

<https://doi.org/10.69639/arandu.v11i2.478>

## **Optimización de Variables Críticas en un Sistema Automatizado de Beneficio y Tostado de Ajonjolí**

*Optimización de Variables Críticas en un Sistema Automatizado de Beneficio y Tostado de Ajonjolí*

**Edgar Mauricio Santamaría Urrea**

[inoxiapis@hotmail.es](mailto:inoxiapis@hotmail.es)

<https://orcid.org/0009-0008-0850-9684>

Gerencia y director de Proyectos, Inoxiapis SAS  
Sincelejo – Colombia

**Sandra Milena Peñarredonda de la Ossa**

[inoxiapis@hotmail.es](mailto:inoxiapis@hotmail.es)

<https://orcid.org/0009-0005-7543-4748>

Auxiliar de investigación de proyecto, Inoxiapis SAS  
Sincelejo – Colombia

**Yesica Yulieth Guevara Márquez**

[inoxiapis@hotmail.es](mailto:inoxiapis@hotmail.es)

<https://orcid.org/0009-0009-2783-739X>

Joven investigadora de proyecto, Inoxiapis SAS  
Sincelejo – Colombia

**Rosa Elena Rojas Amaya**

[rerojas@sena.edu.co](mailto:rerojas@sena.edu.co)

<https://orcid.org/0009-0003-2348-2970>

Dinamizadora SENNOVA, SENA, Regional Sucre  
Sincelejo – Colombia

*Artículo recibido: 20 octubre 2024 - Aceptado para publicación: 26 noviembre 2024*  
*Conflictos de intereses: Ninguno que declarar*

### **RESUMEN**

El objetivo de este estudio es optimizar el proceso de tostado de ajonjolí teniendo en cuenta las variables críticas, tales como la humedad inicial del grano, la temperatura de tostado y el tiempo de exposición al calor, a través de un sistema automatizado de tostado de ajonjolí. Para ello, se llevó a cabo una revisión bibliográfica con el fin de analizar la influencia de factores como la temperatura, el tiempo de tostado y la humedad en las propiedades organolépticas, fisicoquímicas y nutricionales de las semillas de ajonjolí antes y después del tostado puesto que este proceso es esencial para mejorar dichas propiedades, pero debe ser cuidadosamente controlado para evitar la pérdida de nutrientes y la degradación del producto. También se desarrolló un equipo que permite optimizar el proceso, mejorando la eficiencia energética y calórica, garantizando así la calidad del producto final. Los resultados muestran que existe una distribución del calor más eficiente y uniforme, permitiendo procesos de secado con mayor cantidad de producto, el rango de temperatura óptimo de tostado estuvo entre 160-180°C, el tiempo de tostado entre 40-60 minutos,

se midieron variables para Color L,A y B; el rango de pH fue de 5.4-6.7, el %acidez fue 0.0564 y el % de ceniza 4-5.6%. Las pruebas demostraron que el tostado bajo condiciones controladas no solo mejora el sabor y el aroma del ajonjolí, sino que también ayuda a preservar sus propiedades nutricionales; este sistema ofrece una solución viable tanto para pequeños como grandes productores, mejorando la consistencia y calidad del producto final.

*Palabras clave:* variables críticas, ajonjolí, temperatura, humedad

### **ABSTRACT**

The aim of this study is to optimize the sesame roasting process by considering critical variables, such as the initial moisture content of the kernel, roasting temperature and heat exposure time, through an automated sesame roasting system. To this end, a literature review was carried out to analyse the influence of factors such as temperature, roasting time and moisture on the organoleptic, physicochemical and nutritional properties of sesame seeds before and after roasting, since this process is essential to improve these properties, but must be carefully controlled to avoid nutrient loss and product degradation. Equipment was also developed to optimize the process, improving energy and caloric efficiency, thus guaranteeing the quality of the final product. The results show that there is a more efficient and uniform heat distribution, allowing drying processes with higher product quantity, the optimal roasting temperature range was between 160-180°C, roasting time between 40-60 minutes, variables were measured for colour L, A and B; pH range was 5.4-6.7, %acidity was 0.0564 and % ash 4-5.6%. The tests showed that roasting under controlled conditions not only improves the flavour and aroma of sesame, but also helps to preserve its nutritional properties; this system offers a viable solution for both small and large producers, improving the consistency and quality of the final product.

*Keywords:* critical variables, sesame, temperature, moisture

## INTRODUCCIÓN

El ajonjolí (*Sesamum indicum*) es una semilla ampliamente utilizada no solo en la industria alimentaria sino en la industria nutracéutica y farmacéutica debido a su alto contenido de ácidos grasos insaturados y compuestos bioactivos. Estas características le confieren propiedades nutricionales significativas, además de diversos beneficios para la salud. Nutricionalmente, se considera una fuente importante de proteínas gracias a cantidades apreciables de aminoácidos esenciales y no esenciales en comparación con otras proteínas de semillas. Las semillas de sésamo contienen más proteínas (17 a 40%) en comparación con la carne (18-25%) y los cereales (7a 13%), posee un contenido de humedad (7,34%), proteína (40,90%), fibra cruda (7,82%), ceniza (7,49%) y NFE (extracto libre de nitrógeno 32,48%), mientras que la grasa cruda (41,20%) es mayor en las semillas de sésamo enteras. (Abbas et al., 2022)

Además de su valor nutricional, el ajonjolí es rico en nutrientes esenciales para mantener una salud óptima, entre los cuales destacan la sesamina y la sesamolina. Estos compuestos poseen efectos reductores del colesterol en humanos, contribuyendo así a la prevención de la hipertensión arterial (Sigüencia Sojos & Saritama Valle, 2022). Actualmente, el interés por el ajonjolí ha crecido debido a sus diversas propiedades, lo que ha impulsado el desarrollo de mejoras en procesos, equipos y maquinaria con el fin de optimizar su producción.

El proceso de secado, según Crapiste (1997) se refiere a la remoción de líquido de un sólido por evaporación, donde la deshidratación de alimentos es un proceso que involucra la transferencia de masa y energía. Así mismo, estos procesos se llevan a cabo de manera simultánea e influyen el uno sobre el otro; puesto que la deshidratación logra remover la humedad de un material con el objetivo primario de reducir la actividad microbiana y la degradación (Nguyen et al., 2020).

