



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

U.N.A.M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLAN



Departamento de  
Ingeniería de Alimentos

## METODO DE TAGUCHI APLICADO A LA EVALUACION DE LOS EFECTOS DE SECADO SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE REBANADAS DE PLATANO (*M. PARADISIACA* *Y M. SAPIENTUM*)

**P U B L I C A C I O N**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERA EN ALIMENTOS  
P R E S E N T A :  
PAOLA CATALINA GUZMAN TINAJERO

ASESORES: M. en C. MARIA DE LA LUZ ZAMBRANO ZARAGOZA  
M. en C. ROSALIA MELENDEZ PEREZ

m340575



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

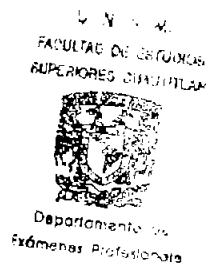
Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES



ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
PRESENTE

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos:

La Publicación: "Método de Taquichí Aplicado a la Evaluación de los Efectos de Secado sobre las Propiedades Mecánicas de Rebanadas de plátano (M. Paradisiaca y M. sapientum)".

que presenta la pasante: paola catalina guzmán tinajero  
con número de cuenta: 09753828-6 para obtener el título de:  
Ingeniera en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 24 de Marzo de 2004

PRESIDENTE IBQ. Norma Beatriz Casas Alencáster

VOCAL Dra. María Elena Vargas Ugalde

SECRETARIO MC. María de la Luz Zambrano Zaragoza

PRIMER SUPLENTE Dra. María Andrea Trejo Márquez

SEGUNDO SUPLENTE MC. María Guadalupe López Palacios

## AGRADECIMIENTOS

Gracias a la UNAM y a mi bella Facultad por tanta enseñanza, por la formación tanto académica como humana y por todas las experiencias que en ella viví, siempre las llevaré en mis recuerdos.

### En especial a mi Madre:

Por tu inmenso amor, por tu constante apoyo en todo lo que he emprendido, porque sabes estar conmigo en cualquier circunstancia, por ayudarme a ser lo que hoy en día soy. Admiro tu coraje y alegría con la que enfrentas y ves la vida, eres mi ejemplo a seguir. Te quiero muchísimo mami. De verdad mil gracias.

### A mis asesoras, Ma. de la Luz Zambrano y Rosalía Meléndez Pérez:

Muchas gracias por toda su ayuda, sobre todo a la aportación de su tiempo y de sus conocimientos a este trabajo. También gracias por resolver mis dudas y por entender la falta de continuidad en la realización de este artículo.

### A mi padre:

Te quiero y te admiro por todo el desarrollo profesional que has logrado, es uno de los motivos que me impulsan a seguir aprendiendo.

### A Paula Muñoz:

Por todos tus cuidados, por entender mi mal carácter y por preocuparte cuando no como, cuando llego tarde o cuando no dormí lo suficiente. Gracias por los sacrificios que has hecho por nuestra familia. Te quiero mucho abuelita.

### A Roberto Gordillo Vargas:

A ti mi novio, por ayudarme desde un inicio a la realización de este artículo y por todo el interés que le pusiste. Gracias por tu apoyo incondicional, tu paciencia, por el amor que me demuestras, por la palabra exacta, por todas las cosas que hemos pasado y en especial *por estarme enseñando a caminar en pareja. Te Amo.*

**A mis tíos Carlos y Guille, a mis primos Carlitos y Lorena y a mi pequeño sobrino Daniel:**

Familia gracias por su confianza, por las porras y por todo el cariño. Sabemos que contamos los unos con los otros, y aunque no se tenga a veces el tiempo para vernos siempre están conmigo.

**A Luis Gerardo Huicochea:**

Por brindarme tu amistad y tu apoyo en todos los años que anduvimos en la Universidad. Por todas esas desveladas en las que tuvimos que estudiar. Gracias amigo.

**A Martha Aurora:**

Por nuestra amistad, por todas las experiencias compartidas, por los años de la gimnasia, por todas las risas y lágrimas, por saber decir las palabras de aliento y de crítica en los momentos difíciles. En ti encontré a una hermana.

**A Denisse Pardo:**

Sabes que sin ti no hubiera podido darle punto final a esta meta, te agradezco mucho todo el tiempo que te tomaste y las vueltas que te hice dar para los trámites de este artículo. Además por ofrecerme algo que te sale natural, tu amistad sincera.

