

Tlapuato, Gto, a 12 de julio del 2018.

M. en I. HERIBERTO GUTIÉRREZ MARTÍN
JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE-

Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empestado de tesis y titulación al alumno(a) Cristina García Mosqueda del Programa de Maestría en Biotecnología y cuyo número de NUA es: 169086 del cual soy director. El título de la tesis es: Diseño y evaluación de tratamientos postcosecha asistidos con microondas para desinfestación de maíz.

Hago constar que he revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.

ATENTAMENTE


Dra. María Elena Sosa Morales
NOMBRE Y FIRMA
DIRECTOR DE TESIS
SECRETARIO

NOMBRE Y FIRMA
DIRECTOR DE TESIS


Dr. Manuel Darío Los Araujo
NOMBRE Y FIRMA
PRESIDENTE


Dr. Abel Cerón García
NOMBRE Y FIRMA
VOCAL



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
DIVISIÓN DE CIENCIAS DE LA VIDA

MAESTRÍA EN BIOCIENCIAS

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS
POSTCOSECHA ASISTIDOS CON MICROONDAS PARA
DESINFESTACIÓN DE MAÍZ**

T E S I S

**QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER
EL GRADO DE:
MAESTRA EN BIOCIENCIAS**

**PRESENTA:
CRISTINA GARCÍA MOSQUEDA**

**DIRECTORA:
DRA. MARÍA ELENA SOSA MORALES**

Irapuato, Gto, México

Julio 2018.

La tesis fue realizada en la División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato, con el apoyo de CONACYT y dirigida por la Dra. María Elena Sosa Morales.

AGRADECIMIENTOS

- A la Dra. María Elena Sosa Morales, mi directora de tesis, por haberme permitido ser parte de su equipo de trabajo, por su confianza y por el apoyo brindado durante la realización del trabajo de tesis. Por compartir parte de sus conocimientos conmigo y por ser un excelente ser humano.
- A el Dr. Abel Cerón García y Dr. Manuel Darío Salas Araiza, por ser parte de mi comité de tesis, por todo el apoyo, conocimientos compartidos y por tener siempre la disponibilidad para apoyarme.
- A CONACYT por la beca otorgada, para realizar los estudios de maestría.
- A la Universidad de Guanajuato y a todos los profesores que compartieron sus conocimientos, experiencia y apoyo durante esta etapa de mi vida.
- A mis compañeros de generación por su amistad y apoyo en esta etapa en donde compartimos muchas experiencias.
- A mis compañeros de laboratorio por su amistad, apoyo, tiempo y conocimientos compartidos.

RESUMEN

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos más importantes del mundo, tanto para la alimentación humana como animal, la producción de almidón, jarabes y biocombustible; sin embargo, las pérdidas postcosecha alcanzan del 10-20% del volumen de producción, debido principalmente al ataque de insectos. Entre las plagas que atacan al maíz, destaca durante el almacenamiento la palomilla dorada de los granos *Sitotroga cerealella* (Lepidoptera: Gelechiidae). Tradicionalmente, los productos químicos se emplean con fines de desinfestación, pero se han restringido recientemente debido a su impacto negativo en la salud y el medio ambiente. Existen otros métodos alternativos y ambientalmente amigables, como los tratamientos térmicos, que incluyen calentamiento dieléctrico (microondas y radiofrecuencia). El objetivo de este trabajo fue diseñar y aplicar tratamientos postcosecha de microondas para maíz blanco contra *S. cerealella*. Se aplicaron niveles de potencia de 293, 390 y 475 W a lotes de 250 g de maíz hasta alcanzar la temperatura objetivo de 50°C (122°F) en el centro del grano y se mantuvo durante 3 min, seguido por enfriamiento con aire forzado durante 3.5 min. Se dejó un lote de maíz como control sin tratamiento. Se utilizaron termopares para la medición de temperatura en el centro de los granos e imágenes térmicas fueron tomadas para evaluar la uniformidad del calentamiento. Los tiempos de calentamiento fueron de 56, 40 y 37 s, para 293, 390 y 475 W, respectivamente, durante los cuales se alcanzó el 100% de mortalidad en larvas de cuarto estadio ($p < 0.05$). La calidad del maíz blanco tratado se midió en función de la capacidad de germinación ($95 \pm 5\%$), el contenido de humedad ($11.99 \pm 0.03\%$ en peso), la dureza (136.285 ± 11.162 N), la densidad (788 ± 2.05 kg/m³) y color ($L^* = 69.36 \pm 0.93$; $a^* = 1.76 \pm 0.5$; $b^* = 25.20 \pm 0.89$). El tratamiento con 475 W y 37 s fue el más eficaz para la desinfestación postcosecha del maíz, sin afectar la calidad de los granos tratados.

Palabras clave: Calentamiento dieléctrico, maíz, *Sitotroga cerealella*, microondas.

ABSTRACT

Corn (*Zea mays* L.) is one of the most important crops in the world, for both human and animal feeding, starch and syrup production and bio-fuel; however, its post-harvest losses reach 10-20% of the production volume, mainly due to insects. Among the pests that attack corn, grain golden moth *Sitotroga cerealella* (Lepidoptera: Gelechiidae) is distinguished during storage. Traditionally, chemicals fumigants have been employed with disinfestation purposes, but they have been recently restricted because of their negative impact in the human health and the environment. There are other eco-friendly alternative methods, which include dielectric heating (microwave and radio frequency). The objective of this work was to design and apply microwave post-harvest treatments for white corn against *S. cerealella*. Power levels of 293, 390 and 475 W were applied to the batches of 250 g of corn until reach the target temperature of 50°C (122°F) in the grain center and held for 3 min, followed by air-forced cooling during 3.5 min. One batch of corn was left as a control without treatment. Thermocouples were employed to measure the temperature in the center of the grain, and thermal images were taken to evaluate the heating uniformity. Heating times were 56, 40 and 37 s, for 293, 390 and 475 W, respectively. Under these conditions, 100% of mortality in fourth-instar larvae was achieved ($p < 0.05$). The quality of treated white corn was followed throughout germination ability ($95 \pm 5\%$), moisture content ($11.99 \pm 0.03\%$ w.b.), hardness (136.285 ± 11.162 N), density (788 ± 2.05 kg/m³) and color ($L^* = 69.36 \pm 0.93$; $a^* = 1.76 \pm 0.5$; $b^* = 25.20 \pm 0.89$) of the white corn. The treatment with 475 W and 37 s was the most effective for the post-harvest disinfestation of corn, without affecting the quality of treated grains.

Keywords: Dielectric heating, *Sitotroga cerealella*, corn, microwave.

ÍNDICE GENERAL

	Pag
ÍNDICE DE CUADROS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	ii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	2
2. 1 Maíz	2
2.1.1 Definición	2
2.1.2 Antecedentes e importancia	2
2.2 Razas de maíz	3
2.2.1 Grupo Cónico o razas de las partes altas del centro de México	4
2.3. Poscosecha en granos	6
2.4. Principales plagas postcosecha en el maíz	7
2.4.1.1 <i>Sitotroga cerealella</i>	7
2.4.1.1.1 Hospederos	8
2.4.1.1.2 Distribución	8
2.4.1.1.3 Daños	8
2.4.1.1.4 Biología y morfología	8
2.4.1.1.5 Ciclo de vida	8
2.4.1.1.6 Factores meteorológicos	9
2.5 Tratamientos postcosecha	12
2.5.1 Prácticas alternativas a la fumigación con Bromuro de Metilo	12
2.6. Microondas (MW) y Radiofrecuencia (RF)	13
2.6.1 Principios de calentamiento por Microondas (MW) y Radiofrecuencia (RF).	14
2.6.2. Estudios de desinfestación con calentamiento dieléctrico en productos secos.	16
2.7 Calentamiento diferencial	18
2.8 Propiedades dieléctricas	19

	Pag.
III. JUSTIFICACIÓN	21
IV. OBJETIVOS	22
Objetivo general	22
Objetivos específicos	22
V. HIPÓTESIS	22
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	
6.1 Material biológico	23
6.2 Caracterización del maíz	23
6.2.1 Determinación de color	23
6.2.2 Dureza	24
6.2.3 Actividad de agua	24
6.2.4 Humedad	25
6.2.5 Densidad	25
6.2.6 Germinación	26
6.3 Cálculo de Potencia de Salida del Horno de Microondas	26
6.4 Curva de Calentamiento	27
6.5 Desarrollo de la Curva de Enfriamiento	27
6.6 Infestación del maíz	28
6.7. Tratamiento con microondas	30
6.8 Uniformidad del calentamiento	32
6.9 Mortalidad del insecto	33
6.10 Propiedades fisicoquímicas	35
6.11 Análisis estadístico	36
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
7.1 Caracterización del maíz	37
7.2 Calibración del horno de microondas	38
7.3 Curvas de calentamiento	39

	Pag.
7.4 Curva de enfriamiento	40
7.5 Uniformidad del calentamiento	42
7.5.1 Coeficiente de variación	42
7.5.2 Imágenes térmicas	43
7.6 Mortalidad de la palomilla (<i>Sitotroga cerealella</i>) con el tratamiento de microondas.	48
7.7. Caracterización posterior al tratamiento.	51
7.7.1. Humedad	51
7.7.2 Actividad de agua	52
7.7.3. Densidad	53
7.7.4. Dureza	54
7.7.5. Color	55
7.7.6. Germinación	56
VIII. CONCLUSIONES	59
IX. LITERATURA CITADA	61

