguesa después de la cocción. La forma como se expresan los resultados finales se puede observar en la tabla 7.4.

Tabla 7.4. Resultado estadístico de la pérdida de volumen de la carne de hamburguesa después de cocción para cada uno de los tratamientos aplicados

Concentración nuevo ingrediente (% p/p)	Pérdida de volumen después de cocción (%)
Control	20,2 ± 0,8 a
0,5	15,6 ± 1,0 b
1,0	12,4 ± 1,0 c
1,5	13,9 ± 0,7 c

Resultados expresados como media ± desviación estándar, letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre los tratamientos.

Fuente: elaboración propia.

Ahora bien, al terminar esta primera comprobación usando un modelo estadístico muy sencillo, los investigadores pueden iniciar otras pruebas que midan los cambios químicos, físicos, fisicoquímicos, sensoriales o tiempo de vida útil, entre otros, que implica la adición del ingrediente y tomar otras decisiones como la concentración a usar en el producto final.

7.3. DISEÑO CON ENFOQUE DE UN FACTOR A LA VEZ

En este enfoque, todas las variables se establecen en un nivel constante y el efecto de cada variable se investiga cambiando las variables individuales una a la vez. Si bien esto puede parecer un enfoque ordenado, en realidad es muy ineficiente y puede producir resultados inexactos, ya que los efectos de cambiar un solo factor a la vez pueden ser muy diferentes de cambiar múltiples efectos juntos. Además, la



estimación del efecto de las variables individuales se basa en el supuesto de que las interacciones entre variables no son importantes.

Los sistemas alimentarios son de naturaleza multivariada, siendo las características sensoriales individuales y el gusto un efecto combinatorio de múltiples cualidades físicas y químicas. Por ejemplo, en la evaluación hedónica de un producto de bebida cítrica, el gusto del consumidor puede depender de diversas cualidades de sabor (dulzura, acidez) y olor (afrutado, cítrico), además de otras propiedades físicas (presencia de sedimentos sólidos, color).

7.4. DISEÑO DE BLOQUES COMPLETOS AL AZAR (BCA)

Se usa cuando se conoce que las unidades experimentales no son iguales u homogéneas en alguna de las variables identificadas como de impacto importante sobre la respuesta o porque las condiciones físicas o del entorno en que se lleva a cabo el experimento no son totalmente uniformes. Esto asegura comparaciones más justas entre los tratamientos. El diseño en bloques surge como respuesta a la necesidad que tiene el investigador de ejercer un control adecuado de la variación.

Tres fuentes de variabilidad son las que se consideran en este tipo de diseño de experimentos: el factor de tratamientos, el factor de bloques y el error aleatorio. Para desarrollar este método estadístico, las unidades experimentales se agrupan de manera homogénea en bloques para realizar la comparación de los tratamientos en un medio más homogéneo, el cual le permite eliminar de manera sistemática el factor perturbador que pueda existir.

En un diseño en bloques completos al azar, cada bloque generado debe contener todos los tratamientos, es decir, el número de tratamientos debe ser igual al número de unidades experimentales, por lo que los bloques en este diseño constituyen las repeticiones del experimento. Se debe tener en cuenta que la aleatorización se hace dentro de cada bloque.

El uso de bloques estratifica las unidades experimentales en grupos homogéneos o unidades más parecidas. En la industria de alimentos, los factores de bloqueo que pueden aparecer en la práctica son: turno, diferencias de temperatura durante el día o la noche, el lote, materias primas, operarios, tipo de material, línea de producción, máquina, método, etcétera.

En este método se prueban dos hipótesis nulas (H_0), es decir, que no hay diferencias entre las medias poblacionales de los tratamientos y no hay diferencias entre las medias poblacionales dentro de los bloques. Contrastada con las hipótesis alternativas (H_a) que implica que al menos una de las medias es diferente.