**A todos mis amigos:**

Creo que una de las cosas que le debo agradecer a la vida es haber hecho tantos amigos durante mi desarrollo personal y académico. Gracias a Mónica Almanza (comadre), a Berenice Osorio, Margarita Jiménez, Lidia Cruz, Gabriela Sepúlveda, Gaby Flores, Karina Gutiérrez, Iñaki Albizuri y Sergio Torres por enseñarme muchas cosas y entre las más importantes a dar sin pedir a cambio.

# **Método de Taguchi Aplicado a la Evaluación de los Efectos de Secado sobre las Propiedades Mecánicas de Rebanadas de Plátano (*M. Paradisiaca* y *M. Sapientum*)**

P. C. Guzmán-Tinajero, M.L. Zambrano-Zaragoza, R. Meléndez-Pérez y J. L. Arjona-Román

Univ. Nacional Autónoma de México, Fac. de Estudios Superiores Cuautitlán, Av. 1ro. de mayo s/n, Col. Centro urbano, 54745 Cuautitlán Izcalli, Edo. México-México.

(e-mail: [luz.zambrano@correo.unam.mx](mailto:luz.zambrano@correo.unam.mx) )

---

## **Resumen**

Se utilizó un diseño ortogonal basado en la metodología de Taguchi para evaluar los efectos de las condiciones del proceso de secado, sobre las propiedades mecánicas de rebanadas plátano. La velocidad de secado es controlada por la migración del agua desde el interior hacia la superficie, ya que el espesor presenta mayor contribución que la temperatura. En las propiedades mecánicas para la carga máxima y energía, la temperatura de secado muestra mayor efecto que otras variables del proceso. La variedad y el grado de madurez indican un importante efecto sobre el nivel de deformación. Se concluye que las mejores condiciones para una velocidad de secado de 0.756 kg agua/h m<sup>2</sup> son 65°C, 2 mm de espesor, variedad *M. paradisiaca* y estado de madurez amarillo. Para las propiedades mecánicas las mejores condiciones son 65°C, 2 mm de espesor, estado de madurez amarillo y variedad *M. Sapientum*.

# Taguchi Method Applied to Evaluate the Effects of Drying on the Mechanical Behavior of Banana Slices (*M. paradisiaca*; and *M. sapientum*).

---

## Abstract

An orthogonal design was used, based on Taguchi techniques, to evaluate the effects of drying conditions on mechanical properties of banana slices. The speed of drying is controlled by the migration of water from the interior to the surface, since the thickness is more important than the temperature. The drying temperature shows a greater effect than other process variables with regard to the mechanical properties related to maximum load and energy. The variety and degree of ripeness show important effects on the level of deformation. It is concluded that the best conditions for a drying velocity of 0.756 kg water/h m<sup>2</sup> are 65°C, 2 mm of thickness, variety *M. paradisiaca* and yellow stage ripeness. For the mechanical properties, the best conditions are 65 °C, 2mm of thickness, yellow stage ripeness, and *M. sapientum* variety.

Keywords: banana slices, drying process, mechanical behavior, Taguchi methods, orthogonal design

## INTRODUCCIÓN

El plátano es una fruta tropical de alto consumo debido a su bajo precio, fácil disponibilidad en cualquier época del año y a su elevado valor nutritivo. Esta fruta es susceptible al deterioro y se ha visto que sufre muchos cambios durante su maduración (Kajuna, *et. al.*, 1997; Prabha y Bhagyalakshmi, 1998), por lo que para alargar su vida útil se somete a diversos métodos de conservación, uno de ellos es el proceso de secado. Se ha estudiado el efecto que tiene sobre el producto final (Boudhrioua, *et. al.*, 2002; Chua, *et. al.*, 2001; Queiroz y Nebra, 2001).

Una de las ventajas de la deshidratación es la reducción de la disponibilidad de agua en el producto, pero también debido a esto, el alimento puede sufrir cambios por efecto del tiempo y la temperatura en la pared celular, provocando pérdida de la turgencia, reflejada en las propiedades mecánicas del mismo (Chiralt, *et. al.*, 2001). Sin embargo, uno de los objetivos de evaluar las propiedades mecánicas en alimentos, es analizar los cambios sufridos al someterlo a operaciones o procesos como son la cocción, almacenamiento, secado o congelación, (Boudhrioua, *et. al.*, 2002; Chiralt, *et. al.*, 2001; Singh y Goswami, 1998; Kachru, *et. al.*, 1995).