ÍNDICE DE CUADROS

	Pag.
Cuadro 1. Efecto de las distintas temperaturas en los insectos.	11
Cuadro 2. Frecuencias asignadas por la FCC para uso industrial, científico y médico.	13
Cuadro 3. Propiedades dieléctricas de maíz blanco a diferentes temperaturas y frecuencias de microondas.	20
Cuadro 4. Caracterización físico-química y de germinación de maíz blanco.	37
Cuadro 5. Humedad de maíz después del tratamiento con las tres potencias y el testigo durante el tiempo de almacenamiento.	51
Cuadro 6. Actividad de agua de maíz después del tratamiento con las tres potencias y el testigo durante el tiempo de almacenamiento.	53
Cuadro 7. Densidad (kg/m^3) de maíz después del tratamiento con las tres potencias y el testigo durante el tiempo de almacenamiento.	53
Cuadro 8. Dureza (N) de maíz después del tratamiento con las tres potencias y el testigo durante el tiempo de almacenamiento.	54
Cuadro 9. Color de maíz después del tratamiento con las tres potencias y el testigo durante el tiempo de almacenamiento.	55
Cuadro 10. Germinación de maíz después del tratamiento con las tres potencias y el testigo durante el tiempo de almacenamiento.	56

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. <i>Sitotroga cerealella</i> . Fotografía Clemson University. USDA Cooperative Extension Slide Series, www.Bugwood.org	7
Figura 2. Espectro electromagnético. Adaptado de: www.leditgrow.cl .	14
Figura 3. Color Flex EZ (modelo CFE20483 Hunter Lab, Estados Unidos) y espacio de color (CIELAB).	23
Figura 4. Analizador de textura (TA-XT2, Estados Unidos).	24
Figura 5. Aqua Lab, modelo CX2, Estados Unidos.	25
Figura 6. Germinador Easygreen Modelo (220v/50Hz)	26
Figura 7. Horno de microondas LG, modeloMs-0745vs	27
Figura 8. Maíz en proceso de infestación con <i>Sitotroga cerealella</i>	28
Figura 9. Maíz infestado con <i>Sitotroga cerealella</i> .	29
Figura 10. Mezcla de maíz sano y maíz infestado.	30
Figura 11. Tratamiento a maíz en horno de microondas LG, modelo Ms-0745vs.	31
Figura 12. Verificación de temperatura de calentamiento.	32
Figura 13. Enfriamiento de maíz con aire forzado.	33
Figura 14. Verificación de temperatura de enfriamiento de maíz.	34
Figura 15. Sistema para captura de imágenes térmicas en tratamientos.	35
Figura 16. Microscopio estereoscopio (marca Zeiss, modelo Stemi DV4, Alemania).	36
Figura 17. Maíz tratado con microondas y quebrado para recuperar las larvas de <i>S. cerealella</i> .	39

Figura 18. Larvas de <i>S. cerealella</i> recuperadas después del tratamiento.	35
Figura 19. Almacenamiento de maíz en recipientes de plástico. (a). Maíz sin tratamiento (testigo), (b) maíz tratado a 475 W, (c) maíz tratado a 390 W y (d) maíz tratado a 293 W.	36
Figura 20. Calibración del horno de microondas	39
Figura 21. Curvas de calentamiento de maíz a potencias de 50, 70 y 90 % de la potencia máxima del horno.	40
Figura 22. Curva de enfriamiento de maíz.	41
Figura 23. Tratamientos con microondas en maíz, A. Tiempo (s) de calentamiento para llegar a 50°C de acuerdo a la potencia, B. Tiempo de retención (3 min) y C. Tiempo de enfriamiento (3.5 min).	42
Figura 24. Coeficiente de variación de las temperaturas en el centro de los granos de maíz tratados a los tres niveles de potencia estudiados.	43
Figura 25. Imagen térmica de maíz a temperatura ambiente	44
Figura 26. Imagen térmica de maíz después del tratamiento a 90 %	45
Figura 27. Imagen térmica de maíz después del tratamiento a 70 %	46
Figura 28. Imagen térmica de maíz después del tratamiento a 50 %	47
Figura 29. Grano de maíz sano (a) y maíz infestado (b)	50
Figura 30. Maíz infestado y quebrado para recuperar las larvas de <i>Sitotroga cerealella</i> .	51
Figura 31. Larvas de <i>Sitotroga cerealella</i> recuperadas de los granos de maíz.	52
Figura 32. Germinación de granos de maíz.	57
Figura 33. Germinación de granos de maíz en las tres diferentes potencias. a) 90%, b) 70% y c) 50%.	57

I. INTRODUCCIÓN

La conservación de los granos después de ser cosechados presentan un desafío a nivel mundial, debido a que durante el transporte y principalmente en el almacenamiento, se generan pérdidas cuantitativas y cualitativas en diversas proporciones. Las pérdidas poscosecha de los granos en el mundo son provocadas principalmente por consecuencia de la manipulación inadecuada, el deterioro y las plagas (FAO, 2012).

El maíz es uno de los granos mas importantes a nivel mundial, ya que es base de la alimentación de gran parte de la población y materia prima para ingredientes y biocombustibles, sin embargo existen cuantiosas pérdidas poscosecha, debidas principalmente a plagas; la palomilla dorada de los cereales (*Sitotroga cerealella*) es la plaga de mayor importancia económica que lo afecta durante el almacenamiento (García *et al.*, 2010), por lo que es necesario realizar acciones para garantizar la conservación poscosecha de los granos.

Existen diversos métodos para la eliminación de insectos (desinfestación) en los productos, los cuales se clasifican como térmicos: refrigeración, agua, aire y vapor caliente y calentamiento dieléctrico (microondas o radiofrecuencia) y no térmicos (físicos, químicos y biológicos). Los usados con mayor frecuencia son los productos químicos, por la facilidad y accesibilidad de los mismos. Entre estos productos destacan los derivados del bromuro, los cuales a partir del año 2015 deben dejar de ser aplicados de acuerdo al Protocolo de Montreal, por el daño generado al medio ambiente y los residuos que dejan en los productos (Wang y Tang, 2001). Por ello, es necesario utilizar métodos que sean realmente efectivos y seguros para la desinfestación, entre los que se han propuesto, el calentamiento dieléctrico (microondas y radiofrecuencia).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2. 1 Maíz

2.1.1 Definición

El maíz (*Zea mays* L.) es un pasto de la familia botánica Poaceae. La planta de maíz tropical es alta, con abundantes hojas y un sistema radical fibroso, normalmente con un solo tallo que tiene hasta 30 hojas. Algunas veces se desarrollan una o dos yemas laterales en la axila de las hojas en la mitad superior de la planta; éstas terminan en una inflorescencia femenina la cual se desarrolla en una mazorca cubierta por hojas que la envuelven; ésta es la parte de la planta que almacena reservas. La parte superior de la planta termina en una inflorescencia masculina o panoja; esta tiene una espiga central prominente y varias ramificaciones laterales con flores masculinas, las que producen abundantes granos de polen (FAO,1993).

2.1.2 Antecedentes e importancia

El maíz es un producto milenario cuyo cultivo se remonta a la época prehispánica y hasta el momento sigue siendo el cultivo de mayor presencia en México; su cultivo se originó mediante el proceso de domesticación que llevaron a cabo los antiguos habitantes de Mesoamérica, a partir de los teocintles, gramíneas muy similares al maíz, que crecen de manera natural principalmente en México y en parte de Centroamérica. Se considera que las poblaciones de teocintle del centro de México o los que crecen en el trópico seco de la Cuenca del Balsas, pudieron ser los ancestros de los cuales se domesticó el maíz como planta cultivada (Biodiversidad Mexicana, 2012). El maíz es el alimento básico de muchos países africanos y latinoamericanos (CIMMYT, 2012), incluyendo México. Desde diferentes puntos de vista alimenticio, ganadero, económico y social, es uno de los productos más importantes del país (SIAP, 2008).

El cultivo del maíz en México se hace actualmente en un amplio rango de altitud y variación climática, desde el nivel del mar hasta los 3,400 msnm. Se siembra en zonas tórridas con escasa precipitación, en regiones templadas, en las faldas de las altas montañas, en ambientes muy cálidos y húmedos, en escaso suelo, en pronunciadas laderas o en amplios valles fértiles, en diferentes épocas del año y bajo múltiples sistemas de manejo y desarrollo tecnológico (CONABIO, 2011; Hernández, 1985).

México es el centro del origen del maíz, aquí se concentra la mayor diversidad de todo el mundo, han evolucionado y se encuentran los parientes silvestres, los teocintles y otras gramíneas relacionadas, como el *Tripsacum* conocido como maicillos (Biodiversidad Mexicana, 2012).

El maíz es uno de los cereales más cultivados en el mundo (Nuss y Tanumihardjo, 2010), Estados Unidos es el principal productor a nivel mundial con 353,699,441 toneladas anuales y México el séptimo productor con 22,663,953 toneladas anuales, aportando el 2.2% de la producción mundial de este grano. En México este grano es el más importante por la superficie sembrada, por el valor de la producción, por ser el alimento principal de la población y por ocupar el 20 % de la población económicamente activa. En 2014 se sembraron 7,600,000 hectáreas, con una producción de 24,694,000 toneladas y tiene una participación del 86.1% de la producción de cereales. Guanajuato es el sexto productor a nivel nacional con 1,361,922 toneladas al año (SIAP, 2016).