Este proceso ha sido empleado desde la antigüedad, mediante la exposición de los alimentos al sol para deshidratarlos y poder consumirlos en otras temporadas o durante periodos de sequía. Actualmente, el uso de procesos de deshidratación forzada ayuda a reducir el tiempo de secado y mejoran la calidad del producto final, sin embargo, durante el proceso de deshidratación se presentan cambios significativos en las propiedades físicas del alimento. Estas propiedades dependen de varios factores como son el pretratamiento, el contenido de humedad, el método utilizado, y las condiciones de deshidratación. (Krokida et al., 2000)

Para garantizar que las variables críticas se controlen durante el tostado de semillas de ajonjolí, es esencial considerar factores clave como el color, el contenido de humedad y la temperatura de tostado. La formación de color durante el tostado puede monitorearse mediante el seguimiento continuo del proceso y el uso de controladores automatizados.

Las semillas de ajonjolí contienen antioxidantes naturales como lignanos (sesamina, sesamolina y sesamol), que desempeñan un papel significativo en la protección contra la

oxidación, por lo que para Lee et al. (2024), realizar un control preciso de los niveles de antioxidantes puede permitir obtener una mejor calidad de semillas de ajonjolí tostado. Además, el contenido de humedad de las semillas es crucial, ya que impacta los cambios de textura durante el tostado. Por lo tanto, controlar la temperatura y el tiempo de tostado es esencial para preservar las propiedades antioxidantes de las semillas de ajonjolí. (Kahyaoglu & Kaya, 2006a)

Estudios recientes han demostrado que la temperatura de tostado influye en la calidad del producto final más que el tiempo de tostado, aunque ambos parámetros interactúan significativamente entre sí. Según He et al. (2023), la evaluación sensorial indica que un tostado medio, a 150,5 °C durante 15 minutos, genera un sabor atractivo, buen aroma, apariencia y textura crujiente lo que optimiza la calidad de las semillas de sésamo en términos de propiedades sensoriales y alergenicidad; esto debido a que la temperatura y el tiempo de tostado afectan los compuestos aromáticos e influyen en la calidad del sabor, variando desde un aroma deseable y dulzura suave hasta un olor desagradable. Si la temperatura es demasiado baja, la síntesis de compuestos beneficiosos del aceite de sésamo no se acelera, pero si es demasiado alta, los elementos beneficiosos de las semillas se deterioran. (Tamura et al., 2010)

Dado lo anterior, el tostado se convierte en un proceso crucial para mejorar las propiedades organolépticas y nutricionales del ajonjolí. Para optimizar este proceso, se ha desarrollado una máquina de tostado con control de variables críticas. Este sistema incluye sensores de temperatura y humedad, implementación de mejoras en la eficiencia calórica y energética mediante el uso de quemadores cerámicos infrarrojo como fuente de calor, así como un sistema de monitoreo orientado al Internet de las Cosas (IoT) e Industria 4.0. La automatización electrónica permite un control preciso de las variables críticas del proceso.

Este artículo, tiene como objetivo optimizar el proceso de ajonjolí teniendo en cuenta variables críticas como la humedad inicial del grano, la temperatura de tostado y el tiempo de exposición al calor, a través de un sistema automatizado de tostado de ajonjolí mediante la revisión de estudios previos que han investigado el impacto del tostado en las propiedades de las semillas de ajonjolí; así como el desarrollo de un equipo que permite optimizar el proceso, mejorando la eficiencia energética y calórica, garantizando así la calidad del producto final. Los resultados muestran que existe una distribución del calor más eficiente y uniforme permitiendo procesos de secado con mayor cantidad de producto, el rango de temperatura óptimo de tostado estuvo entre 160-180°C, el tiempo de tostado entre 40-60 minutos, se midieron variables para Color L,A y B; el rango de pH fue de 5.4-6.7, el %acidez fue 0.0564 y el % de ceniza 4-5.6%. Las pruebas demostraron que el tostado bajo condiciones controladas no solo mejora el sabor y el aroma del ajonjolí, sino que también ayuda a preservar sus propiedades nutricionales; este sistema ofrece una solución viable tanto para pequeños como grandes productores, mejorando la consistencia y calidad del producto final. El diseño logra un producto estándar con un secado homogéneo, con reducción de costos, tiempo de producción y mayores niveles de calidad. El

resultado beneficia a los pequeños y medianos agricultores, con mejores condiciones de tostado, así como la reducción del gasto energético en el procesamiento del ajonjolí.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevó a cabo un desarrollo tecnológico, aplicado a la industria del ajonjolí, construcción y mejora de una maquina tostadora con cilindro rotativo que incluye un sistema de control y monitoreo de variables.

### Diseño y fabricación prototipo SATA – Sistema de Automatización y control para la estandarización en el proceso del tostado de ajonjolí

En la fabricación se utilizó lamina y tubería en acero inoxidable AISI 304 y el proceso de soldadura TIG como materiales idóneos para el prototipo SATA, así como componentes que no estén en contacto directo con el ajonjolí como rodachines, motorreductor y demás circuitos eléctricos. En la tabla 1, se realiza una descripción de los materiales utilizados para la fabricación del prototipo SATA, así como para el desarrollo del sistema de control y monitoreo, mediante el cual se captura información que son fundamentales para monitorear y controlar de manera efectiva el proceso de tostado de ajonjolí. La implementación de estos dispositivos mejora la eficiencia del tostado al reducir el riesgo de errores y asegurar un control constante durante todo el proceso. Esta se ha dividido por cada dimensión que compone todo el sistema.

