

DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO ÓPTIMO Y LA CALIDAD DE UN PRODUCTO FINAL ELABORADO CON ALMIDÓN AGRIO DE YUCA



Marisol Gordillo Suárez, MSc.

*Profesora Escuela de Ingeniería Industrial y Estadística,
Universidad del Valle*

Contacto: mgsuarez44@yahoo.com

Resumen

La producción y consumo de almidón agrio de yuca, es una actividad de gran importancia en el país, ya que este es la materia prima de diversos productos que requieren de su principal propiedad: El poder de expansión. A pesar de esto, actualmente tanto los ralladeros como los consumidores primarios (panaderos e industrias harineras), no están conformes con este indicador.

En la presente investigación se espera corroborar que la capacidad de absorción es un indicativo de calidad, y que interactúa con el poder de expansión, es decir, explicar porque dos almidones de igual poder de expansión no presentan el mismo rendimiento. Para este fin, se utilizó dos metodologías estadísticas: Superficie de respuesta y el método de Taguchi.

Palabras Clave: Almidón agrio de yuca, optimización, metodología de superficie de respuestas, método de Taguchi.

1. Introducción

El almidón es la materia prima de diversos productos, que requieren de su poder de expansión (medida de volumen específico de un producto horneado, elaborado con almidón agrio de yuca, mezclado con agua). A pesar de conocida esta propiedad actualmente tanto los ralladeros como los consumidores primarios (panaderos e industrias harineras), no están conformes con este indicador, pues, se ha observado que almidones con igual poder de expansión presentan diferentes resultados después de elaborado el producto.

En Brasil Cereda (1995) determinó que la capacidad de absorción del almidón agrio de yuca es también otro indicador de la calidad del almidón (Capacidad del almidón de retener agua, a medida que se incrementa la temperatura). Por lo tanto se decidió evaluar la capacidad de absorción del almidón agrio de yuca, con el fin de maximizar el rendimiento en un producto final (pandebono), es decir, encontrar la mejor combinación entre el poder de panificación y la capacidad de absorción. En Colombia, la capacidad de absorción del almidón no se utiliza como un indicador de calidad.

En la presente investigación se espera estudiar el impacto de la capacidad de absorción y el poder de expansión, es decir, explicar porque dos almidones de igual poder de expansión no presentan el mismo rendimiento. Para este fin, se utilizó dos metodologías estadísticas: Superficie de respuesta (Walterset ol, 1999) y el método de Taguchi (Prat, 1995).

En la aplicación de la metodología de superficie de respuesta, se llegó a la región donde se encuentra el óptimo, debido a que no se tenía suficientes datos en la región de experimentación que señala el método de máxima pendiente y además porque en esta investigación se trata de obtener valores óptimos de almidones que se encuentran en el mercado. Por medio de esta metodología se encontró que la mejor combinación se encuentra cuando se tiene valores de expansión y absorción en los niveles altos de los rangos estudiados.

Por medio del método de Taguchi, se encontró que igualmente la mejor combinación se encuentra cuando se tiene valores de expansión y absorción a niveles altos, y además que valores altos de panificación y absorción producen la menor pérdida monetaria que el usuario del producto pueda sufrir. También se comprobó que estos dos indicadores interactúan entre si.

2. Materiales y Métodos

Para dar inicio a la investigación, fue necesario contar primero con una técnica de absorción de agua del almidón, para esto, el CIAT y UNIVALLE, realizaron ensayos hasta lograr una técnica confiable. La prueba de expansión y la capacidad de absorción, así como también la elaboración del producto se realizó en el laboratorio del departamento de alimentos de la Universidad del Valle, sede Meléndez, Cali.

La unidad experimental es la mezcla de los ingredientes almidón, areparina, queso, azúcar, leche y grasa que después de horneado es al producto final pandebono, ya que por medio de él, se determinó el rendimiento del almidón agrio de yuca (el rendimiento de un producto esta dado por la utilidad, cantidad o porcentaje que este genera), conocidas las características de absorción y poder de expansión del almidón.

La preparación es la siguiente:

Se mezcló el almidón, la areparina el queso y el azúcar, durante 4 minutos en una mezcladora, pasado este tiempo se le adicionó poco a poco la leche hasta obtener una mezcla suave, esto durante 2 minutos más. Luego se formaron las rosas de 50 gramos cada una. El horno debe prenderse media hora antes de colocar los pandebonos a una temperatura de 262 °C.

3. Modelos y Métodos Estadísticos para Superficies de Respuesta

La metodología superficie de respuesta requiere del diseño de experimentos, con el cual puede identificarse las características de interés, por lo tanto, es la metodología indicada, puesto que aquí, se pretende identificar el comportamiento óptimo del producto final elaborado con almidón agrio de yuca, y lo más apropiado es utilizar el diseño de experimentos como medio para realizar las observaciones bajo condiciones dadas, que permitan conocer su comportamiento.