2.2 Razas de maíz

El maíz como cultivo es un sistema dinámico y continuo. Su polinización es libre ya que hay movimiento o flujo de semilla año con año. A diferencia de las plantas silvestres, esto dificulta la distinción de unidades discretas para clasificar su diversidad. Se han seleccionado las principales unidades (tipos o formas) que le caracterizan, a las que se ha denominado razas (Biodiversidad Mexicana, 2012). Anderson y Cutler (1942) definen la raza como un grupo de individuos relacionados

con suficientes características en común para permitir su reconocimiento como grupo.

Las razas de maíz se nombran a partir de distintas características fenotípicas (cónico, por la forma de la mazorca), tipo de grano (reventador, por la capacidad del grano para explotar y producir palomitas), por el lugar o región donde inicialmente fueron colectadas o son relevantes (Tuxpeño de Tuxpan, Veracruz; Chalqueño, típico del valle de Chalco) o por el nombre con que son conocidas por los grupos indígenas o mestizos que las cultivan (Zapalote Chico en el Istmo de Oaxaca o Apachito en la Sierra Tarahumara). El Centro Orígenes de Cultivo y Diversificación (COD), menciona que alrededor de 59 razas de maíz con miles de variedades comprenden el 60% de la diversidad genética del maíz en el mundo (Ruiz-Corral *et al.*, 2008). Las razas de maíz en México se han agrupado, con base en caracteres morfológicos, de adaptación y genéticos en siete grupos o complejos raciales (Ruiz-Corral *et al.*, 2008; Sánchez *et al.*, 2000). Las siete razas son: cónico, sierra de Chihuahua, ocho hileras, chapalote, tropicales precoces, dentados tropicales y maduración tardía.

2.2.1 Grupo Cónico o razas de las partes altas del centro de México

El grupo Cónico incluye razas de maíz cuya característica resaltante es la forma cónica o piramidal de sus mazorcas: Arrocillo, Cacahuacintle, Cónico, Cónico Norteño, Chalqueño, Dulce, Elotes Cónicos, Mixteco, Mushito, Mushito de Michoacán, Negrito, Palomero de Jalisco, Palomero Toluqueño y Uruapeño (Sánchez *et al.*, 2000).

Las razas del grupo Cónico se distribuyen predominantemente en las regiones con elevaciones de más de 2,000 msnm (Sánchez, 2011) y en su mayoría son endémicas a los valles altos y sierras del centro del país: el Valle de México, el Valle de Toluca, la Sierra Norte de Puebla, la Meseta Purhépecha en Michoacán y la Mixteca Alta en Oaxaca. La raza Cónico Norteño, derivada de Cónico del centro, es básicamente la que da a este grupo una distribución amplia por su cultivo en la

zona semiárida templada del centro norte del país; y hacia el sur prevalecen las razas Chalqueño, Cónico, Mixteco y Mushito.

Las razas de este grupo, tienen en común mazorcas de forma cónica, números altos de hileras de grano, entre 14 y 20; granos de 4 a 8 mm de ancho con textura variable, desde harinosos hasta palomeros, número reducido de ramas de la espiga, sistema de raíces débiles, hojas caídas y vainas de las hojas fuertemente pubescentes con la presencia de antocianinas (Sánchez, 2011).

El grupo Cónico es uno de los más característicos y endémicos de México (Sánchez *et al.*, 2000). Sus razas son la base de la producción en zonas agrícola del centro del país, y se destinan a diferentes usos alimenticios, como producción de tortilla, tamales, antojitos, pozoles, palomitas, entre otros. A la importancia económica del grano se asocia el aprovechamiento de subproductos de la planta como la hoja para tamal y la planta entera para forraje.

En la zona de cultivo de las razas del grupo Cónico se distribuyen de manera natural poblaciones de teocintle, muchas veces asociadas a los campos de cultivo de maíz, principalmente en el Valle de Toluca, el oriente y sur del Valle de México y la región central de Puebla. Los teocintles que crecen en esta región corresponden, en su mayoría, a la subespecie *Zea mays* spp. mexicana raza Chalco (Sánchez *et al.*, 2008).

Las razas del grupo Cónico presentan similitudes morfológicas con los teocintles de la raza Chalco en el tipo de planta, pubescencia y coloración rojiza en las vainas de las hojas (Kato, 1996; Wilkes, 1977), así como cercanía genética con teocintles de la raza Balsas –*Zea mays* ssp. *parviglumis*- (van Handerwaagen, 2011). Esta similitud morfológica dificulta diferenciar los teocintles del maíz, en los terrenos de cultivo donde confluyen en sus primeras etapas de crecimiento. En algunos lugares se le llega a considerar a los teocintles como maleza, no obstante también representan una importante fuente de forraje y de flujo genético con el maíz (Kato, 1996; Sánchez *et al.*, 2008).

Durante siglos, en México y América del Sur se han desarrollado nuevas variedades que se adaptan a las condiciones locales, así como a las necesidades culturales y culinarias (González *et al.*, 2015).

México es el principal productor de maíz blanco en el mundo. Asimismo, éste es el cultivo más importante del país ya que representa aproximadamente el 35% de la superficie sembrada durante un año agrícola, tanto para cultivos cíclicos como perennes. Además, se consumen anualmente alrededor de 20 millones de toneladas métricas (SIAP, 2016).

El maíz blanco debe cumplir la seguridad alimentaria, pues tiene como principal destino el consumo humano, el cual se transforma para la elaboración de insumos para alimentos, ya sea a través de la nixtamalización para generar masa o bien por medio de la deshidratación y molienda para obtener harina, y posteriormente todos sus derivados (SAGARPA, 2016).

2.3. Postcosecha en granos

La postcosecha es el periodo transcurrido desde la recolección de los productos en el campo hasta que son consumidos en estado fresco o son utilizados en un proceso de preproducción o transformación (FAO, 2012).

En general, se puede decir que los controles fitosanitarios destinados a los granos almacenados son similares a los métodos empleados en los cultivos. Existen varios métodos de control: el legislativo, el mecánico, el físico, el químico y el biológico (que es muy poco usado). El control legislativo incluye la cuarentena y la sanidad. La cuarentena comprende las prohibiciones o restricciones impuestas al transporte de los granos almacenados que se suponen están infestados por plagas. La sanidad se refiere a las medidas de higiene que se deben tomar para disminuir o eliminar los insectos. Tales medidas comprenden la cosecha en la época adecuada, la utilización de equipos desinfectados, la limpieza cuidadosa de los granos y de los depósitos, los almacenes bien tapados y a prueba de roedores y pájaros, y el cuidado de no mezclar productos de distintas cosechas (FAO, 1993).

La amplitud de las pérdidas en los granos limita el alcance para el aumento en la producción de alimentos. Existen diversos factores bióticos y abióticos, causantes de pérdidas en la producción y almacenamiento del maíz a nivel mundial (Pingali, 2001). Entre los factores bióticos se encuentra a los microorganismos e insectos; los abióticos son físicos, químicos y mecánicos; en conjunto estos factores representan pérdidas que varían entre 70 y 95% de la cosecha cuando las condiciones de cultivo y almacenamiento son deficientes (Feíto *et al.*, 2015).

2.4. Principales plagas poscosecha en el maíz

Las plagas causan pérdidas superiores al 10% durante la producción y de 10 a 20% en poscosecha en el maíz. Las principales plagas que afectan el grano durante el almacenamiento, son la palomilla dorada de los granos (*Sitotroga cerealella*), ubicada en las regiones templadas y altas (Figura 1); el barrenador grande del grano (*Prostephanus truncatus*), localizado en las regiones de transición y altas, y el gorgojo del maíz (*Sitophilus zeamais*), en las regiones tropicales y subtropicales. Algunas plagas que aparecen con menor frecuencia son: *Plodia interpunctella*, *Tribolium castaneum*, *Rhyzopertha dominica*, *Cathartus quadriollis*, *Cryptolestes ferrugineus*, entre otras (Feíto *et al.*, 2015).

2.4.1.1 *Sitotroga cerealella*



Figura 1. *Sitotroga cerealella*. Fotografía Clemson University. USDA Cooperative Extension Slide Series, www.Bugwood.org

2.4.1.1.1 Hospederos

Causa daños tanto en campo como en almacenes, utiliza como hospedantes granos de trigo, maíz, cebada, centeno, sorgo, judías y garbanzo (Pérez y Pacheco, 2002).

2.4.1.1.2 Distribución

Es un insecto cosmopolita, es decir se distribuye a nivel mundial y es capaz de atacar a los granos tanto en campo como durante el almacenamiento (Moreira y Maldonado 1986).

2.4.1.1.3 Daños

Esta plaga daña principalmente granos de cereales. Es capaz de atacar en campo cuando el grano ya tiene cierta consistencia. En bodega, el daño se localiza en la superficie de los granos (SENASA, 2010).

2.4.1.1.4 Biología y morfología

La etapa de huevo dura en promedio 4.5 días. La fase de larva dura 23.4 días y presenta cuatro estadios con diferente duración (7.3, 5, 6.9 y 4.2 días, para el 1°, 2°, 3° y 4° estadio, respectivamente). En la etapa de pupa se tiene una duración en promedio 7.7 días, pudiendo prolongarse hasta los 9 días. El adulto vive alrededor de 4 a 10 días y la hembra puede vivir hasta 1.5 días más que el macho en la mayoría de los casos. La hembra deposita hasta 202 huevos (Moreira y Maldonado, 1986).