**Tabla 1**

*Materiales para el desarrollo del prototipo y sistema de monitoreo y control*

<i>Dimensión</i>	<i>Material</i>	<i>Descripción</i>
Arquitectura física	Acero inoxidable 304	Es ampliamente utilizado en la industria alimentaria debido a sus propiedades higiénicas y su resistencia a la corrosión, puesto que contiene cromo y níquel lo que le permite formar una capa protectora de óxido, siendo esto último su principal atributo para la fabricación del prototipo, también posee una superficie que es fácil de limpiar y desinfectar, lo que reduce la acumulación de residuos y la proliferación de bacterias.
	Soldadura TIG (Tungsten Inert Gas)	Técnica de alta precisión que se utiliza comúnmente en la industria alimentaria por sus ventajas en términos de limpieza y calidad. Utiliza un electrodo de tungsteno y gas inerte (generalmente argón) para proteger el área de soldadura del oxígeno, evitando que se formen óxidos o impurezas en las uniones. Esto ayuda a mantener la pureza del acero inoxidable.
	Motorreductor (varia de velocidad)	Unidad compacta y homogénea formada por un reductor mecánico sin fin corona acoplada a un motor eléctrico de 120w y 110v, conectado eléctricamente a una unidad que varía la velocidad electrónica.
	Buzzer (BUZ1)	El buzzer emite sonidos de alerta en caso de condiciones peligrosas, como una fuga de gas o si el proceso de tostado ha finalizado.

	Relés (RLM1, RLM2 y RLM3)	Los módulos de relé controlan dispositivos de alta potencia como el quemador de gas y el motor del cilindro rotativo. Permiten que el Arduino, con sus salidas de baja potencia, pueda manejar estos componentes críticos.
	Sensor de Gas (GS1) MQ7 CO, C4H10 y C3H8	Este sensor asegura que no haya fugas peligrosas de gas durante el proceso de tostado. Monitorea la concentración de gases y, si se detecta una anomalía, el sistema puede alertar al operario o apagar el quemador automáticamente.
	Válvula solenoide	Controla paso y detención de flujo por medio de una señal eléctrica.
	Quemador cerámico infrarrojo	El cuerpo del quemador esta hecho de un panel cerámico, que permite una óptima combustión del gas, emitiendo radiación infrarroja uniforme y concentrado
	Tuberías	Tubería flexible para gas propano y/o gas natural proporciona movilidad al equipo.
Sistema de Control	Breake Bifasico	Energiza el sistema activando un contactor que da paso de corriente a la fuente de alimentación del microcontrolador de Arduino y brinda una protección contra sobre corriente
	Interruptor de perilla	Conmutación entre modos de operación, energiza la fuente de alimentación del control de ignición.
	Termocupla módulo MAX6675 (sensor de temperatura)	Debido a su alta precisión y fiabilidad en la medición de temperaturas extremas, puede alcanzar un rango de hasta 800°C. Este sensor es ideal para aplicaciones en las que se requiere monitorear el tostado de ajonjolí, ya que proporciona una salida de temperatura precisa a través de una interfaz SPI simple. Además, su capacidad para detectar fallos en el termopar y su compensación interna en frío garantizan un control de temperatura consistente y seguro en ambientes de alta temperatura.
	Control de ignición	Componente electrónico que mediante una señal del microcontrolador Arduino proporciona una crípa de alto voltaje que proporciona la ignición al quemador infrarrojo.
	Arduino Mega 2560	Es el cerebro del sistema automatizado de tostado. Responsable de controlar cada etapa del proceso, desde el encendido del quemador hasta la activación del motor del cilindro rotativo y la monitorización de la temperatura.
	LCD (LM016L)	La pantalla LCD se utiliza para mostrar información relevante del proceso, como la temperatura actual, el tiempo restante del tostado, o alertas específicas para el operario.
	LEDs (D1-D3)	Los LEDs proporcionan indicaciones visuales sobre el estado del proceso. Por ejemplo, un LED amarillo puede indicar que la temperatura de trabajo se ha alcanzado, mientras que un LED verde puede indicar que el cilindro está en movimiento.
Sistema de pruebas		

Botones de Control	Permiten al operario interactuar manualmente con el sistema, como reiniciar el proceso, seleccionar opciones, o detener el sistema en caso de emergencia.
Resistencias y Otros Componentes Pasivos	Estos componentes aseguran la estabilidad y correcta operación del sistema, evitando interferencias o errores en la lectura de señales. Las resistencias, como las de 10kΩ (R9, etc.), están en su mayoría conectadas como pull-up o pull-down para estabilizar las entradas digitales.
Conexiones de Alimentación DC 5V	Una fuente de 5V alimenta el Arduino y todos los periféricos, asegurando que cada componente reciba la energía necesaria, el circuito es alimentado por una fuente de 5V que alimenta tanto el Arduino como los módulos periféricos (LCD, relés, sensor de gas, etc.). El pin GND común conecta todas las tierras de los componentes.

Fuente: Elaboración Propia.

### Prueba Piloto Prototipo SATA Carga base experimental

Se llevó a cabo pruebas en el prototipo con producto real para determinar su capacidad y establecer una base experimental. Este proceso implica cargar el equipo con la cantidad máxima de ajonjolí que puede manejar, ajustando los parámetros de tostado como la temperatura, humedad y agitación. Se monitorean las variables críticas en tiempo real utilizando los sensores y dispositivos instalados, asegurando que el equipo opere dentro de los límites establecidos. Además, se realizaron ajustes necesarios para optimizar la operación, obteniendo datos que servirán para futuras calibraciones y ajustes del proceso de tostado.

**Establecimiento carga base:** se determina la cantidad óptima de ajonjolí que el equipo puede procesar de manera eficiente sin comprometer la calidad del tostado. Para ello, se realiza una serie de pruebas iniciales cargando el equipo con diferentes volúmenes de producto observando cómo las variables críticas como la temperatura, humedad y agitación responden bajo carga máxima.

### Diseño Experimental

Se llevo a cabo un diseño experimental multifactorial de 4 cargas experimentales 8, 10, 15 y 20 libras de ajonjolí, con 7 muestras elegidas al azar para realizar pruebas de laboratorio de color, pH, acidez, humedad y contenido de cenizas, sin replicas donde las variables manipuladas durante el proceso fueron temperatura, tiempo y humedad

### Temperatura

Para llevar a cabo esta prueba, se hace un precalentamiento de la maquina sin carga durante 7 minutos. Con la ayuda de una termocupla MAX6675 y un medidor manual infrarrojo se toma la temperatura de la cámara de tueste. Esta prueba se realizó 2 veces en un intervalo de 5 minutos durante el precalentamiento, y una vez la maquina se encuentra en la temperatura de trabajo 90-100°C, se realiza el cargue de la semilla. La temperatura del aire y el tiempo de exposición fueron 130–180°C durante tiempos entre 30–70min. Tras el tostado, las semillas de

sésamo se equilibraron inmediatamente a temperatura ambiente ( $26\pm 2^{\circ}\text{C}$ ) para evitar un calentamiento posterior. En la siguiente tabla se relaciona los tiempos y temperaturas de tostado óptimo para cada carga.