La velocidad con la que ocurre el proceso de secado depende, tanto de las características del aire, como de las características del producto. En cuanto a las primeras, la temperatura del aire, la velocidad con la que circula alrededor del producto y su humedad relativa, entre otras, propiciarán que a medida que la temperatura del aire aumenta y su humedad relativa decrece, su capacidad para absorber humedad aumenta y el producto se deshidrata más rápidamente (Welty, *et. al.*, 1993).

Luego que la humedad de la superficie de un alimento se ha retirado por evaporación, el nivel de secado en un segundo período dependerá de la velocidad con la que su humedad interna se transporte hacia la superficie por un diferencial de humedad (Smith y Van Ness, 1996), de presiones parciales o de temperatura, variando estos mecanismos de un producto a otro. Por ejemplo, los alimentos ricos en azúcares liberan más lentamente la humedad, por lo que requieren un mayor tiempo para su



deshidratación. En forma similar, los alimentos que contienen almidón, gomas u otro tipo de polímero, forman a nivel superficial por efecto de la temperatura, una capa impermeable al paso de la humedad.

En estos casos, la velocidad de secado es controlada por el mecanismo de difusión de humedad limitando la velocidad de deshidratación y propiciando efectos de consideración en los atributos del producto (Demirel y Turhan, 2003).

Si bien el secado puede considerarse como un proceso de intercambio térmico y másico que puede ser controlado, no se conoce en casos particulares, el porcentaje de contribución que puede tener cada una de las variables que intervienen en el mismo, ni el efecto que causan sobre las propiedades mecánicas o atributos de calidad que percibe el consumidor, por lo tanto, el objetivo de este estudio fue analizar la influencia del secado en rebanadas de plátano, mediante la evaluación de la velocidad de secado y la determinación de la contribución de las variables de proceso sobre las características mecánicas del producto, utilizando la metodología de Ingeniería de Calidad con un arreglo ortogonal basado en el método de Taguchi (Peace, 1993).

La ingeniería de Calidad, es una rama de la ingeniería que tiene por objetivo el analizar la significancia económica de la calidad, utilizando para ello herramientas estadísticas, cálculos económicos y características de diseño del producto y/o proceso, desarrollando o implementando planes sistemáticos de calidad con el fin de resolver problemas de calidad y variabilidad a través de las fases de planeación, diseño y producción de un bien o servicio (Tesorero, 1992). Combina métodos de ingeniería y estadística para mejorar costos y calidad, optimizando el diseño de productos y procesos de manufactura. Las herramientas básicas para lograrlo son la función pérdida y la relación señal-ruido, que nos permiten identificar en las etapas tempranas del desarrollo de un producto las áreas de mejoría al mínimo costo posible. Tiene como ventajas las siguientes: (Stuart, 1993)

- Simplifica el trabajo entre ingenieros, científicos y técnicos al aplicar el diseño de experimentos.

- Introduce una medida que incorpora tendencia central y variabilidad de respuesta: la relación señal-ruido.
- Introduce un nuevo marco de referencia para concebir la calidad: la función pérdida.
- Simplifica el diseño de experimentos empleando arreglos ortogonales, gráficos lineales y tablas de interacción.
- Introduce el concepto de robustez contra el ruido por medio del cual, en lugar de eliminar la causa de un efecto, se hace un producto o proceso insensible a los ruidos.

Para obtener un experimento exitoso y resultados reproducibles se requiere de la planeación cuidadosa y de ejecutar fielmente el plan de trabajo. (Ross, 1989; Taguchi, 1989). Sus pasos esenciales son:

- Planeación del experimento
- Diseño del experimento
- Ejecución del experimento
- Análisis del experimento

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Para llevar a cabo el objetivo planteado se utilizó un secador de charolas construido en acrílico con una capacidad de carga de 1000 gr con 7 bandejas separadas 3.5 cm una de otra, utilizando plátano de las variedades *Musa paradisíaca var. sapientum* y *paradisíaca* en rebanadas de 2 y 4 mm de espesor, con grado de madurez verde y amarillo, aplicando temperaturas en el secador de 55 y 65 °C en función de la altura entre bandejas, con dos opciones de apertura al flujo de calor: cerrado y abierto.