Variables independientes	Variable dependiente
· Poder de expansión (cm^3/g). · (IAA) Índice Absorción de agua del almidón.	· Rendimiento (cm^3/g).

Los factores niveles y tratamientos que definen al diseño factorial 2^2 completo, se encuentran en la tabla 1.

Tabla 1. Factores y niveles utilizados en el experimento

FACTORES	NIVELES
Poder de expansión	(-) nivel inferior [valores $>7 \text{ cm}^3/\text{g}$ y $\leq 9 \text{ cm}^3/\text{g}$] (+) nivel superior [valores $>11 \text{ cm}^3/\text{g}$ y $\leq 13 \text{ cm}^3/\text{g}$]
Capacidad de Absorción	(-) nivel inferior [valores ≥ 3 y ≤ 6] (+) nivel superior [valores ≥ 9 y ≤ 12]
Valores Centrados	Poder de expansión : [valores $>9 \text{ cm}^3/\text{g}$ y $\leq 11 \text{ cm}^3/\text{g}$] Capacidad de Absorción: [valores >6 y ≤ 9]

Los niveles de los factores son 2 para cada uno, de efectos fijos, entonces los tratamientos son las combinaciones de los niveles (+,-) de cada factor, estos son:

TRATAMIENTOS	PODER DE EXPANSIÓN	CAPACIDAD DE ABSORCIÓN
(1)	-	-
a	+	-
b	-	+
ab	+	+

Además de los puntos factoriales el diseño central compuesto, incluye 4 puntos axiales, y 5 puntos centrales.

3.1. El modelo lineal

Está determinado por la ecuación de la superficie de respuesta, que tiene que ser desarrollado en dos dimensiones en una superficie simple:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \epsilon$$

Donde:

Y : Es la variable de respuesta rendimiento

$\beta_{(s)}$: Son determinados por el método de mínimos cuadrados

X_1 : Es el poder de expansión

X_2 : Es la capacidad de absorción

ϵ : Es el error experimental

3.2. Análisis de la Metodología de Superficie de Respuesta

En la tabla 2, se presenta el análisis de la varianza para verificar la idoneidad del modelo lineal, en esta se observa claramente que los errores aportan más al modelo (SCResiduales = 0.1846) que el efecto de las variables poder de expansión (PP) e índice de absorción (IAA) (SCRegresión = 0.0468). Este resultado se ve reflejado en las pruebas de hipótesis que se evalúan para cada una de las variables donde se halló que a un nivel de significancia del 0.05 las variables PP e IAA, no son significativas dentro del modelo.

Tabla 2. Análisis de varianza para el modelo lineal ($\alpha = 0.05$)

F.V	g.l	SC	CM	F
REGRESIÓN b_1, b_2	2	0.0468	0.0234	
PP : b_1	1	0.0324	0.0324	1.045
IAA : b_2	1	0.0144	0.0144	0.4645
RESIDUAL	6	0.1846	0.03077	
Error Puro	4	0.1231	0.031	
	1	0.0039	0.0039	0.1258
Falta de Ajuste	1	0.0576	0.0576	1.858
TOTAL	8	0.2314		

$$F_{1,4,0.05} = 7.7086$$

$$SC_{Residual} \text{ con } n-k-1 \text{ g.l} = 6$$

$$SCE_{puro} = n_0 - 1 \text{ g.l} = 5 - 1 = 4$$

La prueba de hipótesis para la falta de ajuste (una aproximación adecuada) indica que no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula de falta de ajuste, e igualmente se obtuvo que no hay indicios de un efecto cuadrático puro. Por lo cual no es necesario realizar una tabla de análisis de varianza para el modelo cuadrático y el modelo con el cual se trabajará es:

$$\hat{y} = 2.4966 + 0.09 X_1 + 0.06 X_2$$

3.3. Determinación del punto crítico

Después de seleccionar el modelo pasamos a la segunda fase donde aplicamos el método de máxima pendiente, la idea de este es correr un experimento simple sobre una área de la respuesta con el propósito práctico de observar la superficie en el plano y determinar la ecuación hacia donde está el óptimo. Usando la ecuación en el plano se determina la dirección que maximiza el crecimiento de la función anterior.

Derivando parcialmente dicha función con respecto a $x(s)$, se obtiene la sobria dirección que maximiza el crecimiento de la función, la cual es (0.09, 0.06). Esta dirección se puede tomar como un camino orientativo.