### **Color**

El color de las semillas de sésamo tostadas se midió en un espectrofotómetro. Los valores de color se expresaron como valores L (blancura u oscuridad), a ( grado de rojez o verde) y b ( grado de azulado o amarillez.). Para las semillas de ajonjolí se llevó a cabo un tostado entre  $130\text{--}180^{\circ}\text{C}$  durante 30-70 minutos.

### **Humedad**

El contenido de humedad de las semillas se determinó mediante el metodo gravimétrico del método de la AOAC (2010), pesando las semillas antes y después de secarlas en horno hasta alcanzar un peso constante y fue calculado mediante la siguiente ecuación

$$\%H = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100$$

Donde  $W_i$  es el peso inicial de la muestra, y  $W_f$  es el peso final de la muestra.g

### **Acidez y pHg**

Determinación de la cantidad de ácidos grasos libres. El índice de acidez es el número de miligramos de KOH necesario para neutralizar los ácidos grasos libres presentes. Por consiguiente, cuando se presenta un valor elevado de esta índice señala que el compuesto tiene altos niveles de ácidos grasos libres.

### **Contenido Cenizo**

En este método toda la materia orgánica se oxida en ausencia de flama a una temperatura que fluctúa entre los  $550\text{--}600^{\circ}\text{C}$ ; el material inorgánico que no se volatiliza a esta temperatura se conoce como ceniza.

Para determinar el contenido en cenizas se siguió el método AOAC (2000). En crisoles previamente pesados, se tomó una muestra de 2 g (sin humedad) y se introdujo en un horno de mufla (Carbolite Gero CWF 1100) durante 5 h a  $550^{\circ}\text{C}$ , hasta obtener un residuo. Los crisoles se trasladaron a desecadores para enfriarlos. El contenido de cenizas se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{Contenido ceniza} = \frac{W_2 - W_1}{W_s} \times 100$$

donde  $W_2$  = Peso del crisol con cenizas,  $W_1$  = Peso del crisol sin cenizas,  $W_s$  = Peso de la muestra.

### **Análisis de Varianza**

El análisis de varianza ANOVA permite contrarrestar la hipótesis nula que las medias de las poblaciones son iguales, en cuanto, a la hipótesis alternativa indica que por lo menos una de las poblaciones es diferente de las demás, en lo que respecta a su valor esperado. Por ende, este



contraste es primordial en el análisis de los resultados experimentales, los cuales, el interés principal es comprar los resultados de los tratamiento o factores con respecto a las variables de interés (Dagnino S, 2014)

El análisis de los datos se realizó con Statgraphics Centurion 19. Para realizar el análisis ANOVA se emplea un modelo completamente al azar que presenta un nivel de confianza de 95% y nivel de significancia de  $p < 0,05$  para todas las pruebas. Todos los datos experimentales se presentan como media  $\pm$  DE y se utilizó la prueba de Tukey para comparar las medias.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se llevaron a cabo las pruebas y mediciones en el proceso de tostado, las cuales validarán el buen funcionamiento y cumplimiento de las buenas prácticas en las etapas de fabricación.

### Carga base experimental

Se determino la cantidad óptima de ajonjolí que el equipo puede procesar de manera eficiente sin comprometer la calidad del tostado cargando el equipo con volúmenes de 8, 10, 15 y 20 libras de producto (4,5-7.5 y 10 Kg), sin embargo, se hace la salvedad que la maquina podría procesar mayor volumen de producto.

### Temperatura

Las temperaturas y tiempos alcanzados para un tostado optimo se relaciona en la tabla 2.

**Tabla 2**  
*Volumen (Libras), Temperatura y Tiempo de tostado*

VOLUMEN DE TOSTADO (LIBRAS) HUMEDAD							
8		10		15		20	
°C	Tiempo min	°C	Tiempo min	°C	Tiempo min	°C	Tiempo min
130	20	130	22	130	40	130	40
137	22	136	24	133	42	131	42
145	24	144	26	140	44	132	44
150	26	155	28	144	46	138	46
157	28	162	30	149	48	148	48
162	30	168	32	152	50	152	50
170	32	171	34	155	52	157	52
171	34	164	36	162	54	161	54
165	36	164	38	168	56	163	56
		160	40	173	58	168	58
				178	60	174	60
						181	62

A partir de la tabla 2, se puede decir que depende del tipo de máquina de tostar, del tiempo de tueste y de la intensidad de color requerido. En una primera fase, el ajonjolí pierde humedad. Esta parte del proceso es la que influye menos en el gusto final. En una segunda fase, se origina la expansión de la semilla de ajonjolí y empieza la creación de los gases. La tercera fase es la más lenta, pues es la que confiere el sabor final al producto. Un descuido en la elevación de temperatura del proceso aumenta la velocidad de tostado provocando un cambio de propiedades de la semilla. De igual manera, al disminuir la temperatura aumenta considerablemente el tiempo de calentamiento de la semilla, produciendo un efecto de cocción, sin llegar al grado de tostadura. (Rodríguez Lucas, 2011)

En la tabla 2 los recuadros resaltados con el color naranja indican la temperatura y el tiempo óptimo de tostado para esa cantidad de ajonjolí, así como el tiempo en que la temperatura de trabajo fue alcanzada (franja amarilla), sin embargo, la determinación de un intervalo de funcionamiento óptimo para el proceso de tostado sólo en términos de tiempo y temperatura de tostado no es un procedimiento altamente reproducible porque los datos variarán según el tipo de tostador y la escala del proceso. (Kahyaoglu & Kaya, 2006a)

Si bien, para todas las pruebas se logra apreciar la diferencia de temperatura para alcanzar un tostado óptimo, durante las pruebas se observó que al llegar a una temperatura de 160-180°C se estabilizaba el tostado requerido, así mismo, cabe destacar que durante los primeros 7 minutos se daba un precalentamiento en la máquina de tostado, y 2 minutos de llenado de volumen a tostar.