2.4.1.1.5 Ciclo de vida

Huevo. De color blanco, tornándose rojizo a medida que se desarrolla el embrión. El cambio de color inicia en promedio a los 2.32 días. La superficie es reticulada y mide aproximadamente 0.56 mm de longitud y 0.25 mm de ancho (Pérez y Pacheco, 2002).

Larva. Es elateriforme (cilíndrica, alargada y fina con tres pares de patas torácicas cortas) de color blanco lechoso con tamaño promedio de 0.73 mm a la emergencia hasta 5.7 mm antes de pupar. Su cuerpo está seccionado en doce segmentos, con algunos flecos alrededor del cuerpo y los ocelos espaciados a cada lado. Tiene seis patas verdaderas y ocho falsas (Pérez y Pacheco, 2002).

Pupa. Antes que la larva pupa se interrumpe su desarrollo y sufre ciertos cambios, como la reducción de su tamaño, su color se torna oscuro y deja de alimentarse. A este proceso se le llama prepupa. La pupa es obovada de color café oscuro brillante y su tamaño se ve reducido midiendo aproximadamente 4.7 mm de longitud (Pérez y Pacheco, 2002).

Adulto. El cuerpo está recubierto de escamas brillantes color dorado, posee una antena filiforme un poco más pequeña que el cuerpo. Tiene palpos labiales prominentes, curvados hacia arriba. Las alas son un poco más largas que el cuerpo, recubiertas de escamas, las alas anteriores son más pequeñas que las posteriores y el margen anterior está cubierto de escamas oscuras. Posee ojos compuestos. La hembra se diferencia del macho por la forma y tamaño del abdomen, la hembra tiene el abdomen redondo y mide 5.1 mm de longitud y 1 mm de ancho, mientras que el abdomen del macho es cuadrado y mide 4.4 mm de longitud y un milímetro de ancho (Pérez y Pacheco, 2002). El número promedio de huevos en cautiverio puestos por cada hembra es de 79 (Moreira y Maldonado, 1986).

2.4.1.1.6 Factores meteorológicos

Como es sabido las plagas no se manifiestan siempre con la misma intensidad ya que se encuentran sometidas a la influencia de factores ambientales como humedad, temperatura, luminosidad, etc., que condicionan su desarrollo. Durante mucho tiempo se ha desconocido el papel de la humedad en los estudios sobre plagas de almacén, y la variable usada era la temperatura media (FAO, 1985).

Actualmente, los estudios se han encaminado a determinar el crecimiento natural de la población por semana o por mes. Para ello se tiene en cuenta la

humedad relativa ambiente, los umbrales de temperatura, el contenido de agua del grano, entre otros (FAO, 1985).

- Umbrales de desarrollo.

a) Mínimo 15° C con 75 % de humedad relativa.

b) Máximo 35° C con 75 .% de humedad relativa.

- Óptimo desarrollo.

A 30° C con 60 % de humedad relativa.

- Supervivencia.

No evoluciona cualquiera que sea la temperatura si la humedad relativa es menor del 30 %.

Sometida a 60° C muere en todos los estados.

- Ciclo evolutivo.

A 15°C con 75 % de humedad relativa, 60 días.

A 20°C con 75 % de humedad relativa, 35 días.

Huevo a 15°C, 15 días; a 30°C, 4 días.

Las condiciones ideales para la mayoría de insectos asociados a productos de almacén son de 25-30 °C y una humedad relativa de 65-75 %. Por encima y por debajo de estas condiciones el crecimiento de insectos y su movilidad se ven reducidos, y en condiciones extremas el insecto muere (Fields *et al.*, 1992).

En general, la mayoría de los insectos asociados a productos almacenados se pueden controlar mediante la combinación de temperaturas y tiempos. 24 h a 40°C. En el Cuadro 1 se muestra el efecto de la temperatura en insectos.

Cuadro 1. Efecto de las distintas temperaturas en los insectos
(Adaptada de Fields *et al.*, 1992).

Zona	Temperatura (°C)	Efecto que produce
Letal	Por encima de 62	Muerte en menos de 1 minuto
	Entre 50 y 62	Muerte en menos de 1 hora
	Entre 45 y 50	Muerte en menos de un día
	Entre 35 y 45	Los insectos buscan lugares más frescos. La población se mueve
Subóptima	35	Temperatura máxima que permite la reproducción
	Entre 32 y 35	El crecimiento de la población se reduce
Óptima	Entre 25 y 32	Máximo crecimiento de la población
Subóptima	Entre 13 y 25	El crecimiento de la población se reduce
Letal	Entre 5 y 13	Muerte lenta
	Entre 3 y 5	El movimiento se para
	Entre -10 y -5	Muerte en semanas o meses si hay aclimatación
	Entre -25 y -15	Muerte en menos de 1 hora.

2.5. Tratamientos postcosecha

Durante la historia de la humanidad, las plagas de insectos en productos almacenados, han sido toleradas. Sin embargo, dos eventos llevaron al desarrollo de métodos postcosecha para eliminar los insectos: el aumento de los viajes de los seres humanos que provoco que tales insectos hayan sido transportados a nuevas áreas y la evolución de la tecnología agrícola para almacenar productos para consumo futuro o transportar a distintos mercados para obtener ganancias económicas (Hansen *et al.*, 2011).

Existen diversos métodos para la eliminación de insectos (desinfestación) en los productos, los cuales se clasifican como térmicos: refrigeración, agua, aire y vapor caliente y calentamiento dieléctrico (microondas o radiofrecuencia) y no térmicos (físicos, químicos y biológicos).

El grano de maíz, frecuentemente, es infestado por varios insectos al ser almacenado, causando graves pérdidas económicas (Moreno-Martínez *et al.*, 2000). La palomilla dorada de los granos (*Sitotroga cerealella*), es una de las principales plagas en granos almacenados (Cavalho *et al.*, 2012; Fragoso *et al.*, 2005). Los productos químicos, han sido ampliamente utilizados por la facilidad y accesibilidad de los mismos. Las fumigaciones con bromuro de metilo (BrMe) han sido ampliamente utilizadas para controlar plagas de insectos. Cada vez hay más preocupación por el uso de químicos en productos agrícolas ya que son perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana (Bulathsinghala y Shaw, 2014), el Protocolo de Montreal ha ordenado la eliminación gradual del uso fitosanitario de bromuro de metilo en postcosecha, en los países en desarrollo a partir de 2015 (USEPA, 2001). Por lo anterior los tratamientos fitosanitarios no químicos, son necesarios como alternativa a los fumigantes (Li *et al.*, 2015).

2.5.1 Prácticas alternativas a la fumigación con Bromuro de Metilo

Las alternativas a la fumigación con bromuro de metilo deben ser seguras y eficaces, no debe reducir la calidad del producto, vida de almacenamiento o

comercialización, deben ser ambientalmente aceptables y económicamente factibles. Algunas aplicaciones requieren un tratamiento relativamente rápido, ya sea para el tratamiento de grandes volúmenes de producto o para satisfacer las necesidades de mercados específicos. Aunque se han planteado diferentes alternativas, la mayoría de ellas requieren tiempos de tratamiento prolongados, cambios extensos en los procesadores para el manejo de producto o gasto sustancial de capital (Hansen *et al.*, 2011).

Los métodos de tratamiento térmico usando agua caliente, vapor, aire caliente, microondas (MW) y radio frecuencia (RF) han sido investigados ampliamente como alternativas de fumigación con bromuro de metilo para la desinfestación en productos agrícolas. Las plagas de insectos en estos productos pueden ser controlados por calor, pero diversos métodos de tratamiento térmico producen diferentes velocidades de calentamiento y por lo tanto, diferentes distribuciones de temperatura final en los productos tratados, lo cual genera variación en la eficacia (Tang y Wang, 2007).

2.6 Microondas (MW) y Radiofrecuencia (RF)

Las microondas (300-300,000 MHz) y ondas de radiofrecuencia (0.003-300 MHz) forman parte del espectro electromagnético (Metaxas y Meredith, 1993).