La trayectoria de mayor pendiente, perpendicular a las curvas de igual respuesta, traslada 0.06 unidades en dirección de x_2 , por cada 0.09 unidades en la dirección de x_1 y la trayectoria tiene un movimiento de $(0.06 / 0.09) = 0.67$ unidades en x_2 , por cada unidad de movimiento en x_1 . Esto significa que, ubicados en el centro del diseño (0,0), es decir, en los rangos ((9-11]; (6-9)) respectivamente para cada variable. Un cambio de $\Delta x_1 = 1$ unidad en la dirección de x_1 es un cambio de 3 cm³/g y $\Delta x_2 = 0.4$ unidades en la dirección de x_2 es un cambio de 1.6 en la absorción. Los valores de poder de expansión y capacidad de absorción del almidón fuera del centro son:

x1	7.5	9	11	12.5
x2	4.4	6	9	10.6
y	3.43	3.66	4.03	4.2576

Aplicando el método de máxima pendiente, en la figura 1, se observa que efectivamente el rendimiento aumenta cuando el poder de expansión y absorción aumentan, igual resultado fue obtenido por Cereda *et al.*, (1995), en el sentido de que el rendimiento del almidón agrio de yuca fue mayor cuando este presentaba valores de absorción y poder de expansión altos, razón por la cual fue adoptado como otro índice de calidad del almidón.

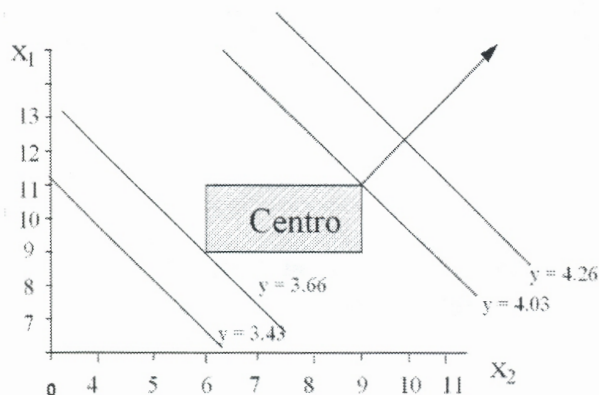


Figura 1. Gráfica de curvas de nivel para el rendimiento en función del poder de expansión y capacidad de absorción

El siguiente paso, es realizar experimentos a lo largo de la trayectoria. Aquí se presenta un inconveniente y es que en el caso de las variables que este experimento maneja son de difícil control. Además las muestras de almidón agrio de yuca que se obtuvieron se pretendían de mayor variabilidad (muy malas, malas, regulares, buenas y muy buenas) sin embargo el rango obtenido en el poder de expansión solo fue entre 2.44 y 11.81 cm³/g;

por lo cual de todas las muestras conseguidas no se tiene muestras que se encuentren con poder de expansión mayor de los que se trabajaron en la estrategia de primer orden, por lo tanto, no fue posible continuar con la experimentación.

Dado lo anterior resulta razonable abordar la problemática desde la óptica de la valoración de la sensibilidad de la variable de respuesta rendimiento a la variación del factor ruido, lo cual se puede estudiar usando el método de Taguchi.

4. Modelos y Métodos Estadísticos para la Metodología de Taguchi

Las contribuciones de Taguchi a los sistemas de calidad, se ubican, fundamentalmente, en la optimización de procesos de manufactura y de productos y su objetivo es obtener, en la etapa de diseño procesos y productos robustos Arimany (sin fecha). Las técnicas de control de calidad durante el diseño del producto y el diseño el proceso de producción se denominan métodos de control de calidad fuera de línea (of-line), que es la etapa de interés en la investigación.

Para obtener un control de calidad robusto se debe empezar por el diseño el producto que comprende: diseño del sistema, parámetros y tolerancias.

- **Diseño del sistema:** En el diseño del sistema se aplican conocimientos de ingeniería y de la ciencia para el desarrollo del prototipo.

- **Diseño de parámetros:** Una vez diseñado el sistema, el siguiente paso es determinar los niveles óptimos de los parámetros de cada elemento en el sistema, mediante la reducción de la variación. Taguchi identifica tres tipos de ruido :

Ruido externo: son variables del medio ambiente como temperatura, humedad, polvo, vibraciones debidas a maquinas colocadas en la vecindad, voltajes y errores humanos en la operación del producto, etc.

Ruido interno: Son variables que afectan al producto en su uso como deterioro, envejecimiento de material y componentes debido al paso del tiempo o por su uso.

Ruido de unidad a unidad: Son las diferencias encontradas en el producto debido a la variabilidad en el material, equipos de fabricación y procesos, y ensamble.

• **Diseño de tolerancias:** Una vez se ha diseñado el sistema completo, y se han obtenidos los valores óptimos de los parámetros, el siguiente paso es determinar la tolerancia de cada parámetro individual mediante la función de pérdida y costo.