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_i$$

$$H_a = \text{no todas las } \mu_i \text{ son iguales}$$

$$H_0 = \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \dots = \tau_i$$

$$H_a = \text{no todas las } \tau_i \text{ son iguales}$$

Ejemplo

El ingeniero a cargo del departamento de producción de una empresa de alimentos que produce jamones, con frecuencia encuentra un defecto en la forma de los jamones que impide un corte uniforme y como consecuencia de esto se genera mucho producto no conforme. El ingeniero sospecha que la presión con la que se prensa la carne puede causar estos defectos, por lo que decide diseñar un experimento para investigar su hipótesis. Sin embargo, el ingeniero también cree que el agente de compactación que le surte un proveedor puede tener alguna relación con el problema, ya que el producto lo surte por lotes muy pequeños, aunque de acuerdo con las especificaciones de la oficina de compras, todos los lotes cumplen con las especificaciones de producto.

Por lo tanto, el ingeniero decide investigar el efecto de cuatro niveles diferentes de presión del prensado en los jamones, utilizando un diseño de bloques completos aleatorios, considerando los lotes del agente de compactación como bloques.

El diseño de bloques completos al azar se muestra en la tabla 7.5. Se debe tener en cuenta que existen cuatro niveles de presión (tratamientos) y seis lotes de agente de compactación (bloques). Es importante recordar que el orden en el que se prueban los niveles de presión dentro de cada bloque es aleatorio. La variable de respuesta es el rendimiento o el porcentaje de jamones en la producción que no contenían defectos.

Tabla 7.5. Porcentaje de jamones sin defectos para cuatro diferentes presiones de compactación, categorizados por lotes del agente de compactación de acuerdo con el diseño en bloques completos al azar

Tratamientos	Lote de agente de compactación (bloques)					
Presión (PSI)	1	2	3	4	5	6
8500	90,3	89,2	98,2	93,9	87,4	97,9
8700	92,5	89,5	90,6	94,7	87,0	95,8
8900	85,5	90,8	89,6	86,2	88,0	93,4
9100	82,5	89,5	85,6	87,4	78,9	90,7

Fuente: elaboración propia.

Los investigadores realizan el Anova a un nivel de significancia alfa 0,05, obteniendo los resultados consignados en la tabla 7.6.

El uso de bloques estratifica las unidades experimentales en grupos homogéneos o unidades más parecidas. En la industria de alimentos, los factores de bloqueo que pueden aparecer en la práctica son: turno, diferencias de temperatura durante el día o la noche, el lote, materias primas, operarios, tipo de material, línea de producción, máquina, método, etcétera.

Tabla 7.6. Resultados Anova a un nivel de significancia alfa 0,05 para los datos de la tabla 7.5. Diseño de bloques completos al azar (BCA).

Resumen				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
8500	6	556,9	92,817	20,950
8700	6	550,1	91,683	10,918
8900	6	533,6	88,932	8,964
9100	6	514,6	85,767	19,759
1	4	350,8	87,700	20,560
2	4	359,0	89,750	0,510
3	4	364,0	91,000	27,707
4	4	362,2	90,550	19,097
5	4	341,3	85,325	18,516
6	4	377,9	94,473	9,569

Análisis de varianza						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Tratamientos	178,01401	3	59,338004	8,10181	0,001922	3,28738
Bloques	193,09152	5	38,618304	5,27281	0,005423	2,90129
Error	109.86056	15	7,324038			
Total	480,96609	23				

Fuente: elaboración propia.



En el caso de los tratamientos, el valor de F calculado (8,10181) es mayor que F crítico (3,28738) se concluye que F es significativo y se rechaza la hipótesis nula, es decir, se acepta la hipótesis alterna que dice que la presión afecta el rendimiento o el porcentaje de jamones sin defectos, es decir, no todos los tratamientos son iguales.

En el caso de los lotes de agente de compactación (bloques), se encontró que el valor de F calculado (5,27281) es mayor que F crítico (2,90129), por lo tanto, se rechaza la segunda hipótesis nula, es decir, se acepta la hipótesis alterna, los lotes de agente de compactación tienen relación con el porcentaje de jamones sin defectos.

Para determinar cuáles tratamientos son diferentes se usó el test LSD (*Least Significant Difference*) de Fisher, que permite comparar las medias de los tratamientos y de los bloques (tabla 7.7).