Las dos variedades de plátano fueron adquiridas en un mercado local de Cuautitlán Izcalli, Estado de México; los estados de madurez se establecieron de acuerdo al color de la cáscara, estimándose que el color verde indicaba la madurez comercial, mientras

- Introduce una medida que incorpora tendencia central y variabilidad de respuesta: la relación señal-ruido.
- Introduce un nuevo marco de referencia para concebir la calidad: la función pérdida.
- Simplifica el diseño de experimentos empleando arreglos ortogonales, gráficos lineales y tablas de interacción.
- Introduce el concepto de robustez contra el ruido por medio del cual, en lugar de eliminar la causa de un efecto, se hace un producto o proceso insensible a los ruidos.

Para obtener un experimento exitoso y resultados reproducibles se requiere de la planeación cuidadosa y de ejecutar fielmente el plan de trabajo. (Ross, 1989; Taguchi, 1989). Sus pasos esenciales son:

- Planeación del experimento
- Diseño del experimento
- Ejecución del experimento
- Análisis del experimento

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Para llevar a cabo el objetivo planteado se utilizó un secador de charolas construido en acrílico con una capacidad de carga de 1000 gr con 7 bandejas separadas 3.5 cm una de otra, utilizando plátano de las variedades *Musa paradisíaca var. sapientum* y *paradisíaca* en rebanadas de 2 y 4 mm de espesor, con grado de madurez verde y amarillo, aplicando temperaturas en el secador de 55 y 65 °C en función de la altura entre bandejas, con dos opciones de apertura al flujo de calor: cerrado y abierto.

Las dos variedades de plátano fueron adquiridas en un mercado local de Cuautitlán Izcalli, Estado de México; los estados de madurez se establecieron de acuerdo al color de la cáscara, estimándose que el color verde indicaba la madurez comercial, mientras

que el color totalmente amarillo representaba la etapa de madurez de consumo (Willis, et. al, 1998).

Se seleccionó un arreglo ortogonal  $L_{16} (2)^{15}$  según el método de Taguchi, que proporciona el diseño experimental para las 16 corridas. Los 16 experimentos se realizaron en el secador previamente descrito, utilizando como medio de calentamiento del aire las resistencias eléctricas propias del equipo. Se seleccionaron las bandejas 1 y 4 con temperaturas de 55 y 65 °C, respectivamente.

Las muestras de plátano se cortaron en rodajas de 2 y 4 mm de espesor, con ayuda de dos navajas y un sistema de sujeción paralela. La humedad libre se determinó haciendo mediciones del cambio de peso de la muestra en lapsos de 10 min para muestras de 2mm de espesor y 20 min para muestras de 4mm de espesor, en un tiempo total de secado de 4.5 y 7 h respectivamente. La velocidad de secado se determinó mediante la pendiente de las regresiones de las gráficas de humedad libre en función del tiempo (Geankoplis, 1998).

Para la evaluación de las propiedades mecánicas del plátano se utilizó una Máquina Universal Instron 4411 con interfaz IEEE- 488 y software de las series IX, proporcionado por Instron. Los ensayos se llevaron a cabo utilizando una celda de carga de 5 kN; el dispositivo de prueba fue una celda Kramer y la velocidad de cruceta se fijó con el fin de aplicar una fuerza 259 kgf/min. Los ensayos mecánicos se realizaron por triplicado a los plátanos sometidos a deshidratación, según el diseño experimental previamente establecido. Las variables de respuesta fueron: carga máxima (kgf), porcentaje de deformación (%), energía entre límites (kgf-mm) y deformación plástica (mm).

Finalmente, para la determinación de los porcentajes de contribución de las variables de proceso sobre los parámetros mecánicos y la selección de los niveles de variación de las variables de operación, se aplicó el análisis de varianza correspondiente a la metodología propuesta. En la selección de los niveles de variación, se utilizó el criterio "menor es mejor" del método Taguchi (Peace, 1993).

Los 16 experimentos se realizaron en el secador previamente descrito, utilizando como medio de calentamiento del aire las resistencias eléctricas propias del equipo. Se seleccionaron charolas 1 y 4 con temperaturas de 55 y 65 °C respectivamente.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Como se describió en la metodología, se tomaron como base los resultados obtenidos de la aplicación de la técnica de Taguchi para analizar la influencia de las variables de proceso (temperatura, espesor del material, variedad de plátano, grado de madurez del mismo), sobre las variables de respuesta (velocidad de secado y propiedades mecánicas).