4.1. Diseño del Sistema

Tanto la ubicación del experimento como los materiales y métodos para aplicar el método de Taguchi, son los mismos descritos en el numeral 3 de la metodología de superficie de respuesta.

Característica de Calidad. La característica de calidad, es el **rendimiento (cm^3/g)**. Su valor objetivo es “Entre más grande mejor”, es decir, que la optimización consiste en obtener la mejor combinación de los factores controlados (poder de expansión y capacidad de absorción) que maximicen la característica de calidad rendimiento. Taguchi también considera el caso de otros valores objetivos que son: Cuando la calidad apunta hacia un valor óptimo **entre más pequeño mejor** y las tolerancias están definidas por un valor máximo y cuando la calidad apunta hacia **un valor óptimo específico** y las tolerancias tiene dos límites superior e inferior.

4.2. Diseño de Parámetros

En esta etapa, es donde el diseño de experimentos juega un papel primordial, puesto que mediante él, se trata de optimizar los parámetros del sistema. En la aplicación del diseño experimental se trata de encontrar valores de los parámetros del diseño que maximicen la eficiencia del producto (factores controlados) y minimicen la influencia del ruido. Taguchi utiliza esencialmente diseños factoriales Completos, 2^k y fraccionados (Lawson et al, 1992).

• **Factores, niveles y tratamientos de interés en la investigación**

- Poder de expansión (cm^3/g).
- Índice de absorción ó Capacidad absorción de agua.

• Factores y niveles del factor Ruido.

La *cantidad de leche*, es el factor de ruido en los experimentos para aplicar el método de Taguchi. Esta es muy difícil de controlar porque este depende de la sensibilidad del panadero para determinar la textura de la masa.

Los niveles para el factor cantidad de leche se anotaron en forma cualitativa como:

FACTORES	NIVELES
Poder de expansión (PP)	(-1) Nivel inferior [valores $>7 \text{ cm}^3/\text{g}$ y $\leq 9 \text{ cm}^3/\text{g}$] (0) Centro [valores $>9 \text{ cm}^3/\text{g}$ y $\leq 11 \text{ cm}^3/\text{g}$] (+1) Nivel superior [valores $>11 \text{ cm}^3/\text{g}$ y $\leq 13 \text{ cm}^3/\text{g}$]
Absorción de agua (IAA)	(-1) Nivel inferior [valores ≥ 3 y ≤ 6] (0) Centro [valores >6 y ≤ 9] (+1) Nivel superior [valores >9 y ≤ 12]

- Bajo(-1) : Mínima cantidad
- Medio(0): Cantidad ideal
- Alto (1) : Máxima cantidad

4.3. Diseño experimental

Taguchi ha propuesto una técnica para el uso de experimentos estadísticamente planeados, estos son conocidos como diseños robustos, con la idea de obtener procesos insensibles a la variabilidad de factores difíciles de controlar.

En esta investigación se hará uso del diseño factorial completo, esto es un factorial 3^2 para el diseño de los factores controlados (diseño interno) y un diseño unifactorial con tres niveles para el diseño de factores no controlados (diseño externo). Taguchi utiliza un conjunto especial de diseños que lo constituyen los diseños de arreglos ortogonales. En la tabla 3 se presenta la matriz de diseño elaborada para la optimización del rendimiento del almidón agrio de yuca.

Tabla 3. Arreglo ortogonal para la variable de respuesta rendimiento

ENSAYO	Factores Control Disposición Interna		Factor Ruido (Cantidad de leche) Disposición Externa		
	Poder de expansión	Absorción	(-1)	0	(+1)
1	-1	-1	2,35	2,55	2,56
2	1	-1	2,41	2,44	2,45
3	-1	1	2,36	2,4	2,36
4	1	1	2,82	2,9	2,65
5	-1	0	2,26	2,22	2,27
6	0	-1	2,3	2,3	2,49
7	0	0	2,31	2,29	2,34
8	0	1	2,39	2,34	2,44
9	1	0	2,54	2,87	2,58

4.4. Razón Señal Ruido s/r

La razón señal ruido S/R es una función de θ que maximiza el rendimiento el producto, al tiempo que minimiza la perdida esperada. Por esto la razón señal ruido se usa como criterio para comparar los diferentes niveles de los factores controlables.

La razón señal ruido asociado a la característica de calidad rendimiento, cuyo valor óptimo es "entre más grande mejor" su señal ruido es:

$$S/R = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]$$

4.5. Diseño de Tolerancias

Función de Pérdida: La identificación de los niveles óptimos requiere de un criterio a ser optimizado, este es, la perdida esperada, es decir, lo que el consumidor del producto pierde monetariamente debido a su variabilidad y este es medido por la pérdida esperada.