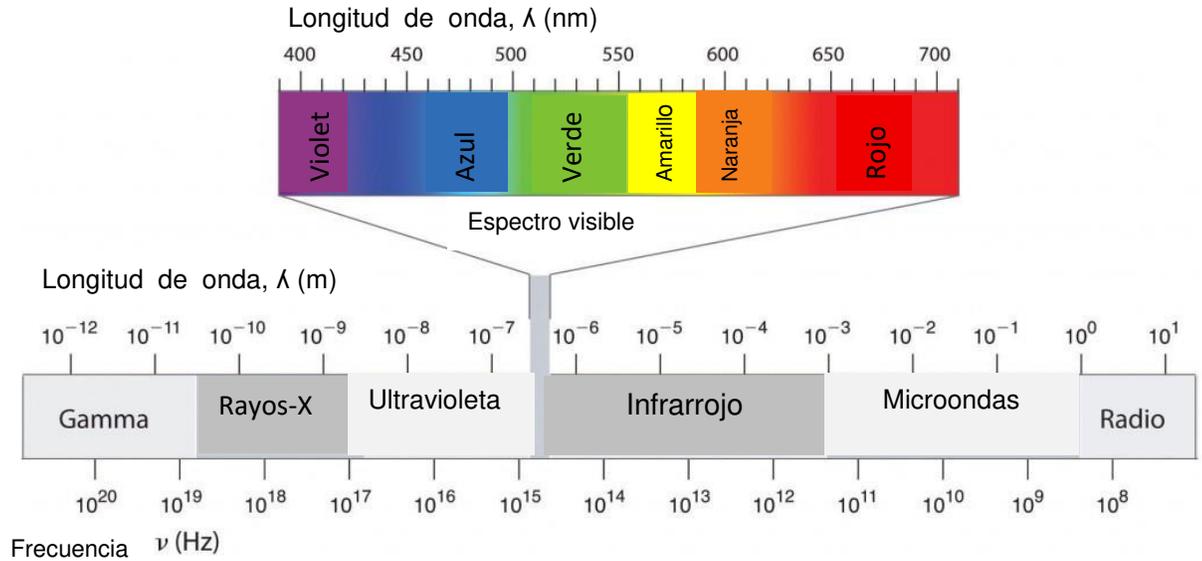


Figura 2. Espectro electromagnético. Adaptado de: www.leditgrow.cl

2.6.1 Principios de calentamiento por Microondas (MW) y Radiofrecuencia (RF).

En el calentamiento generado por MW y RF, llamado calentamiento dieléctrico, el calor es generado dentro de los productos por fricción molecular en alta frecuencia alternando campos eléctricos. Comparado con métodos convencionales (conducción y convección), es un calentamiento volumétrico y rápido (por radiación). Las frecuencias asignadas por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) para los efectos de calentamiento se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Frecuencias asignadas por la FCC para uso industrial, científico y médico (Adaptada de FDA, 2000).

	Frecuencia
Radio frecuencia	13.56 MHz \pm 6.68 kHz
	27.12 MHz \pm 160.00 kHz
	40.68 MHz \pm 20.00 kHz
Microondas	915 MHz \pm 13 MHz
	2450 MHz \pm 50 MHz
	5800 MHz \pm 75 MHz
	24125 MHz \pm 125 MHz

El calentamiento dieléctrico ha sido usado anteriormente para el secado, horneado, descongelado de carnes, entre otros procesos en la industria de alimentos (Richardson, 2001).

Las propiedades dieléctricas son los principales parámetros que proporcionan información sobre como los materiales interactúan con la energía electromagnética durante el calentamiento dieléctrico. Dicho proceso de calentamiento es aplicado principalmente a materiales dieléctricos; los materiales dieléctricos tienen propiedades de conducción dieléctrica baja. Por lo que, sí existe pobre conducción dieléctrica hay pobre conducción térmica (Barber, 1983); esto conlleva a que hay baja transferencia de calor por métodos convencionales (conducción y convección) y un mayor tiempo de exposición al tratamiento. Por lo tanto, el tratamiento dieléctrico es efectivo para el calentamiento de materiales dieléctricos. Muchos productos alimenticios son materiales dieléctricos, por lo que existe un inmenso potencial de aplicación en la industria alimentaria. Estas propiedades han ganado gran importancia y aplicaciones para los alimentos que se

someten a nuevos tratamientos de calentamiento con microondas (MW) o radiofrecuencia (RF). El conocimiento de las propiedades dieléctricas, de un producto alimenticio, es fundamental con el fin de entender y modelar la respuesta al campo electromagnético en determinadas frecuencias y temperaturas (Sosa-Morales *et al.*, 2010).

Durante el calentamiento con MW ó RF los materiales dieléctricos, tales como los alimentos, son situados en un campo eléctrico alterno. En los alimentos, existen moléculas polares tales como el agua, y estas moléculas tienen dipolos eléctricos, con carga (+) y (-). Cuando se somete a un campo eléctrico, las moléculas polares rotan para alinearse en el campo. Las cargas positivas y negativas migran a diferentes extremos de las moléculas y esto conduce a la polarización. Si se coloca en un campo eléctrico alterno, la molécula polar gira continuamente para alinearse con el campo opuesto. Este fenómeno es conocido como rotación dipolar (Marra *et al.*, 2009). En este proceso, la fricción aumenta alrededor de las moléculas convirtiendo la energía de las ondas electromagnéticas en calor y da lugar al incremento de temperatura en el material (Buffler, 1993).

2.6.2 Estudios de desinfestación con calentamiento dieléctrico en productos secos.

Al tratar alimentos secos con MW ó RF ocurre un calentamiento diferencial: los insectos se calientan más rápidamente que los productos debido a mayor contenido de humedad, alcanzando su temperatura letal, mientras que las materias primas son calentadas a una temperatura más baja con la cual no hay pérdidas en la calidad del producto tratado (Wang *et al.*, 2007a).

Vadivambal *et al.*, (2007) determinaron la mortalidad de tres especies de insectos: *Tribolium castaneum*, *Cryptolestes ferrugineus* y *Sitophilus granarius* comúnmente encontrados en granos almacenados, utilizando un sistema de microondas (2450 MHz) en muestras de trigo (50 g cada uno) con una humedad de 14 %, 16 %, y 18 % (base húmeda). Los granos se infestaron con 5, 10 ó 15 insectos. Las muestras infestadas fueron expuestas a microondas usando cuatro

potencias 250, 300, 400, y 500 W durante tiempos de exposición de 28 y 56 s. La eliminación completa de los adultos de los tres especies y de las etapas post-embrionario de *T. castaneum* se logró a 500 W con un tiempo de exposición de 28 s. La mortalidad de los insectos aumentó con la potencia o el tiempo de exposición o en ambos casos. Sin embargo la germinación de los granos de trigo fue menor después del tratamiento con la energía de microondas.

Vadivambal *et.al.*,(2008) emplearon un secador industrial de microondas a 2450 MHz para desinfestar centeno, de *Tribolium castaneum* en todas las etapas de vida. El centeno se acondicionó a 14, 16 y 18% de contenido de humedad y se usaron muestras de 50 g para los experimentos. Los experimentos de mortalidad se realizaron a cuatro niveles de potencia: 200, 300, 400 y 500 W y a dos tiempos de exposición: 28 y 56 s. Los resultados de este estudio, mostraron que los huevos de *T. castaneum* fueron los más susceptibles y los adultos los menos susceptibles a la energía de microondas. No hubo diferencias significativas entre la mortalidad de las etapas fenologicas de vida de *T. castaneum* en 14, 16 y 18% de humedad del centeno. Asi mismo la germinación de centeno se redujo después del tratamiento con energía de microondas.

Vadivambal *et. al.*,(2010) utilizaron un sistema industrial de microondas a escala piloto a 2450 MHz para matar estadios larvarios y adultos de tres insectos en granos almacenados: *Sitophilus zeamais*, *Tribolium castaneum* y *Plodia interpunctella* en maíz a 14, 16 y 18% de contenido de humedad. Los experimentos de mortalidad fueron realizados en dos tiempos de exposición de 14 y 28 s, a niveles de potencia de 300, 400, 500 y 600 W. La mortalidad completa de larvas y adultos de *S. zeamais* y *T. castaneum* se obtuvo a 600 W en 14 s ó a 500 W durante 28 s, mientras que para larvas y adultos de *P. interpunctella*, el 100% de la mortalidad se obtuvo a 500 W durante 14 s ó a 400 W durante 28 s. La temperatura media de la superficie del maíz estuvo entre 52-55°C cuando se obtuvo la mortalidad de los tres insectos. La temperatura superficial del maíz después del calentamiento con microondas se midió usando una cámara infrarroja y se observó que la temperatura

no era uniforme. La germinación del maíz tratado disminuyó a medida que aumentó la potencia ó el tiempo de exposición ó en ambas condiciones.

Purohit *et al.*, (2013) realizaron estudios con frijol mungo o soya verde (*Vigna radiata*), para su desinfestación en las diferentes etapas fenológicas del gorgojo del frijol *Callosobruchus maculatus*, mediante el uso de microondas utilizando potencias de 200, 300 y 400 W durante 14, 28 y 42 s. Se logró el 100 % de la mortalidad de insectos para todas las etapas fenológicas (huevo, larva, pupa y adulto) con la exposición al nivel de potencia de 400 W por 28 s; causado una temperatura superficial de la judía mungo de 68.1 °C. Los huevos fueron los más susceptibles y los adultos los menos susceptibles a los tratamientos de microondas. La germinación de la leguminosa disminuyó con el aumento de la temperatura, nivel de potencia y el tiempo de exposición.

Patlán González (2015) realizó tratamientos con microondas en tres variedades de maíz: blanco, morado y azul, tratados a tres diferentes potencias 50, 70 y 100%, los cuales resultaron efectivos para la desinfestación de *Sitophilus zeamais* en maíz, logrando el 100% de la mortalidad de insectos adultos. Después de las pruebas físico-químicas realizadas y al comparar los resultados obtenidos de los tratamientos se observó que se lograron datos muy similares a los obtenidos entre el maíz tratado y el maíz testigo a excepción de la germinación que obtuvo mayor capacidad de germinación del maíz al ser tratado con la potencia del 100%, pero una disminución al ser tratado con las otras potencias (50 y 70%) debido al aumento de tiempo de exposición. El mejor tratamiento fue utilizando una potencia de 100% (490 W) con un tiempo de entre 35 y 40 s dependiendo de la variedad de maíz para un lote de 250 g.

2.7 Calentamiento diferencial

El calentamiento diferencial es la capacidad de calentar a las plagas a la temperatura letal, a un ritmo más rápido que el de los productos y ambos se calientan cuando son expuestos a RF ó MW. Esto se logra utilizando calentamiento dieléctrico, lo que proporciona una ventaja sobre otros mecanismos de

calentamiento. El producto tratado tiene menos daños en su calidad, y se reduce el tiempo y la temperatura de exposición al tratamiento, lo que permite una mayor conservación en almacenamiento (Wang *et al.*, 2003a).