Con respecto a la velocidad de secado, en la figura 1 se observa, que existe una importante influencia del espesor de las rebanadas, con un porcentaje de contribución en un 69.69%, la temperatura presenta una contribución de 14.7%, menor que la del espesor y siguiendo en importancia.

En el caso de alimentos, la facilidad de transferencia de masa también se ve influenciada por la composición, ya que dependiendo de los componentes y la forma en la que se encuentren distribuidos, se determinará la facilidad con la que el agua es eliminada, repercutiendo lógicamente en la velocidad de secado. Particularmente en este estudio, la variedad de plátano y el estado de madurez definido, fueron las variables de las que dependió la composición del alimento.

Puede apreciarse en la figura 1, que estas dos variables tuvieron una contribución de 5.32% y 0.8% respectivamente, y aunque en menor proporción, influyen en la velocidad de secado. El estado de madurez por sí solo presentó poca contribución y las interacciones variedad-grado de madurez y espesor-grado de madurez, contribuyen en 0.78% y 2.72% respectivamente.

Los 16 experimentos se realizaron en el secador previamente descrito, utilizando como medio de calentamiento del aire las resistencias eléctricas propias del equipo. Se seleccionaron charolas 1 y 4 con temperaturas de 55 y 65 °C respectivamente.

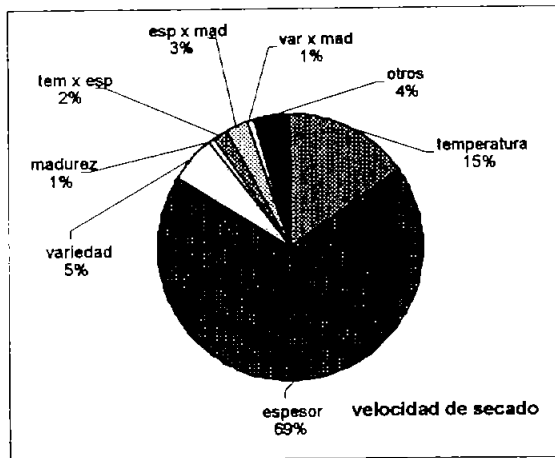
## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Como se describió en la metodología, se tomaron como base los resultados obtenidos de la aplicación de la técnica de Taguchi para analizar la influencia de las variables de proceso (temperatura, espesor del material, variedad de plátano, grado de madurez del mismo), sobre las variables de respuesta (velocidad de secado y propiedades mecánicas).

Con respecto a la velocidad de secado, en la figura 1 se observa, que existe una importante influencia del espesor de las rebanadas, con un porcentaje de contribución en un 69.69%, la temperatura presenta una contribución de 14.7%, menor que la del espesor y siguiendo en importancia.

En el caso de alimentos, la facilidad de transferencia de masa también se ve influenciada por la composición, ya que dependiendo de los componentes y la forma en la que se encuentren distribuidos, se determinará la facilidad con la que el agua es eliminada, repercutiendo lógicamente en la velocidad de secado. Particularmente en este estudio, la variedad de plátano y el estado de madurez definido, fueron las variables de las que dependió la composición del alimento.

Puede apreciarse en la figura 1, que estas dos variables tuvieron una contribución de 5.32% y 0.8% respectivamente, y aunque en menor proporción, influyen en la velocidad de secado. El estado de madurez por sí solo presentó poca contribución y las interacciones variedad-grado de madurez y espesor-grado de madurez, contribuyen en 0.78% y 2.72% respectivamente.