Sea Y el valor de la característica de calidad, que es el rendimiento.

Sea L(Y) la perdida monetaria que sufre el consumidor del producto.

La estimación de la función de perdida, en este caso es la perdida que se produce en la mano de obra el producto, el tiempo, imagen del negocio y tamaño del

producto final (si es muy pequeño se tiene que vender a menos precio).

Los costos de elaboración del producto pandebono por unidad en pesos, cada unidad de 80 g son los siguientes:

1lb. de Almidón agrio de yuca	\$	798,00
1 lb. de queso costeño	\$	2000,00
125 g. de areparina	\$	152,125
125 g. de margarina	\$	153,00
30 g. de azúcar	\$	42,00
510 g. Leche aproximadamente	\$	346,80
Mano de obra (30 min.)	\$	643,75
TOTAL:	\$	4135,675

De la receta con los costos anteriores resulta aproximadamente 1765 g de moje, del cual se sacan 22 pandebonos de 80g. Por lo tanto el precio de costo de un pandebono es 188 pesos.

Dado que la función de perdida (L(Y)) depende de las tolerancias, es esta investigación la característica de calidad rendimiento tiene un óptimo "**Entre más grande mejor**" y sus tolerancias se definen por un valor mínimo, por lo tanto su función de pérdida es de la forma:

$$L(Y) = k \left[\frac{1}{y} \right]^2 = 20.89 \left[\frac{1}{y} \right]^2$$

Donde: k: es la constante de perdida
(\$*cm³/g),

y: Es la característica de calidad
rendimiento

El valor de la constante k, se estimó teniendo en cuenta el mínimo del rendimiento de un almidón para que no produzca perdidas al panadero, en el sentido de que si el panadero prepara la receta anterior, y el moje en cuanto a su peso es el mismo que el anterior, pero al hornear los 22 pandebonos estos no crecen lo esperado el panadero tendrá pérdidas porque el no puede venderlo al precio que generalmente lo vende por ser mas pequeño.

Entonces para obtener la constante k, es necesario tener una especificación del límite inferior para el rendimiento, para estimar esta especificación se tuvo en cuenta la opinión del panadero de la panadería

“F. U”, el cual considera que en su negocio, el rendimiento de la masa para cada unidad no puede ser inferior a 3.0 cm³/g.

$$k = \frac{\text{costos}}{(\text{Limite de especificación inferior})^2} = \frac{188}{(3)^2} = 20.89$$

La función de pérdida promedio permite comparar el producto en términos económicos antes y después de las mejoras realizadas y esta depende del tipo de tolerancias, en este caso las tolerancias están dadas por el valor óptimo “entre más grande mejor”, por lo tanto su función de pérdida promedio es (tabla 4):

$$E[L(Y)] = \overline{L(Y)} = \frac{k}{\overline{y}^2} \left[1 + \frac{3S^2}{\overline{y}^2} \right]$$

Tabla 4. Función de pérdida promedio para el rendimiento

FACTORES Poder de expansión Absorción		$\bar{y}$	S^2	$\bar{L}(Y)(\$)$
-1	-1	2.49	0.1185	3.56
1	-1	2.43	0.0208	3.58
-1	1	2.37	0.0231	3.77
1	1	2.79	0.1277	2.82
-1	0	2.25	0.0265	4.19
0	-1	2.36	0.1097	3.97
0	0	2.31	0.0252	3.97
0	1	2.39	0.050	3.75
1	0	2.66	0.1801	3.18

4.6. Modelo de Diseño y Análisis de Varianza

Todo diseño experimental se representa mediante un modelo lineal que permita explorar con eficacia y eficiencia la relación causa-efecto entre numerosas variables del proceso (factores) y las variables de salida o de rendimiento del proceso (respuesta Y). El modelo de diseño asociado al diseño factorial 32 es:

$$Y_{ij} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

y_{ij} = Es la característica de calidad rendimiento.

μ = Es la media general. Es el promedio general del rendimiento.

A_i = Es la respuesta promedio del rendimiento, debido al i-ésimo nivel del factor poder de expansión, donde (i) varía de 1, 2, 3.

B_j = Es la respuesta promedio del rendimiento, debido al j-ésimo nivel del factor capacidad de absorción, donde (j) varía de 1, 2, 3.

$(AB)_{ij}$ = Es la interacción entre el poder de panificación y la capacidad de absorción

ε_{ij} = Es la componente del error aleatorio. Es una variable aleatoria no observable, que se produce por factores no controlados o no controlables en el experimento.