La diferencia de temperatura también se puede explicar dado que, el calor se distribuye y difunde más rápidamente en un menor volumen de producto. Cuando se tostan pequeñas cantidades, las semillas alcanzan la temperatura óptima de tostado más rápidamente. Por el contrario, al tostar un mayor volumen de semillas, el calor tarda más en penetrar uniformemente en todo el producto, lo que puede provocar una diferencia de temperatura o un choque térmico en los primeros minutos del proceso. Este comportamiento se correlaciona con los principios básicos de transferencia de calor en los procesos de tostado y cocción, donde la densidad del producto y la cantidad afectan la eficiencia con la que el calor se transfiere a través de las semillas. (Berk et al., 2021; Soto Fonseca & Vargas Ramirez, 2007)

### **Color**

El color es uno de los parámetros utilizados para controlar el proceso de tostado, ya que los pigmentos marrones aumentan a medida que avanzan las reacciones de pardeamiento y caramelización (Kahyaoglu & Kaya, 2006b; Moss & Otten, 1989).

La tabla ANOVA descompone la varianza de L, A y B en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de grupos. La razón-F, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro de grupos. Puesto que el valor -P de la prueba -F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de las variables entre un nivel de muestra y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

**Tabla 3***Promedio Variable L,A y B Tostado ajonjolí 8L*

TOSTADO AJONJOLI 8 LIBRAS						
COLOR						
Muestras	L	D.E	A	D.E	B	D.E
Muestra # 3	27.3	±0,49	2.77	±0,13	7.30	±0,37
Muestra # 4	29.9		3.13		8.80	
Muestra # 5	22.3		2.17		5.50	
Muestra # 6	24.5		3.37		8.10	
Muestra # 7	24.9		3.93		9.33	
Muestra # 8	63.3		9.07		21.40	
Muestra # 9	48.5		6.00		11.47	

**Tabla 4***Tabla ANOVA para L por Muestra 8L*

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor -P
Entre grupos	4324,78	6	720,796	748,60	0,0000
Intra grupos	13,48	14	0,962857		
Total (Corr.)	4338,26	20			

**Tabla 5***Tabla ANOVA para A por Muestra 8L*

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor -P
Entre grupos	104,592	6	174,321	297,62	0,0000
Intra grupos	0,82	14	0,0585714		
Total (Corr.)	105,412	20			

**Tabla 6***Tabla ANOVA para B por Muestra 8L*

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor -P
Entre grupos	493,89	6	823,149	198,92	0,0000
Intra grupos	579,333	14	0,41381		
Total (Corr.)	499,683	20			

**Tabla 7***Promedio Variable L,A y B Tostado ajonjolí 10L*

TOSTADO AJONJOLI 10 LIBRAS					
COLOR					
Muestras	L	D. E	A	D. E	B
Muestra # 1	20.70	±0,49	1.9	±0,11	4.53
Muestra # 2	25.43		2.93		7.27
Muestra # 3	25.97		2.73		7.40
Muestra # 4	25.90		3.57		8.70
Muestra # 5	24.77		3.47		8.20
Muestra # 6	24.40		3.97		8.57
Muestra # 7	24.30		4.10		8.93

**Tabla 8***Tabla ANOVA para L 10L por muestras*

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor -P
Entre grupos	586,295	6	97,7159	13,23	0,0000
Intra grupos	10,32	14	0,738571		
Total (Corr.)	689,695	20			

**Tabla 9***Tabla ANOVA para A 10L por muestras*

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor -P
Entre grupos	921,333	6	153,556	37,50	0,0000
Intra grupos	0,573333	14	0,0409524		
Total (Corr.)	978,667	20			

**Tabla 10***Tabla ANOVA para B 10L por muestras*

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor -P
Entre grupos	414,448	6	69,0746	27,27	0,0000
Intra grupos	354,667	14	0,253333		
Total (Corr.)	449,914	20			

**Tabla 11***Promedio Variable L,A y B Tostado ajonjolí 15L*

TOSTADO AJONJOLI 15 LIBRAS						
COLOR						
Muestras	L	D. E	A	D. E	B	D.E
Muestra # 3	40.87	±0,72	4.13	±0,23	11.40	±0,52
Muestra # 4	32.57		2.90		7.43	
Muestra # 5	31.07		6.90		7.43	
Muestra # 6	29.67		3.20		6.53	
Muestra # 7	30.07		3.73		7.60	
Muestra # 8	30.47		4.07		8.00	
Muestra # 9	28.30		3.83		6.77	

**Tabla 12***Tabla ANOVA para L 15L por muestras*

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor -P
Entre grupos	314,671	6	52,4452	32,90	0,0000
Intra grupos	22,32	14	1,59429		
Total (Corr.)	336,991	20			

**Tabla 13***Tabla ANOVA para A 15L por muestras*

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor -P
Entre grupos	308,914	6	51,4857	29,95	0,0000
Intra grupos	240,667	14	0,171905		
Total (Corr.)	332,981	20			

**Tabla 14***Tabla ANOVA para B 15L por muestras*

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor -P
Entre grupos	478,057	6	79,6762	9,90	0,0002
Intra grupos	112,667	14	0,804762		
Total (Corr.)	590,724	20			

**Tabla 15***Promedio Variable L,A y B Tostado ajonjolí 20L*

TOSTADO AJONJOLI 20 LIBRAS						
COLOR						
Muestras	L	D. E	A	D. E	B	D. E
Muestra # 3	57.90	±0,90	5.20	±0,18	14.03	±0,57
Muestra # 4	61.23		6.27		16.90	
Muestra # 5	57.23		6.10		15.30	
Muestra # 6	63.73		7.33		19.77	
Muestra # 7	52.70		7.07		15.23	
Muestra # 8	47.83		6.47		13.10	
Muestra # 9	49.53		7.33		13.13	

**Tabla 16***Tabla ANOVA para L 20L por muestras*

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor -P
Entre grupos	633,736	6	105,623	43,07	0,0002
Intra grupos	34,333	14	24,523		
Total (Corr.)	668,07	20			

**Tabla 17***Tabla ANOVA para A 20L por muestras*

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor -P
Entre grupos	10,816	6	1,802	18,38	0,0000
Intra grupos	13,733	14	0,980952		
Total (Corr.)	12,189	20			

**Tabla 18***Tabla ANOVA para B 20L por muestras*

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor -P
Entre grupos	100,906	6	16,817	17,15	0,0000
Intra grupos	13,726	14	0,980476		
Total (Corr.)	114,632	20			

Los datos analíticos de los colores de las semillas de sésamo utilizando un espectrofotómetro indicaron que la temperatura y el tiempo de tostado cambiaban significativamente el color de las semillas de sésamo tostadas y que en todas las muestras hay una diferencia significativa tanto de forma grupal como entre muestras como lo indican los valores de -P.