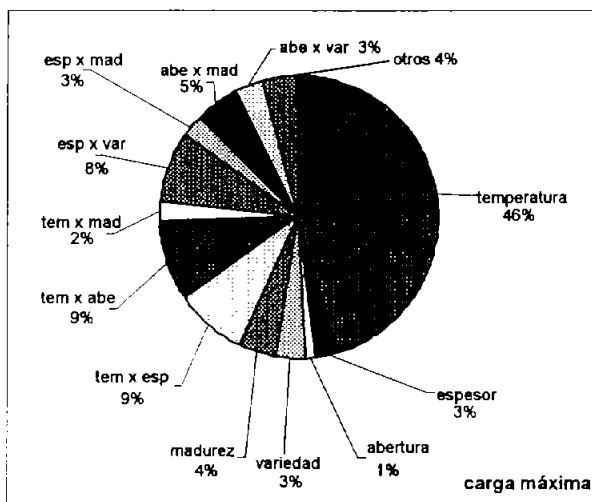


**FIGURA 1.** Porcentaje de contribución de las variables de proceso sobre la velocidad de secado de plátano.

De los valores que se obtuvieron de la velocidad de secado, para la temperatura de 55 °C, espesor de la rebanada de 4 mm, variedad *paradisíaca* y estado de madurez verde se presenta una velocidad de secado 0.326 kg agua/hm<sup>2</sup> que comparada a la obtenida de 0.756 kg agua/hm<sup>2</sup> para la temperatura de 65 °C, espesor de 2mm; variedad *sapientum* y estado maduro, representa un aumento en 2.3 veces, implicando que estas variables son de gran importancia en el procesado de este tipo de productos.

Con respecto a la influencia de las variables de proceso sobre las propiedades mecánicas analizadas en el producto final y, específicamente la carga máxima, ésta se presenta en la figura 2.

La variable con mayor influencia en este caso, fue la temperatura con 42.57% de contribución, sin embargo, no puede explicarse aisladamente esta variable de respuesta, sino que debe considerarse el comportamiento durante el secado.

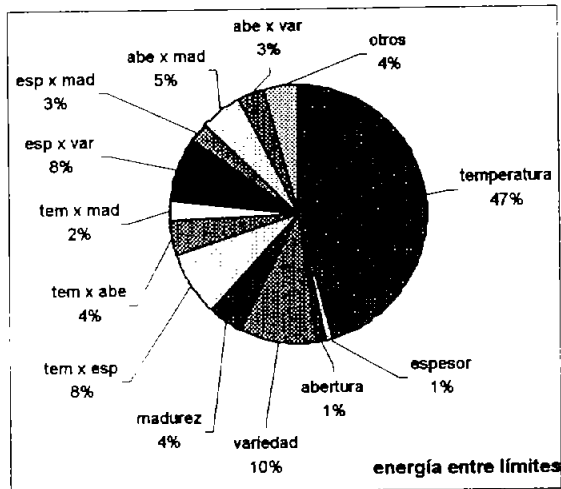


**FIGURA 2.** Porcentaje de contribución de las variables de proceso sobre la carga máxima.

De esta manera, en el caso de la temperatura de 65 °C, se obtuvo inicialmente una rápida eliminación de agua, ocasionando la gelatinización de los almidones, la formación de una capa superficial en el plátano que limita la velocidad de migración de la humedad interna hacia la superficie, provocando en consecuencia una reducción de la velocidad de evaporación en el período decreciente a causa de un incremento en la resistencia a la transferencia de masa, y repercutiendo sobre el comportamiento mecánico del producto final.

La energía entre límites necesaria para alcanzar el límite de ruptura, es interpretada a partir del área bajo la curva esfuerzo-deformación, que comprende el comportamiento de la zona elástica-plástica en donde, como se observa en la figura 3, la temperatura es la variable que contribuye de manera significativa sobre este comportamiento con un 42.96%, seguida por la variedad de plátano con 9.12%.