Los supuestos del modelo son : $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$; σ^2 constante; $\text{Cov}(\varepsilon_{ij}, \varepsilon_{i'j'}) \forall i \neq i'; j \neq j'$

4.7. Análisis para la Metodología de Taguchi

Durante el experimento que se realizó para aplicar la metodología de superficie de respuesta, se detectó que había una variable de confusión que no podía ser controlada, puesto que esta afectaba al producto final, por lo cual esta variable denominada cantidad de leche fue tenida en cuenta en la metodología de Taguchi como el arreglo ortogonal externo, que corresponde a un diseño unifactorial.

La variable cantidad de leche se maneja en forma cualitativa como cantidad mínima, ideal y máxima, en la figura 2, se presentan los valores de poder de expansión para cada una de las muestras, proporcionándole la cantidad de leche requerida. En esta se observa que definitivamente la masa no puede quedar un poco seca ó con falta de agua, pues su poder de expansión es más bajo, la mayoría de las masas presentaron mayor poder de expansión en el punto ideal a excepción de la muestra 2, donde la muestra tuvo un poder de expansión mas alto cuando se le proporcionó el máximo de leche tolerable por la masa. Lo más adecuado al preparar la masa, es suministrarle suficiente leche, porque el efecto que más influye sobre ella es cuando le queda haciendo falta leche.

Los valores de poder de expansión para cada una de las muestras, proporcionándole la cantidad de leche requerida. En esta se observa que definitivamente la masa no puede quedar un poco seca o con falta de agua, pues su poder de expansión es más bajo, la mayoría de las masas presentaron mayor poder de expansión en el punto. Lo mas adecuado al preparar la masa, es suministrarle suficiente leche, porque el efecto que más influye sobre ella es cuando le queda haciendo falta leche.

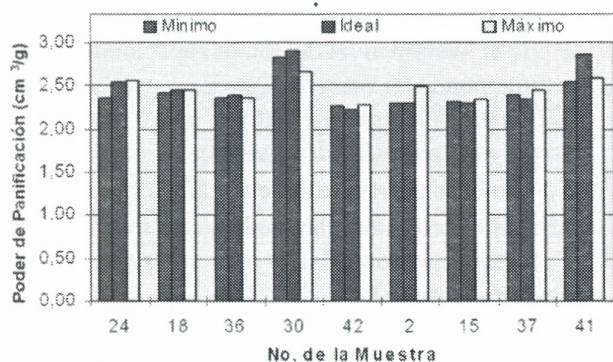


Figura 2. Variaciones del poder de expansión a diferentes cantidades de leche.

Como arreglo ortogonal interno, se seleccionaron las variables de interés en la investigación como el poder de expansión y capacidad ó índice de absorción los cuales corresponden a un diseño factorial 3^2 , que genera 9 combinaciones de tratamientos. En la tabla 5, se muestra las 27 combinaciones de tratamientos generados entre los dos arreglos, estos se realizaron en forma aleatoria, y en esta se aprecia que la mayor variación en la respuesta se obtuvo en la combinación (1, 0), seguida de la combinación (-1, -1).

Tabla 5. Productos cruzados el arreglo ortogonal para la variable rendimiento.

Disposición Interna		Disposición Externa			Media	Desv
PP	IAA	(-)	0	(+)		
-1	-1	2.35	2.55	2.56	2.49	0.1185
1	-1	2.41	2.44	2.45	2.43	0.0208
-1	1	2.36	2.4	2.36	2.37	0.0231
1	1	2.82	2.9	2.65	2.79	0.1277
-1	0	2.26	2.22	2.27	2.25	0.0265
0	-1	2.3	2.3	2.49	2.36	0.1097
0	0	2.31	2.29	2.34	2.31	0.0252
0	1	2.39	2.34	2.44	2.39	0.050
1	0	2.54	2.87	2.58	2.66	0.1801

4.7.1. Razón señal ruido

En esta investigación se trata de maximizar la función señal ruido, debido a que desea obtener el máximo rendimiento del almidón agrio de yuca al preparar el producto pandebono, al tiempo que se espera que minimice la pérdida esperada, que se produce cuando el almidón no da su máximo rendimiento. En la tabla 6, se presentan los valores obtenidos de rendimiento promedio para cada uno de los niveles de los factores de control poder de expansión e índice de absorción, así como también su razón señal ruido, en esta se obtuvo que la mejor combinación óptima de los dos factores de control se produce

cuando el poder de expansión esta a un nivel alto (1), (8.34) y el factor índice de absorción a un nivel alto (1), (7.94), es decir que bajo estos niveles la elaboración del producto es insensible a los niveles de cantidad de leche que se suministre.

Tabla 6. Comportamiento del rendimiento promedio del almidón agrio de yuca y razón señal ruido.