Así mismo se observó que los valores de L aumentan y disminúan significativamente con el tiempo de tostado a cada temperatura, lo que indica que las semillas están adquiriendo un color más claro, lo cual puede suceder al inicio del tostado debido a la pérdida de humedad superficial. Sin embargo, a medida que el tostado avanza, el valor de L tiende a disminuir por el oscurecimiento debido a reacciones de Maillard y caramelización, por lo que a altas temperaturas como 150 y 180°C, se necesita menos tiempo para generar un color más oscuro comparable a una temperatura relativamente baja pero un tostado más prolongado. Esto se puede deber a que el bajo contenido de humedad, la desnaturalización de las proteínas y la cantidad concentrada de partículas de aceite incrustadas en la matriz proteica podrían originar un oscurecimiento durante

el tostado del sésamo (Kahyaoglu & Kaya, 2006b). Datos parecidos se obtuvieron en (Kahyaoglu & Kaya, 2006a).

Los valores de A aumentaron significativamente con el incremento de la temperatura y el volumen de tostado ( $P < 0,05$ ), lo que indicó el aumento del enrojecimiento atribuido a la formación de pigmentos parduscos a través del pardeamiento no enzimático y la degradación de fosfolípidos, datos parecidos se observan en el estudio de (He et al., 2023). Los valores de B representan un cambio hacia tonos más cálidos o amarillos, típico de productos tostados. Esto puede estar asociado a transformaciones químicas en los compuestos de color naturales del ajonjolí o al desarrollo de pigmentos durante el tostado. La mayor temperatura de tostado y el mayor tiempo de exposición dieron lugar a valores a y b más elevados, lo cual indica pardeamiento, característicos de los productos tostados. (Kahyaoglu & Kaya, 2006a)

El color visual de las semillas de sésamo cambia de pálido, amarillo claro, amarillo, marrón claro y marrón oscuro, con el aumento de la temperatura y el tiempo de tostado, esto como ya se ha mencionado se debe al pardeamiento que se genera por la reacción de Maillard y a la reacción de caramelización durante el tostado. Los tratamientos térmicos pueden degradar macromoléculas biológicas, proporcionando así numerosos precursores y sustancias intermedias para la reacción de Maillard. Así pues, es razonable esperar que el color del sésamo se deba principalmente a dicha reacción durante el tostado de las semillas (Guo et al., 2023), el cual proporciona la energía suficiente para romper los enlaces covalentes existentes en las macromoléculas, produciendo monosacáridos, oligosacáridos, péptidos y aminoácidos, que son compuestos clave que intervienen esta reacción de pardeamiento, por lo que se potencia el color. (Wang et al., 2021)

## Humedad

**Tabla 19**  
*Humedad Volumen Tostado Ajonjolí*

HUMEDAD			
TOSTADO 8L	TOSTADO 10L	TOSTADO 15L	TOSTADO 20L
2.097	3.074	5.776	3.195
2.362	2.239	2.69	3.175
2.831	2.508	2.754	2.882
1.864	1.957	2.789	3.107
2.245	1.85	2.786	5.804
2.245	2.215	2.745	3.085
3.605	1.603	2.689	2.982

Teniendo en cuenta los resultados evidenciados en la tabla número 19 y la humedad inicial del ajonjolí 10%, se puede decir que el tostado reduce significativamente el contenido de humedad presente en el ajonjolí, obteniendo un porcentaje de humedad relativa en un rango de 1.6 – 5.8 con diferencias decimales para todos los volúmenes de tostado. El resultado del análisis estadístico mostró que la temperatura de tostado era el principal factor que afectaba al contenido de humedad.

Durante el tostado, la humedad se reduce significativamente, lo que puede influir en la estabilidad oxidativa del aceite presente y en la resistencia del producto a la contaminación microbiana y enzimática durante su almacenamiento. Según Kahyaoglu & Kaya, (2006b) los cambios en la humedad de las semillas de sésamo muestran un descenso pronunciado hasta los 40 minutos de tostado. La temperatura afecta significativamente a la eliminación de humedad durante el proceso de tostado por lo que la pérdida de humedad fue más rápida a medida que aumentaba la temperatura de tostado.

Aunque, se entiende como contenido de humedad de la semilla el valor expresado en porcentaje (en base húmeda) de la masa del agua en relación con la masa total. Esta última es la suma del agua y de los sólidos constituyentes, por lo que durante el tostado cada una de las semillas cede su calor al aire que lo rodea, al inicio, la humedad de la superficie de la semilla se transfiere fácilmente al aire. Y a medida que transcurre el tostado se inicia una migración de agua desde el interior al exterior para sustituir la humedad perdida en la superficie (difusión). El aumento de la temperatura origina un aumento de la presión de vapor de agua, el cual es eliminado. (Rodríguez Lucas, 2011)

Kahyaoglu & Kaya, (2006c) obtuvo resultados similares en la remoción del contenido de humedad de las semillas de sésamo durante el tostado a 120, 150 y 180 C en función del tiempo de tostado, donde los cambios en la humedad de las semillas de sésamo mostraron una disminución pronunciada hasta los 40 min de tiempo de tostado así mismo (Salamatullah et al., 2021) obtuvieron contenidos de humedad parecidos.

### Acidez y pH

El pH en las semillas de ajonjolí se evalúa principalmente como un indicador de estabilidad y calidad, particularmente en estudios de procesamiento y almacenamiento. Las tablas de ANOVA indican  $-P < 0.05$  lo que indica diferencia significativa en los volúmenes tostados. El %Acidez se mantuvo para todos los volúmenes en 0.0564.