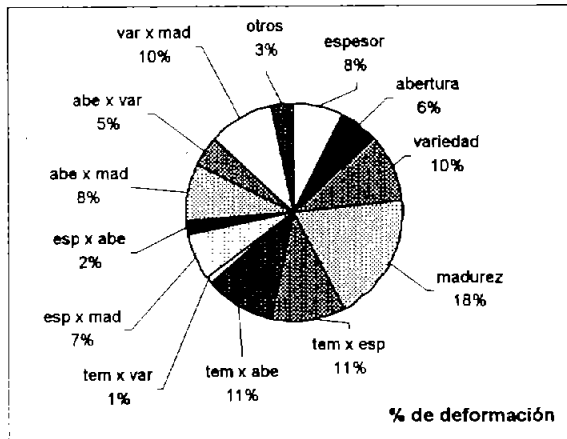


**FIGURA 3.** Porcentaje de contribución de las variables de proceso de secado en energía entre límites.

La temperatura y la variedad actúan con un efecto similar que para la carga máxima requerida; se observa que para una temperatura de 65 °C, y la variedad *sapientum* se favorece la formación de la capa superficial, por lo que se requiere mayor fuerza para su ruptura dado un comportamiento mayormente elástico, reflejado en un aumento en la energía requerida para poder finalmente romperlo. En el caso de la temperatura de 55 °C, y la variedad *paradisíaca*, se obtienen rebanadas que llegan más rápidamente a la zona de ruptura, en donde las zonas de deformación elástica y plástica se reducen, requiriéndose menos energía. La contribución de las otras variables es menor, aunque su influencia es observada indirectamente dentro de las interacciones que presentaron mayor contribución, como lo son temperatura-espesor con un 7.42%, y abertura al flujo de calor-madurez con 10.77%.

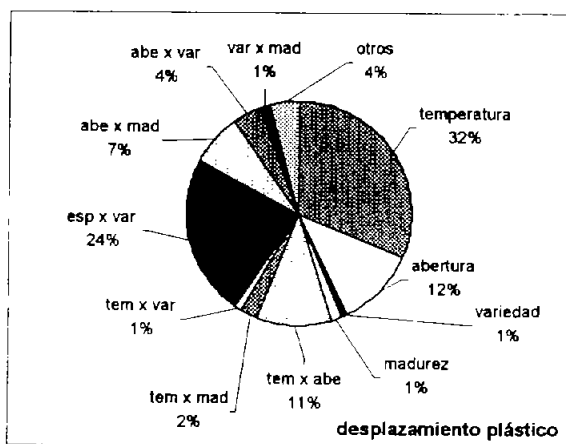
En la figura 4, se presenta el porcentaje de contribución de las variables de proceso sobre el porcentaje de deformación, la cual indica cuánto se deformó el material hasta su ruptura observando que para este factor, principalmente la madurez contribuye con

un 18.82% y la variedad con 9.83%, considerándose las variables con mayor influencia. Debido al contenido de almidones y a la estructura de los mismos, en la variedad *sapientum*, el contenido de humedad influye en la gelatinización del almidón, dando como consecuencia que el producto se deforme en mayor proporción antes de romperse, en relación a uno que tiene menor contenido de humedad.



**FIGURA 4.** Porcentaje de contribución de las variables de proceso de secado sobre % deformación

Por lo tanto, el desplazamiento plástico indica la distancia recorrida durante la deformación hasta su ruptura, en la figura 5 se indica que la temperatura contribuye en gran medida a este efecto con un 31.44%. Las otras variables no tienen una contribución significativa en forma individual, pero, la interacción espesor-variedad tiene una contribución de 23.37%, lo cual indica que tanto el espesor y la variedad ejercen influencia en la facilidad de eliminación de agua. Se observa que la opción abierta al flujo de calor, contribuye en 11.22%, esto dice que con la modificación de esta variable, se evita acumulación interna de humedad y por lo tanto se reduce la deformación.



**FIGURA 5.** Porcentaje de contribución de las variables de proceso de secado en el desplazamiento plástico.

Finalmente, en la metodología de Taguchi, se proponen los niveles de las variables de proceso y del alimento recomendadas para la optimización del secado de plátano con propiedades mecánicas deseables, las cuales son presentadas en la tabla 1 y en la tabla 2 se resumen los niveles de las variables trabajadas.

**Tabla 1.** Niveles de variación recomendados a partir de la aplicación de la metodología de Taguchi para secado de plátano.

Variable	Variable de respuesta			
	Carga Máxima	Energía entre límites	% de deformación	Desplazamiento plástico
Temperatura	1	1		1
Espesor	1	1	1	
Abertura	1	1	1	2
Variedad	2	2	2	2
Madurez	2	2	1	2

Como se seleccionó en el análisis la respuesta “menor es mejor” para la influencia de las variables en las propiedades mecánicas, se recomiendan los niveles presentados en la tabla 1.

**Tabla 2.** Niveles de variación utilizados en la metodología de Taguchi

<b>variable</b>	<b>nivel 1</b>	<b>nivel 2</b>
Temperatura	55°C	65°C
Espesor	2mm	4mm
Abertura	cerrado	abierto
Variedad	Musa sapientum	Musa paradisiaca
Madurez	verde	amarillo

## CONCLUSIONES

Durante el secado de rebanadas de plátano, la aplicación de arreglos ortogonales del método Taguchi, permite analizar individualmente y en interacción las variables propias del proceso con aquellas correspondientes al producto, para establecer los niveles de influencia sobre las propiedades mecánicas del material estudiado.