Debido a que el calentamiento diferencial depende de la velocidad del mismo, que a su vez depende de variables tales como propiedades dieléctricas, capacidad térmica, densidad y otras características del producto y el insecto plaga, el primer paso para utilizar calentamiento dieléctrico debe ser el conocer los parámetros dieléctricos, tanto del producto como de la plaga (Nelson, 1991; Mason y Strait, 1998; Piyasena *et al.*, 2003).

2.8 Propiedades dieléctricas

Las características electromagnéticas de un material son los factores clave para la determinación del calentamiento dieléctrico y son parámetros esenciales para una simulación de los procesos de calentamiento dieléctrico. Las características electromagnéticas comprenden la permeabilidad y la permitividad (ϵ). Generalmente para la mayoría de los materiales dieléctricos, la permeabilidad tiene muy poca o nula contribución para el calentamiento dieléctrico y por lo tanto no es considerada (Zhang y Datta, 2001). Por lo tanto, la permitividad –la cual determina la constante dieléctrica (ϵ') y el factor de pérdida (ϵ'')– influye en el calentamiento con RF. Tanto ϵ' y ϵ'' , están dados por la ecuación 1:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

Donde: ϵ' es una característica de cualquier material y es una medida de la capacidad de un material para absorber, transmitir y reflejar la energía eléctrica de la porción del campo eléctrico y es una constante para el material a una frecuencia dada bajo condiciones constantes (Marra *et al.*, 2009).

$j = (-1)^{0.5}$. En dicha ecuación, ϵ' es el componente real, y es una medida de la capacidad del material para almacenar energía electromagnética; mientras que ϵ'' es el componente imaginario, y es una medida de la capacidad de disipar energía eléctrica en forma de calor (Alfaifi *et al.*, 2013).

Las propiedades dieléctricas de harinas de diversos cereales y granos como trigo, garbanzo, legumbres (guisantes verdes, lentejas y soya), se encuentran disponibles en diferentes estudios. Estas mediciones se realizaron en muestras con un amplio contenido de humedad, temperatura y una densidad equivalente a la de los respectivos granos/cereales; es así como dichos datos experimentales se pueden aplicar a los correspondientes granos/cereales para diversas aplicaciones, en particular en la poscosecha para el control de plagas (Bansal *et al.*, 2015).

Las propiedades dieléctricas del maíz también fueron reportadas por Torrealba-Meléndez *et al.* (2015) en el rango de microondas. En el Cuadro 3 se muestran dichos valores.

Cuadro 3. Propiedades dieléctricas de maíz blanco a diferentes temperaturas y frecuencias de microondas (Adaptado de Torrealba-Meléndez, *et al.*, 2015).

F (MHz)	Constante dieléctrica ϵ'					Factor de pérdida ϵ''				
	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C
915	3.81 ± 0	3.95 ± 0	4.01 ± 0	4.12 ± 0	4.23 ± 0	1.39 ± 0	1.33 ± 0	1.30 ± 0	1.27 ± 0	1.31 ± 0
2450	2.87 ± 0.01	3.25 ± 0	2.91 ± 0.02	3.52 ± 0.02	2.57 ± 0.04	0.72 ± 0	0.72 ± 0	0.72 ± 0	0.77 ± 0	0.68 ± 0
5800	2.46 ± 0.05	0.71 ± 0.01	2.68 ± 0.01	3.00 ± 0.01	3.32 ± 0.01	0.55 ± 0	0.60 ± 0	0.60 ± 0	0.70 ± 0	0.75 ± 0

III. JUSTIFICACIÓN

Las pérdidas poscosecha de maíz (*Zea mays* L.) en México representan cuantiosas pérdidas en la producción total las cuales van desde 10% en regiones secas, 10-20% en las regiones subtropicales y 20-40% en las regiones tropicales; esto debido a la presencia de insectos, principalmente *Sitotroga cerealella*. Esta palomilla debe ser eliminada utilizando tratamientos en los que no se empleen productos químicos, como el bromuro de metilo, debido a que éstos son potencialmente tóxicos, generan residuos en el producto y daños al medio ambiente. El calentamiento dieléctrico (microondas ó radiofrecuencia) es una alternativa segura y eficaz para la desinfestación de productos poscosecha ya que ofrece varias ventajas con respecto a tratamientos convencionales tales como, mayor rapidez en el calentamiento, por lo que los daños en el producto se reducen. La aplicación de microondas en maíz garantizaría la eliminación de *Sitotroga cerealella* y la calidad del maíz no se modificaría significativamente después del tratamiento aplicado.

IV. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar tratamientos térmicos postcosecha con microondas para la desinfestación de maíz banco *Zea mays. L.*, manteniendo la calidad del mismo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diseñar tratamientos con microondas contra la palomilla dorada de los granos (*Sitotroga cerealella*) utilizando diferentes potencias.
2. Determinar el índice de mortalidad de la palomilla (*Sitotroga cerealella*) con el tratamiento de microondas.
3. Analizar las propiedades fisicoquímicas y de germinación de los granos de maíz tratados.

V. HIPÓTESIS

La aplicación del tratamiento postcosecha con microondas permitirá eliminar la presencia de la palomilla dorada de los granos (*Sitotroga cerealella*) en el maíz sin modificar significativamente las características de calidad del mismo.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Material biológico

Se utilizó maíz blanco (nixtamalero) debido a que es uno de los más utilizados en México para la elaboración de tortillas y otros productos; dicha materia prima se adquirió por lotes, de la central de abastos de la ciudad de Irapuato, Gto.

6.2 Caracterización del maíz

El maíz se caracterizó realizando las pruebas fisicoquímicas que se describen a continuación.

6.2.1 Determinación de color

El equipo inicialmente se calibra con las placas blanca y negra. Las pruebas de color se realizaron por triplicado con 40 g de muestra, y utilizando un colorímetro Color Flex EZ (modelo CFE20483 Hunter Lab, Estados Unidos), midiendo en la escala L^* a^* b^* de CIELAB (Figura 3). El valor de L^* indica la luminosidad, a^* y b^* son las coordenadas cromáticas. Donde a^* = coordenadas rojo/verde (donde $+a$ indica rojo y $-a$ indica verde) y b^* = coordenadas amarillo/azul (donde $+b$ indica amarillo y $-b$ indica azul).

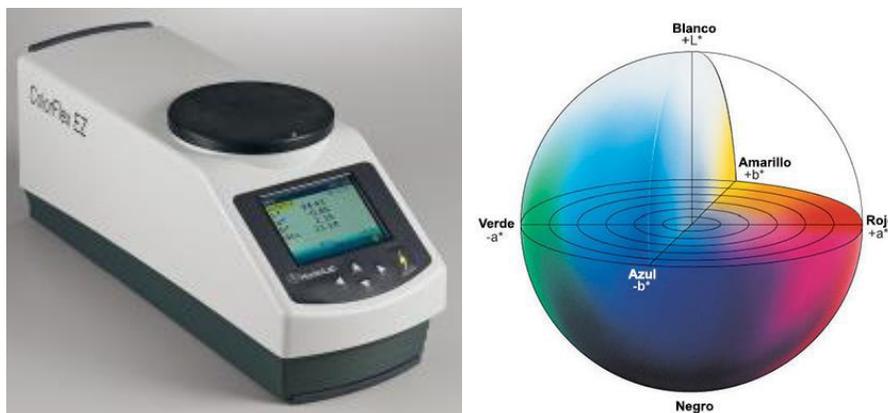


Figura 3 Color Flex EZ (modelo CFE20483 Hunter Lab, Estados Unidos) y espacio de color (CIELAB).

6.2.2 Dureza

La dureza se midió con un analizador de textura (TA-XT2, Stable Micro Systems, Estados Unidos) utilizando una sonda de metal, cónica con una penetración de 2 mm en uno de los granos de maíz y una velocidad de 2 m/s (Figura 4). Se realizaron 15 réplicas de la dureza y el resultado se reportó en Newton (Sánchez *et al.*, 2004).



Figura 4. Analizador de textura (TA-XT2, Estados Unidos)

6.2.3 Actividad de agua

La actividad de agua de una muestra de granos de maíz se midió en un termohigrómetro digital (Aqua Lab, modelo CX2, Estados Unidos). El equipo (Figura 5) se enciende 20 min para su acondicionamiento y posteriormente, se calibró con agua destilada. Los granos fueron parcialmente triturados en un mortero de porcelana con pistilo y se colocó la muestra en los portamuestras del equipo para la medición, la cual se realizó por triplicado.



Figura 5. Aqua Lab, modelo CX2, Estados Unidos.

6.2.4 Humedad

La humedad se determinó por triplicado, utilizando una cápsula de porcelana a peso constante, donde se colocó una muestra de 10 g de maíz en un horno de secado (Shel Lab, USA) a 100°C durante 24 h, de acuerdo al método oficial 925.10 (AOAC 2000).

Los cálculos de humedad se realizaron con la Ecuación 2:

$$\%Humedad = \frac{P_1 - P_2}{m} * 100 \quad (2)$$

Dónde:

P₁= peso de la cápsula con muestra antes de secada (g).

P₂= peso de la cápsula con muestra después de secada (g).

m= peso de la muestra (g).