NIVELES DE LOS FACTORES	RENDIMIENTO PROMEDIO	RAZON S/R
PP(-1)	2.37	7.47
PP(0)	2.35	7.43
PP(1)	2.63	8.34
IAA(-1)	2.43	7.69
IAA(0)	2.41	7.56
IAA(1)	2.52	7.94

4.7.2. Función de Pérdida

En una economía de mercado, mejorar la calidad y reducir costos son dos aspectos esenciales para mantenerse en el mercado, puesto que un negocio que no ofrezca ganancias no puede sobrevivir. Mejorar la calidad de un producto, incluye una reducción de variabilidad de las características del producto con respecto a su valor objetivo en este caso el rendimiento, para el cual se obtuvo que la pérdida mínima esperada se produce cuando se tiene valores de poder de expansión a un nivel superior, esto es, valores entre 11 y 13 cm^3/g , que fueron lo máximo en poder de expansión que se encontró en el mercado y para la absorción igualmente a un nivel superior, es decir, valores entre 9 y 12 minimizan la función de pérdida, la robustez del proceso obtenido se muestran en la tabla 7, en la cual se puede observar que esta en conformidad con los resultados obtenidos en el análisis señal ruido.

Tabla 7. Función de pérdida, variable rendimiento del almidón agrio de yuca.

FACTORES		L(Y)(\$)
PP	IAA	
-1	-1	3.56
1	-1	3.58
-1	1	3.77
1	1	2.82
-1	0	4.19
0	-1	3.97
0	0	3.97
0	1	3.75
1	0	3.18

4.7.3. Análisis de varianza del rendimiento

Con el fin de determinar el efecto de cada uno de los factores de control, (poder de expansión e índice de absorción) sobre el rendimiento, por lo cual en la tabla 8, se realizó el análisis de varianza del rendimiento. En esta se observa lo siguiente:

En general el efecto de la interacción entre poder de expansión y el índice de absorción es significativa a un nivel de significancia de 0.002, y es debida casi en su mayoría por la interacción entre los efectos lineales ($A_L B_L$), puesto que, esta es la que más aporta con una suma de cuadrados de 0.168, lo cual se refleja en la verificación de la prueba de hipótesis nula que postula que no hay interacción entre las variables, para la cual el valor F fue de 4.75113, y con un nivel de significancia del 0.05 ($F_{(1,18,0.05)} = 4.4139$), esta hipótesis nula es rechazada y por lo tanto se acepta la interacción entre los efectos lineales de poder de expansión e índice de absorción. Del resto de las interacciones $A_L B_Q$, $A_Q B_L$ y $A_Q B_Q$, se puede apreciar que no son significativas.

Tabla 8. Análisis de varianza para el rendimiento.

F.V	g.l	SC	CM	F	Pr>F
Ai	2	0,41693	0,2085	23,5859	0,000
A _L	1	0,29650	0,14825	16,7704	
A _Q	1	0,12042	0,06021	6,81108	
B _i	2	0,06109	0,030545	3,455316	0,054
B _L	1	0,03827	0,01913	2,16402	
B _Q	1	0,02282	0,01141	1,29072	
A _B _{ij}	4	0,22974	0,057435	6,497172	0,002
A _L B _L	1	0,1680	0,0420	4,75113	
A _L B _Q	1	0,0529	0,0132	1,49321	
A _Q B _L	1	0,0087	0,0022	0,24887	
A _Q B _Q	1	0,00013	0,00003	0,00362	
ERROR	18	0,1592	0,00884		
TOTAL	26	0,86696			

Si analizamos la interacción entre $A_L B_L$ gráficamente, usando solo los extremos de cada factor, podemos observar que hay interacción (figura 3a) entre las dos variables, verificándose que el mayor promedio de rendimiento se obtiene para niveles altos de cada factor. Graficando $A_L B_Q$ usando todos los datos del nivel B, (Figura 3b) se puede observar interacción entre el poder de expansión (A) e índice de absorción (B).

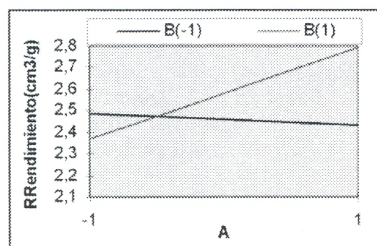


Figura 3a. Interacción entre los efectos lineales A_L y B_L .

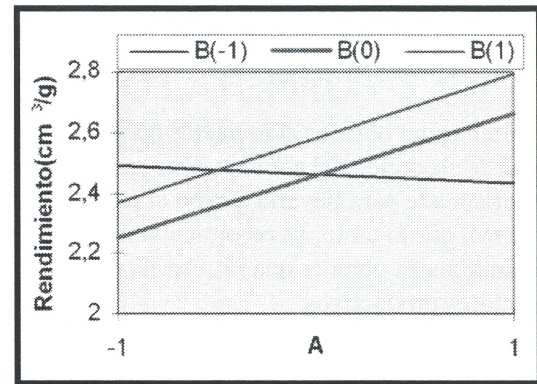


Figura 3b. Interacción entre los efectos A_L y B_Q .