En el caso de la temperatura y el espesor, existe congruencia en los niveles seleccionados en relación a la velocidad de secado y propiedades mecánicas.

Se recomienda para ambas el nivel bajo, correspondiente a la temperatura de 55 °C y espesor de 2 mm, implicando que, aunque se tenga una velocidad de secado relativamente baja, se requerirá aplicar una menor carga máxima que a 65 °C para reducir la resistencia a la ruptura, con menor deformación del material y menor distancia que recorrer durante la deformación plástica.

En el caso de la variedad para tener estas mismas respuestas, se recomienda trabajar con la variedad *Musa paradisíaca*.

Salvo en el caso de la respuesta porcentual de deformación, se recomienda utilizar un plátano en etapa de madurez de consumo correspondiente al color verde y que representaría mayor cantidad de agua extra celular.

Bajo las condiciones recomendadas, se propiciará una rápida migración de humedad, obteniéndose un producto deshidratado con características de consumo adecuadas.

## REFERENCIAS

- Boudhrioua N., C. Michon, G. Cuvelier, y C. Bonazzi, *Influence of ripeness and air temperature on changes in banana texture during drying*, Journal of Food Engineering: 55(2), 115-121 (2002).
- Chiralt A., N. Martínez-Navarrete, J. Martínez-Monzó, P. Talens, G. Moraga, A. Ayala, y P. Fito, *Changes in mechanical properties throughout osmotic processes cryoprotectant effect*, Journal of Food Engineering: 49, 129-135 (2001).
- Chua K. J., A. S. Mujumdar, M. N. A. Hawlader, S. K. Chou, y J. C. Ho, *Batch drying of banana pieces - effect of stepwise change in drying air temperature on drying kinetics and product colour*, Food Research International: 34, 721-731 (2001).
- Demirel D., y M. Turhan, *Air-drying behavior of Dwarf Cavendish and Gros Michel banana slices*, Journal of Food Engineering: (In Press) (2003).
- Geankoplis C. J., *Procesos de transporte y operaciones unitarias*, 3ª. edición. CECSA, México, (1998).
- Kachru R. P., N. Kotwaliwale, y D. Balasubramanian, *Physical and mechanical properties of green banana (Musa paradisiaca) fruit*, Journal of Food Engineering: 26, 369-378 (1995).
- Kajuna S. T. A. R., W. K. Bilanski, y G. S. Mittal, *Textural changes of banana and plantain pulp during ripening*, Journal of Science and Food Agriculture: 75, 244-250 (1997).
- Peace G. S., *Taguchi Methods, a hands-on approach*. Second Edition. Addison-Wesley Pu. Co. USA (1993).

- Prabha T. N., y N. Bhagyalakshmi, *Carbohydrate metabolism in ripening banana fruit*, *Phytochemistry*: 48(6), 915-919 (1998).
- Queiroz M. R., y S. A. Nebra, *Theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of bananas*, *Journal of Food Engineering*: 47, 127-132 (2001).
- Ross P.J., *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. Editorial Mc. Graw Hill Book Co. Singapore (1989).
- Singh K. K., y T. K. Goswami, *Mechanical properties of Cumin Seed (Cuminum cyminum Linn.) under compressive loading*, *Journal of Food Engineering*: 36, 311-321 (1998).
- Smith J. M. y N. H. C. Van, *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*, Cuarta Edición. Mc. Graw-Hill Book Company / Interamerican, México, S.A. de C.V. (1996).
- Stuart P. G., *Taguchi methods*, Editorial Addison-Weisley publishing Co. Massachussets (1993).
- Taguchi G., *Quality Engineering in production systems*, Editorial Mc. Graw-Hill Book Co. Singapore (1989).
- Tesorero A. M., *El enfoque de la Ingeniería de calidad en procesos alimentarios*, Tesis de licenciatura UNAM (1992).
- Welty J. R., C. E. Wicks, y R. E. Wilson, *Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa*, 1ª Edición, 5ª Reimpresión, Editorial Limusa, México (1993).

- Willis R., Mc. Glasson, G. Doug, y J. Daryl, *Introducción a la fisiología y manipulación poscosecha de frutas y hortalizas y plantas ornamentales*, 2ª. edición, Acribia, España (1998).