6.2.5 Densidad

La densidad del maíz (ρ), se calculó con la relación $\rho = m/V$, donde m es la masa (g) y V es el volumen ocupado (cm³). La densidad se realizó por triplicado colocando los granos de maíz en una probeta de 500 mL (V=500 mL=500 cm³) y se tomó el peso de los granos contenidos (g) (Mohsenin, 1986).

6.2.6 Germinación

Para la germinación se utilizó un germinador (Figura 6) EasyGreen (modelo 220v/50Hz; Nevada, USA), donde se colocaron 20 granos de maíz (10 granos por charola). El temporizador se programó para realizar micro riegos cada 4 horas durante 6 días.



Figura 6. Germinador EasyGreen Modelo (220v/50Hz)

6.3 Cálculo de Potencia de Salida del Horno de Microondas

Se pesaron 350 mL de agua en un molde de plástico ideal para horno microondas. Se midió la temperatura inicial del agua y se introdujo al horno de microondas (LG, modelo Ms-0745vs, Figura 7) por 1 min con cada una de las potencias (10-100 %), y se midió su temperatura final con un multímetro digital (modelo 4C21, Taiwan). Se calculó la potencia real de salida (ecuación 3) de acuerdo al, Método IEC 60705 (Martin, 2008). Las pruebas se realizaron por duplicado.

$$P = \frac{Q}{t} = \frac{mC_p\Delta T}{t} \quad (3)$$

Dónde:

m= masa (g)

C_p = capacidad calorífica del agua (J/K).

ΔT = diferencia de temperaturas ($^{\circ}\text{C}$).

t = tiempo (s).



Figura 7. Horno de microondas LG, modelo Ms-0745vs

6.4 Curva de Calentamiento

Se pesaron 250 g de maíz. Se midió la temperatura inicial y posteriormente se introdujo al horno de microondas (marca LG, modelo Ms-0745vs) y se midió la temperatura en el centro de un grano utilizando un termómetro digital (Modelo CC-4052) cada 5 s. Se utilizaron las potencias 50, 70 y 90% de la potencia máxima del horno. La determinación se realizó por duplicado.

6.5 Desarrollo de la Curva de Enfriamiento

El lote de maíz tratado con microondas a las diferentes potencias, fue enfriado con aire forzado usando un ventilador (marca Mytek, modelo 3181, China), fue colocado a una distancia de 15 cm con una velocidad del aire de 3.2 m/s. Se midió la temperatura al inicio de la etapa de enfriamiento utilizando un termómetro digital (modelo CC-4052); fue monitoreada cada 30 s, hasta alcanzar la temperatura ambiente. La determinación de la curva de enfriamiento se realizó por duplicado.

6.6 Infestación del maíz

Con la finalidad de eliminar cualquier posible plaga en el maíz a tratar, este fue almacenado de manera secuencial, durante 24 h, tanto a -12° y 28° C. Posteriormente, se realizó la infestación colocando el maíz en recipientes de plástico (de volumen: 4 litros), se agregaron 20 adultos de *Sitotroga cerealella*, por cada kg de maíz; los recipientes se mantuvieron tapados con una tela tipo malla (Figura 8), a una temperatura de aproximadamente 28° C y humedad relativa de 75%; se monitoreó el proceso y se separaron los granos infestados a los 28 días.



Figura 8. Maíz en proceso de infestación con *Sitotroga cerealella*.

Para el tratamiento con microondas se pesaron 125 g de granos identificados como infestados (Figura 9) y se mezclaron con 125 g de maíz sano, es decir se trabajó con muestras con un 50% de infestación (Figura 10). Esta proporción de infestación se mantuvo constante para todos los tratamientos desarrollados en esta tesis.

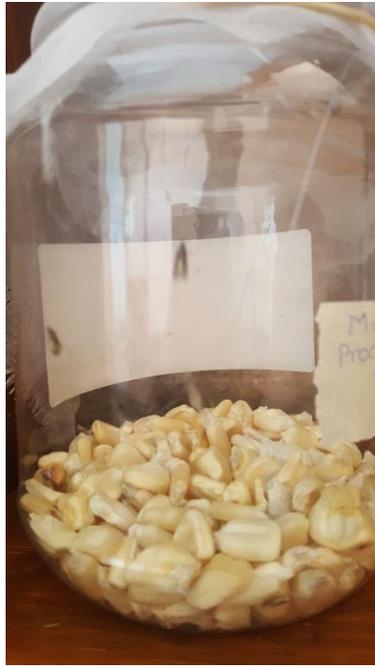


Figura 9. Maíz infestado con *S. cerealella*.



Figura 10. Mezcla de maíz sano y maíz infestado.

6.7. Tratamiento con microondas

Se diseñó un protocolo de calentamiento con microondas para generar una temperatura de 50°C en el interior del grano (temperatura a la cual mueren las larvas de *Sitotroga cerealella*), con 3 potencias distintas (50, 70 y 90 %) de la potencia máxima nominal proporcionada por el equipo de microondas y con un tiempo de calentamiento de 37, 40 y 56 s respectivamente (Figura 11); la temperatura se mantuvo durante 3 min para lograr la mortalidad total de las larvas (Figura 12). Después del calentamiento, el lote de granos tratados se sometió a enfriamiento por 3.5 min por medio de aire forzado con un ventilador (Mytek, modelo 3181) a una velocidad de 3.2 m/s (Figura 13) determinada con un anemómetro (PROVA, modelo AVR-07, Taiwan). La temperatura fue monitoreada (Figura 14) con un termómetro digital (Modelo CC-4052). Los experimentos se realizaron por duplicado.



Figura 11. Tratamiento a maíz en horno de microondas LG, modelo Ms-0745vs.

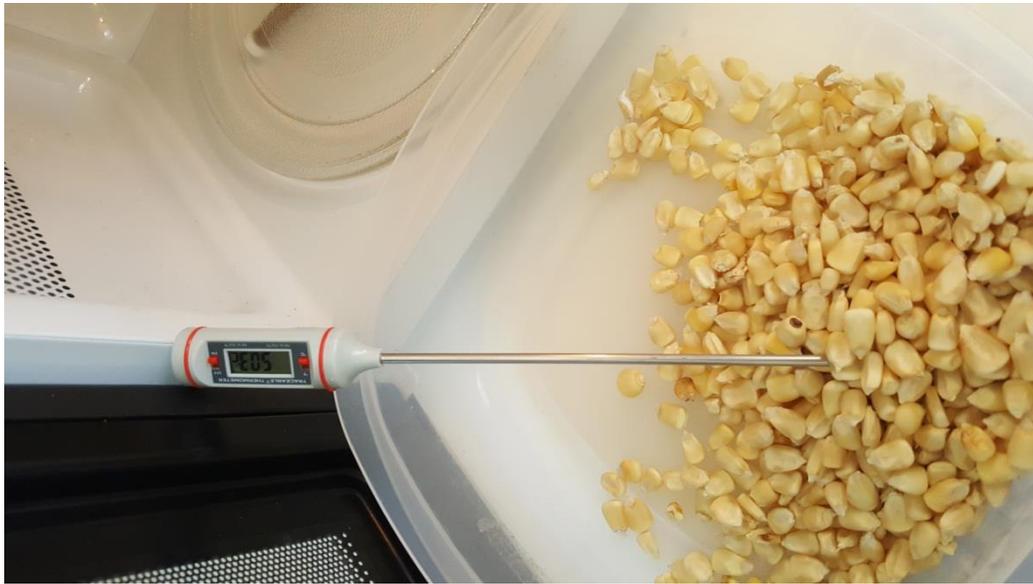


Figura 12. Verificación de temperatura de calentamiento.



Figura 13. Enfriamiento de maíz con aire forzado.



Figura 14. Verificación de temperatura de enfriamiento de maíz.

6.8 Uniformidad del calentamiento

Para determinar la uniformidad del calentamiento, se realizó mediante el cálculo del coeficiente de variación (CV), así como mediante análisis de imágenes térmicas.

El CV se calculó con la relación del promedio de las temperaturas y la desviación estándar, en cada uno de los tratamientos. El CV ha sido aceptado como un índice de uniformidad e indica que un valor menor de CV resulta en un calentamiento más uniforme (Geedipalli *et al.*, 2007 y Soto-Reyes *et al.*, 2015).

Las imágenes térmicas fueron tomadas con una cámara infrarroja (FLIR, modelo A310, Suecia; Figura 15). Inmediatamente después de salir del tratamiento con microondas, el recipiente con el maíz fue colocado a 1 m de distancia, con una temperatura reflejada de 20°C, humedad relativa de 50% y una emisividad de 0.90 (valor para producto orgánico).