Tabla 7.7. Resultados del test LSD Fisher para los datos de la tabla 7.5. Diseño de bloques completos al azar (BCA)

Comparaciones	Nivel de significancia
8500 vs. 8700	No significativo
8500 vs. 8900	No significativo
8500 vs. 9100	$P < 0,01$
8700 vs. 8900	No significativo
8700 vs. 9100	$P < 0,01$
8900 vs. 9100	No significativo

Fuente: elaboración propia.

El test LSD de Fisher le muestra al ingeniero que los tratamientos que aplican menor presión de 8500 y 8700 PSI, son estadísticamente iguales, y tienen el mayor porcentaje de jamones sin defectos. También muestra que el tratamiento que aplica la presión más alta (9100 PSI) es el que menor porcentaje de jamones sin defectos presenta (tabla 7.8).

Tabla 7.8. Resultado estadístico del porcentaje de jamones sin defectos para cada uno de los tratamientos aplicados

Presión (PSI)	Porcentaje de jamones sin defectos (%)
8500	92,8 ± 4,6 a
8700	91,7 ± 3,3 a
8900	88,9 ± 3,0 ab
9100	85,8 ± 4,4 b

Fuente: elaboración propia.

Resultados expresados como media ± desviación estándar, letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre los tratamientos.

Los resultados encontrados le ayudarán a tomar decisiones sobre cuál es la mejor presión de compactación para disminuir el porcentaje de jamones con defectos.

7.5. DISEÑO FACTORIAL ANÁLISIS DE LA VARIANZA DE DOS FACTORES CON INTERACCIÓN

Los diseños factoriales como el Anova de 2 factores permiten a un investigador examinar más de una variable independiente en la variable dependiente, de manera individual para cada factor, reportando una F para cada uno. Además, reporta un valor de F para la interacción entre los dos factores, dicha interacción es la influencia colectiva de los factores y es el resultado de la combinación de dos variables independientes para producir un resultado que es diferente del resultado producido por cualquiera de las variables sola.

Un Anova de 2 factores permite al investigador evaluar los efectos principales (las variables independientes) y la interacción que se produce entre los factores. El Anova de 2 factores produce tres resultados (3 F): una F para el factor 1, una F para el factor 2 y una F para la interacción entre los factores 1 y 2.



Aunque no es un requisito para el Anova de 2 factores, tener el mismo número de observaciones en cada tratamiento, lo que se conoce como diseño de equilibrio, aumenta el poder de la prueba. Sin embargo, las replicaciones desiguales (un diseño desequilibrado) son muy comunes. Algunos paquetes de *software* estadístico solo funcionan con diseños equilibrados. El *software* Minitab puede proporcionar el análisis correcto, tanto para diseños balanceados como para los no balanceados bajo el análisis estadístico Anova. Sin embargo, en aras de la simplicidad, en este capítulo se presentará un ejemplo de diseño equilibrado.

En este método se prueban las siguientes hipótesis:

H_0 : no hay interacción entre los factores.

H_a : existe una interacción significativa entre los factores.

H_0 : no hay efecto significativo del factor A sobre la variable de respuesta.

H_a : existe un efecto significativo del factor A sobre la variable de respuesta.

H_0 : no hay efecto significativo del factor B sobre la variable de respuesta.

H_a : existe un efecto significativo del factor B sobre la variable de respuesta.

Ejemplo

Supongamos que el ingeniero de alimentos quiere saber si hay relación entre el sabor a fruta de una bebida láctea y la adición de un edulcorante. El ingeniero necesita investigar no solo el efecto de los tres niveles de edulcorante sobre el sabor a fruta de la bebida A (efecto principal A) y de la bebida B (efecto principal B), sino también la relación que existe entre los dos factores de sabor a fruta y edulcorante.

El análisis de varianza bidireccional permite al ingeniero responder a la pregunta sobre si el sabor final es afectado por los sabores a fruta y los niveles de edulcorante, es decir, verificar la relación existente entre los dos factores de manera simultánea.

Este es un ejemplo de experimento factorial en el que hay un total de seis combinaciones posibles de los niveles para los dos factores diferentes (2 sabores a fruta y 3 niveles de edulcorante). Este es un experimento factorial 2×3 , donde las seis combinaciones posibles corresponden a los tratamientos. Se utiliza este tipo de di-

seño para investigar el efecto de los factores o variables independientes sobre las variables de respuesta y la interacción entre los factores.