**Tabla 20**

*Valores pH y Acidez volumen 8L*

TOSTADO AJONJOLI 8 LIBRAS		
PH		Acidez %
Promedio	Desv. esta	
5.931	0.00282843	0.0564
5.874	0.00141421	
5.879	0.00282843	
5.7315	0.00636396	
5.885	0.0212132	
5.5875	0.00636396	
5.796	0.04525483	

**Tabla 21***Tabla ANOVA pH 8L*

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor -P
Entre grupos	0,21905	6	0,036508	42,29	0,0000
Intra grupos	0,012087	14	0,00086338		
Total (Corr.)	0,23114	20			

**Tabla 22***Valores pH y Acidez volumen 10L*

TOSTADO AJONJOLI 10 LIBRAS		
pH		Acidez %
Promedio	Desv. esta	
6.738	0.01838478	0.0564
6.051	0.03959798	
6.255	0.0311127	
6.029	0.00848528	
5.461	0.0523259	
5.7265	0.00212132	
5.794	0.04808326	

**Tabla 23***Tabla ANOVA pH 10L*

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor -P
Entre grupos	2,999	6	0,49998	688,52	0,0000
Intra grupos	0,010166	14	0,0007261		
Total (Corr.)	3,010	20			

**Tabla 24***Valores pH y Acidez volumen 15L*

TOSTADO AJONJOLI 15 LIBRAS		
pH		Acidez %
Promedio	Desv. esta	
5.7775	0.00212132	0.0564
5.897	0.00707107	
5.9485	0.05444722	
5.885	0.00424264	
5.8525	0.02333452	
5.618	0.00707107	
5.6895	0.0106066	

**Tabla 25***Tabla ANOVA pH 15L*

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor -P
Entre grupos	0,25986	6	0,043311	161,95	0,0000
Intra grupos	0,00374	14	0,00026742		
Total (Corr.)	0,26361	20			



**Tabla 26***Valores pH y Acidez volumen 20L*

TOSTADO AJONJOLI 20 LIBRAS		
pH		Acidez %
Promedio	Desv. esta	
5.7365	0.00070711	0.0564
5.766	0.00282843	
5.8185	0.07848885	
5.771	0.03394113	
5.782	0.0311127	
5.782	0.00565685	
5.751	0.00848528	

**Tabla 27***Tabla ANOVA pH 20L*

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor -P
Entre grupos	0,012297	6	0,0020496	3,42	0,0272
Intra grupos	0,00839	14	0,000599		
Total (Corr.)	0,020690	20			

Este análisis permite evaluar cambios en el pH que podrían reflejar procesos químicos durante el almacenamiento o el tostado, como la oxidación de lípidos o descomposición de proteínas. Por ejemplo, el proceso de tostado puede alterar el pH debido a reacciones químicas inducidas por el calor. Aun cuando el análisis ANOVA indica que hay diferencias significativas entre las muestras y entre grupos, el rango de pH de 5.4 a 6.7 es típico de las semillas de ajonjolí, ya que corresponde a su composición natural de proteínas y compuestos fenólicos, los cuales mantienen propiedades ligeramente ácidas a neutras. Después del tostado, el pH se mantiene en este rango porque las reacciones químicas no generan compuestos significativamente ácidos ni alcalinos, como podría suceder si el tostado fuera demasiado prolongado o intenso. Esto también se correlaciona con la eliminación de humedad y posibles microorganismos que podrían alterar el pH. (Arab et al., 2022)

Durante el tostado, las grasas y aceites presentes en las semillas de ajonjolí se ven afectadas por reacciones como la oxidación térmica y la hidrólisis. Sin embargo, en condiciones óptimas de tostado, el proceso puede limitar la formación de ácidos grasos libres, lo que explica el bajo porcentaje de acidez (0.0564%). Esto sugiere un tostado adecuado que evita la degradación excesiva de los lípidos, preservando la calidad del aceite extraído. El control preciso del tiempo y la temperatura en el proceso de tostado es clave para mantener estas propiedades, evitando deterioros que podrían afectar tanto el perfil sensorial como la estabilidad química de las semillas.

## Contenido de Ceniza

**Tabla 28**

*Porcentaje ceniza ajonjolí tostado 8L*

TOSTADO DE AJONJOLI 8 LIBRAS	
% Ceniza	
Promedio	Desv. esta
5.32%	0.002
5.38%	0.000
5.40%	0.001
5.43%	0.001
5.31%	0.001
5.37%	0.000
5.62%	0.002

**Tabla 29**

*Tabla ANOVA %Ceniza 8L*

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor -P
Entre grupos	0,18582	6	0,030970	1,52	0,2413
Intra grupos	0,2846	14	0,020328		
Total (Corr.)	0,47042	20			

**Tabla 30**

*Porcentaje ceniza ajonjolí tostado 10L*

TOSTADO AJONJOLI 10 LIBRAS	
Cenizas	
Promedio	Desvesta
4.03%	0.000
4.09%	0.003
4.06%	0.002
4.02%	0.001
4.06%	0.000
4.24%	0.003
4.38%	0.003

**Tabla 31**

*Tabla ANOVA %Ceniza 10L*

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor -P
Entre grupos	0,32397	6	0,053995	2,21	0,1036
Intra grupos	0,34164	14	0,0224403		
Total (Corr.)	0,66561	20			

**Tabla 32***Porcentaje ceniza ajonjolí tostado 15L*

TOSTADO AJONJOLI 15 LIBRAS	
Cenizas	
Promedio	Desvesta
5.60%	0.000
5.32%	0.001
5.41%	0.002
5.56%	0.002
5.55%	0.000
5.47%	0.003
5.63%	0.001

**Tabla 33***Tabla ANOVA %Ceniza 15L*

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor -P
Entre grupos	0,22468	6	0,0374482	2,44	0,0793
Intra grupos	0,21482	14	0,015344		
Total (Corr.)	0,43951	20			

**Tabla 34***Porcentaje ceniza ajonjolí tostado 20L*

TOSTADO AJONJOLI 20 LIBRAS	
Cenizas	
Promedio	Desvesta
11.42%	0.099
4.68%	0.000
4.79%	0.001
5.60%	0.012
4.86%	0.002
4.77%	0.001
4.85%	0.001

**Tabla 35***Tabla ANOVA %Ceniza 20L*

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor -P
Entre grupos	110,151	6	18,358	2,60	0,0663
Intra grupos	98,989	14	70,706		
Total (Corr.)	209,14	20			

El análisis del contenido de ceniza en el ajonjolí se realiza para determinar su contenido total de minerales. Este análisis es una medida del residuo inorgánico que queda después de quemar completamente la materia orgánica presente en las semillas. El porcentaje de ceniza obtenido para los diferentes volumen se encuentra entre 4-5.6% lo cual indica que estas semillas tienen una proporción relativamente alta de minerales inorgánicos esenciales, reflejando su valor nutricional. Este rango es consistente con lo reportado en literatura científica sobre las semillas de ajonjolí procesadas. De igual manera, el ANOVA indica que no hay diferencias significativas entre las muestras y grupos analizados.