La variación no explicada por este modelo es pequeña (3.83%), por lo tanto podemos concluir que el experimento estuvo bien controlado.

5. Conclusiones y recomendaciones

- En general, no se encontró una relación entre las variables humedad y capacidad de absorción del almidón en el rango observado, este comportamiento lo tienen solo algunos almidones de las 42 muestras analizadas, por lo cual no se puede generalizar.
- Por medio de la metodología de superficie de respuesta se logró conocer la región hacia donde se encuentra el óptimo, esta es, para poder de expansión con valores mayores de 11 cm³/g y para el índice de absorción con valores mayores a 9.
- En la mayoría de las muestras se observa que se obtienen mejores rendimientos en la mezcla en cuanto a cantidad de masa como poder de expansión de esta, cuando se le proporciona suficiente leche.
- Por medio de la metodología de Taguchi se obtuvo que la combinación óptima de los factores de control, se produce a niveles altos de el poder de expansión (valores entre 11 y 13 cm³/g) y el índice de absorción (9 a 12), así como también, que ha estos niveles se obtiene la menor pérdida promedio.
- De acuerdo a lo analizado en la tabla de análisis de varianza, se estableció, que existe dependencia entre los factores poder de expansión e índice de absorción, siendo muy significativa la interacción lineal de los factores, verificándose que los niveles altos de los factores producen lo mayores rendimientos.

- El poder de expansión es un índice de calidad que depende del índice de absorción.
- La prueba para obtener el índice de absorción ó capacidad de absorción del almidón agrio, es una prueba muy sofisticada para llevarla a cabo el panadero ó el rallendero, por lo tanto, se recomienda continuar investigando hasta obtener una prueba fácil para estos dos sectores productivos.
- Se recomienda continuar investigando sobre la relación entre la humedad e índice de absorción.
- Realizar investigaciones en las cuales se pueda determinar que factores dentro del proceso de producción del almidón agrio de yuca hacen que el almidón presente más o menos capacidad de absorción.

6. Referencias Bibliográficas

1. ARIMANY, P. LUIS. Ingeniería de la Calidad: Taguchi ese conocido tan desconocido, E.T.S.I., Madrid. (Sin fecha)
2. CEREDA, M. P.; SILVA Nunes, O. (1995). Manual de Análises de Polvilho Aazedo. Controle de Qualidade de Produtos de Mandioca. 1a. Edit. CERAT.p. 17.
3. ESCOBAR C. (1990). Obtención de parámetros para la evaluación de la calidad de un almidón agrio de yuca. Tesis. Univalle. Cali, Colombia.
4. LAWSON J.; MADRIGAL J. L.; ERJAVEC J. (1992). Estrategias experimentales para el mejoramiento de la calidad en la industria. Edit. Iberoamerica S.A de C.V. Mexico.
5. PRAT Bartes A. (1995). Seminario de diseño experimental y método de Taguchi en el control de la calidad. Cali.
6. WALTERS, F.H.; S.L. MORGAN; L.R. PARKER, Jr. and S.N. DEMING (1999): "Sequential Simplex Optimization", Electronic reprint, Multisimplex AB, Karlskrona, Sweden.



**Universidad
del Valle**

Escuela de Ingeniería
Industrial y Estadística

PROGRAMA DE FORMACIÓN PROFESIONAL EN PREGRADO: ESTADÍSTICA

Perfil profesional:

- Dirige, organiza, estructura y administra oficinas o departamentos de estadística en empresas privadas o del estado.
- Asesora en diseño y análisis de experimentos a las instituciones de investigación científica y tecnológica y a los profesionales de otros campos.

• Diseña, ejecuta y analiza encuestas e implementa las técnicas de muestreo necesarias en campos como: estudios de mercados, estudios de existencias, estudios socioeconómicos, etc.

• Asesora en la definición y validación de modelos estadísticos – matemáticos para estudios investigativos en los cuales se requiera analizar el comportamiento simultáneo de varios factores aleatorios para la explicación de una problemática existente.

• Es un experto en el uso de bancos de datos con fines estadísticos y excelente asesor en procesamiento y análisis de información mediante el uso de software estadístico altamente especializado.

INFORMES:

Ciudad Universitaria Meléndez
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Industrial
y Estadística
Edificio: 346
Teléfonos: 3212196 Fax: 3315274
A.A. 25360
Cali, Colombia