En los experimentos factoriales se requieren múltiples réplicas de cada tratamiento. En el ejemplo, se tienen cuatro repeticiones u observaciones para cada uno de los seis tratamientos. La replicación es importante porque demuestra que los resultados son reproducibles, aumenta la precisión de las estimaciones de las medias de los tratamientos y proporciona los medios para estimar la varianza del error experimental. Los datos se muestran en la tabla 7.9.

Tabla 7.9. *Grado de aceptación de sabor (unidades arbitrarias) para dos sabores a fruta de una bebida láctea por la adición de tres niveles de edulcorante*

Sabores	Edulcorante		
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Sabor A	1,2	2,4	3,1
	2,4	2,7	3,0
	2,6	2,7	3,2
	2,2	2,9	3,4
Sabor B	0,6	2,1	0,7
	0,9	2,3	0,5
	1,0	2,0	0,6
	0,9	1,9	0,5

Fuente: elaboración propia.

Los investigadores realizan el Anova a un nivel de significancia alfa 0,05, obteniendo los resultados consignados en la tabla 7.10.



Tabla 7.10. Resultados Anova de dos factores con interacción a un nivel de significancia alfa 0,05 para los datos de la tabla 7.9. Diseño factorial análisis de la varianza de dos factores con interacción

Resumen	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Total
Sabor A				
Cuenta	4	4	4	12
Suma	8,4	10,7	12,7	31,8
Promedio	2,1	2,675	3,175	2,65
Varianza	0,38666	0,0425	0,02916	0,33545
Sabor B				
Cuenta	4	4	4	12
Suma	3,4	8,3	2,3	14
Promedio	0,85	2,075	0,575	1,16666
Varianza	0,03	0,02916	0,00916	0,48242
Total				
Cuenta	8	8	8	
Suma	11,8	19	15	
Promedio	1,475	2,375	1,875	
Varianza	0,625	0,13357	1,94785	

Análisis de varianza						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Sabor	13,2016	1	13,016	150,398	3,5535E-10	4,41387
Nivel de edulcorante	3,25333	2	1,62666	18,5316	4,2628E-05	3,55455
Interacción	4,16333	2	2,08166	23,7151	9,0248E-06	3,55455
dentro del grupo	1,58	18	0,08777			
Total	22,1983	23				

Fuente: elaboración propia.

Cuando se realiza un Anova de dos vías, siempre primero se prueba la hipótesis sobre el efecto de interacción. Si se acepta la hipótesis alterna que dice que existe una interacción significativa entre los factores, no se debe continuar con la evaluación de las hipótesis que involucran los efectos principales. Solo cuando el término de interacción no es significativo se examinan los efectos principales por separado.

Los resultados muestran que para la interacción el valor de F calculado (23,7151) es mayor que el F crítico (3,55455), por lo que se rechaza la hipótesis nula, luego sí existe una interacción significativa entre los factores. Una interacción significativa indica que el cambio en la respuesta promedio verdadera para un nivel del factor A (sabor A) depende del nivel del factor B (sabor B). El efecto de los cambios simultáneos no se puede determinar examinando los efectos principales por separado.



Conclusiones

Son muchos los diseños de experimentos que permiten obtener información relevante de un fenómeno observado en el área de la ingeniería de alimentos, ingeniería agroindustrial o afines. Aquí se estudiaron el diseño completamente al azar, el diseño de bloques completos al azar y el diseño factorial, que son los más usados y a su vez sencillos de implementar y analizar para tener una interpretación confiable de los resultados. Existen otros como la metodología de superficie de respuesta que permite encontrar las condiciones de operación óptimas de un proceso, es decir, aquellas que dan por resultado “valores óptimos” de una o varias características de calidad del producto. También es muy importante el diseño de experimentos con mezclas, donde los factores son los componentes o ingredientes de una mezcla y los niveles de dichos ingredientes no son independientes. Que este capítulo sea un primer escalón y un incentivo para que los interesados empiecen a profundizar en el diseño y análisis de experimentos aplicado a los alimentos.