Kanu, (2011) en su estudio observó que el contenido de cenizas era significativamente diferente ( $p < 0,05$ ) entre dos colores 6,10 y 4,32% para semilla ajonjolí negra y blanca, respectivamente. Ozcan y Akgul (1995) reportaron valores de cenizas entre 3.67 y 5.39% para semillas de ajonjolí turcas y de variedades extranjeras (mexicanas, ugandesas y venezolanas), lo que corrobora los datos obtenidos en este estudio.

## CONCLUSIONES

El tostado es una de las etapas más importantes del procesado de las semillas de sésamo, por lo que desarrollar un sistema automatizado permitió optimizar variables críticas como la temperatura, el tiempo y la humedad durante el proceso de tostado del ajonjolí. Esto resultó en una mejora significativa en la eficiencia energética y calórica del proceso, así como en la calidad del producto final. Las pruebas realizadas arrojaron que la temperatura óptima para el tostado de ajonjolí se encuentra entre 160°C y 180°C, con un tiempo de tostado que varía entre 40 y 60 minutos para grandes volúmenes de producto. Estas condiciones aseguran una distribución del calor más uniforme, lo que se traduce en un secado eficiente y homogéneo de las semillas.

Las pruebas demostraron que el tostado bajo condiciones controladas no solo mejora el sabor y el aroma del ajonjolí, sino que también ayuda a preservar sus propiedades nutricionales. Además, se observó que, al aumentar la temperatura y el tiempo de tostado, el contenido de humedad de las semillas de sésamo disminuyó, mientras que para pH, acidez y contenido de ceniza no hubo gran variación con respecto a lo que dice la teoría, pues estos se mantuvieron dentro de los rangos teóricos. Así mismo, la máquina tostadora al poseer unas aspas giratorias permite obtener un tueste homogéneo mediante el giro y un flujo constante de aire caliente proveniente del quemador.

Finalmente, el uso de sensores y controladores automatizados en la máquina de tostado permitió un monitoreo preciso y continuo de las variables críticas por lo que este sistema automatizado es una mejora significativa para la producción industrial del ajonjolí.

## REFERENCIAS

- Arab, R., Casal, S., Pinho, T., Cruz, R., Freidja, M. L., Lorenzo, J. M., Hano, C., Madani, K., & Boulekbache-Makhlouf, L. (2022). Effects of Seed Roasting Temperature on Sesame Oil Fatty Acid Composition, Lignan, Sterol and Tocopherol Contents, Oxidative Stability and Antioxidant Potential for Food Applications. *Molecules*, 27(14).  
<https://doi.org/10.3390/molecules27144508>
- Berk, E., Aktağ, I. G., & Gökmen, V. (2021). Formation of  $\alpha$ -dicarbonyl compounds and glycation products in sesame (*Sesamum indicum* L.) seeds during roasting: a multiresponse kinetic modelling approach. *European Food Research and Technology*, 247(9).  
<https://doi.org/10.1007/s00217-021-03787-x>
- Dagnino S, J. (2014). ANÁLISIS DE VARIANZA. *Bioestadística y Epidemiología*, 43, 306–310.  
<https://revistachilenadeanestesia.cl/PII/revchilanestv43n04.07.pdf>
- Guo, Q., Jin, L., Guan, M. C., Xu, S., Wang, C. X., Liu, M. W., & Liu, H. M. (2023). Investigations on color and flavor formed by roasting sesame polysaccharide-protein mixtures. *Food Research International*, 163.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112118>
- He, S., Pan, T., Zhang, Z., Wu, Y., Sun, H., Ma, Y., & Zhang, Y. (2023). Interactive effect of hot air roasting processes on the sensory property, allergenicity, and oil extraction of sesame (*Sesamum indicum* L.) seeds. *Grain and Oil Science and Technology*, 6(2).  
<https://doi.org/10.1016/j.gaost.2023.02.001>
- Kahyaoglu, T., & Kaya, S. (2006a). Determination of optimum processing conditions for hot-air roasting of hulled sesame seeds using response surface methodology. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(10). <https://doi.org/10.1002/jsfa.2509>
- Kahyaoglu, T., & Kaya, S. (2006b). Modeling of moisture, color and texture changes in sesame seeds during the conventional roasting. *Journal of Food Engineering*, 75(2), 167–177.  
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.011>
- Kanu, P. J. (2011). Biochemical Analysis of Black and White Sesame Seeds from China. *American Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 1(2), 145–157.  
<https://doi.org/10.3923/ajbmb.2011.145.157>
- Moss, J. R., & Otten, L. (1989). A Relationship Between Colour Development and Moisture Content During Roasting of Peanuts. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 22(1). [https://doi.org/10.1016/s0315-5463\(89\)70298-4](https://doi.org/10.1016/s0315-5463(89)70298-4)
- Rodríguez Lucas, L. Fernando. (2011). *Diseño de una maquina tostadora de ajonjolí de 40kg/h de capacidad* [Proyecto de grado, Escuela Politécnica Nacional].  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4014/3/CD-3782.pdf>

- Salamatullah, A. M., Alkaltham, M. S., Uslu, N., Özcan, M. M., & Hayat, K. (2021). The effects of different roasting temperatures and times on some physicochemical properties and phenolic compounds in sesame seeds. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(3). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15222>
- Soto Fonseca, S. R., & Vargas Ramirez, Jennifer. (2007). *UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONÓMA DE NICARAGUA TEMA*. <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/handle/123456789/2624?mode=full>
- Wang, F., Shen, H., Liu, T., Yang, X., Yang, Y., & Guo, Y. (2021). Formation of pyrazines in maillard model systems: Effects of structures of lysine-containing dipeptides/tripeptides. *Foods*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/foods10020273>