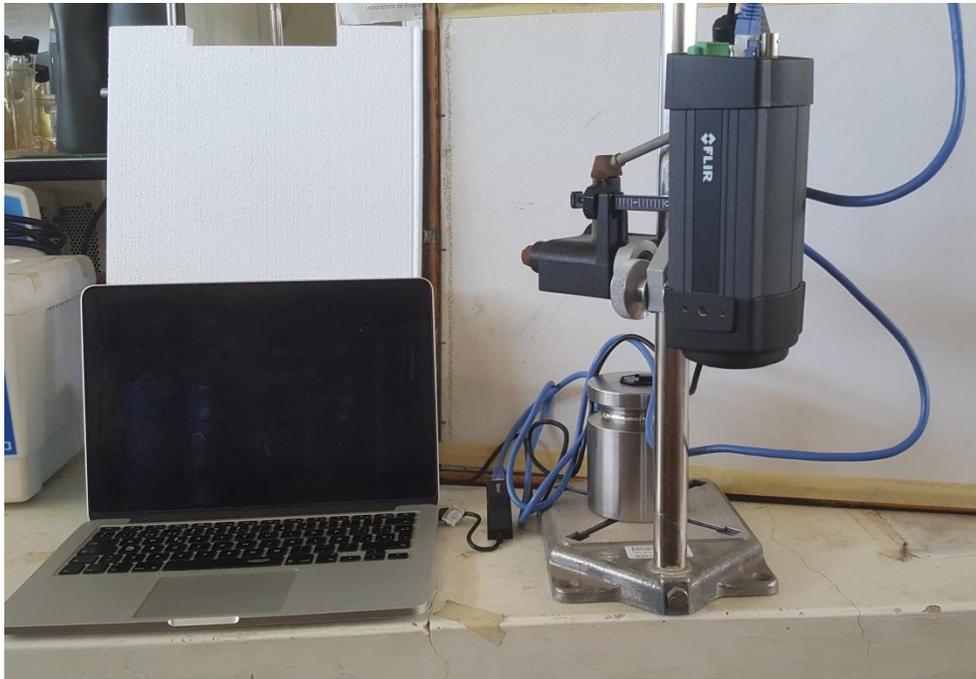


Figura 15. Sistema para captura de imágenes térmicas en tratamientos.

6.9 Mortalidad del insecto

Se verificó la mortalidad de los insectos realizando inspección en los granos tratados con un microscopio estereoscopio (marca Zeiss, modelo Stemi DV4, Alemania; Figura 16), quebrando los granos de maíz identificados como infestados con un pistilo en un mortero (Figura 17) y recuperando las larvas (Figura 18). Se contaron el total de los insectos recuperados y se observó la movilidad de los mismos, aquéllos que permanecieron inmóviles por más de 30 min se consideraron muertos. La mortalidad se calculó como la razón de los insectos muertos por el total de insectos recuperado por 100%.



Figura 16. Microscopio estereoscopio (marca Zeiss, modelo Stemi DV4, Alemania).



Figura 17. Maíz tratado con microondas y quebrado para recuperar las larvas de *S. cerealella*.



Figura 18. Larvas de *S. cerealella* recuperadas después del tratamiento.

6.10 Propiedades fisicoquímicas

Se realizaron pruebas fisicoquímicas a los maíces tratados y al lote testigo, las cuales se describieron en la sección 6.2. Dichas pruebas se realizaron en los días 0, 15, 30 y 90 posterior al tratamiento, los lotes de maíz se mantuvieron almacenados en recipientes de plástico con tapa con una temperatura de 25-30°C (Figura 19).



Figura 19. Almacenamiento de maíz recipientes de plástico. (a). Maíz sin tratamiento (testigo), (b) maíz tratado a 475 W, (c) maíz tratado a 390 W y (d) maíz tratado a 293 W.

6.11 Análisis estadístico

Para el análisis de resultados se utilizó el programa estadístico Statgraphics Centurión XVI (USA), el diseño fue completamente al azar, se realizó un análisis de varianza y la prueba de Tukey para la comparación múltiple de medias, estableciendo diferencias a un valor de $p=0.05$.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Caracterización del maíz

En el Cuadro 4 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de caracterización del grano de maíz blanco, estas pruebas se realizaron sin ningún tratamiento, con el fin únicamente de conocer las características del maíz empleado en el trabajo de investigación.

Cuadro 4 Caracterización físico-química y de germinación de maíz blanco	
Variable determinada	Resultado
Humedad b.h. (%)	11.90 ± 0.03
Densidad (kg/m ³)	782.667 ± 3.28
Actividad de agua	0.575 ± 0.02
Dureza (N)	141.317 ± 11.882
Germinación (%)	95 ± 5
Color	
L*	67.715 ± 0.286
a*	2.383 ± 0.115
b*	25.385 ± 0.527

De acuerdo a los resultados obtenidos de humedad y densidad del maíz, se pudo determinar que cumple con lo especificado en la norma NMX-FF-034/1-SCFI-2002, que establece que la humedad para maíz blanco no debe ser mayor a 14% y debe tener una densidad mínima de 740 kg/m³ y en cuanto a actividad de agua (agua disponible para reacciones químicas y biológicas), el maíz analizado presenta un

valor aceptable, puesto que la FAO (1993) establece que debe ser 0.572 a temperatura ambiente.

Los resultados de humedad son similares con lo reportado por Salinas-Moreno y Aguilar-Modesto (2010) donde se reporta 11.7 % de humedad en maíces duros e intermedios y 11.9 para maíces suaves, mientras que Cuaran (2013) reporta 12.01% de humedad en la caracterización de maíz blanco.

En cuanto a los parámetros obtenidos de color, son muy similares a los reportados por Cuaran (2013), que reporta para el parámetro L^* (luminosidad) un valor de 70.07 ± 3.9 y el parámetro b^* (amarillo-azul) un valor de 1.53 ± 0.8 y difiere un poco más en cuanto al parámetro a^* (rojo-verde), en el cual se reporta un valor de 22.18 ± 1.2 . Patlan González (2015) reporta valores cercanos a los obtenidos, en los parámetros de color, $L^* = 73.85 \pm 1.10$, $a^* = 1.80 \pm 0.09$ y $b^* = 22.61 \pm 0.35$.

El porcentaje de germinación obtenido fue de 95% después de 6 días, el cual indica que el maíz resulta adecuado para utilizarse como semilla.

7.2 Calibración del horno de microondas

De acuerdo al proceso de calibración del horno de microondas, los resultados muestran que las mejores potencias para realizar los tratamientos son: 50, 70 y 90% de la potencia nominal del horno, esto por la menor desviación que presentan (Figura 20), por tal motivo éstas fueron seleccionadas para los tratamientos las cuales corresponden a 293, 390 y 475 W respectivamente.

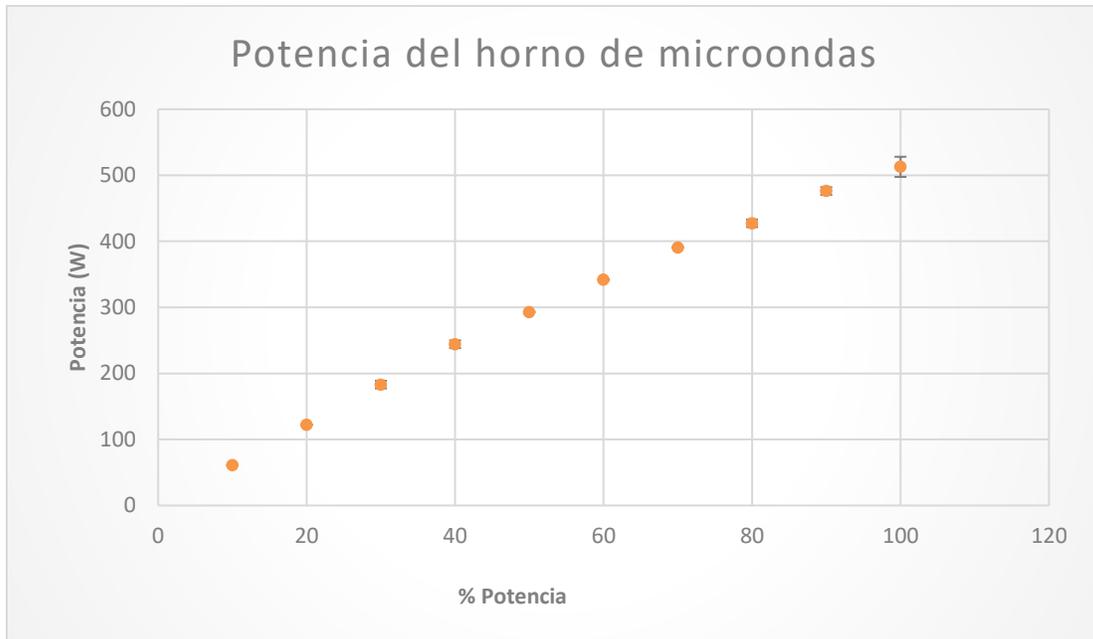


Figura 20. Calibración del horno de microondas

7.3 Curvas de calentamiento

Para las curva de calentamiento se emplearon 56, 39 y 37 s para generar una temperatura de 50°C en el interior del grano (Figura 21) para las potencias de 293, 390 y 475 W respectivamente, se mantuvo dicha temperatura durante 3 min, seguido de un enfriamiento por 3.5 min , condiciones a las cuales las larvas de *Sitotroga cerealella* mueren. Esta mortalidad fue establecida con base en pruebas previas realizadas en el laboratorio (datos no presentados). Las condiciones de muerte de *S. cerealella* encontradas coinciden con lo reportado para otros insectos plaga, como lo publicado por Wang *et al.*, 2009 para *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera: Tortricidae) y *Amyelois transitella* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae), quienes indican 100% de mortalidad con un tratamiento de inmersión en agua a 50°C con un tiempo de más de 10 min. Debido a que no se trató de los mismos géneros estudiados por Wang *et al.*, 2009, inicialmente se realizó el tratamiento con las mismas condiciones solo con un tiempo de retención de 2 min, sin embargo bajo estas condiciones solo se logró el 94% de mortalidad, por lo cual el tratamiento final se realizó con el tiempo de retención de 3 min.

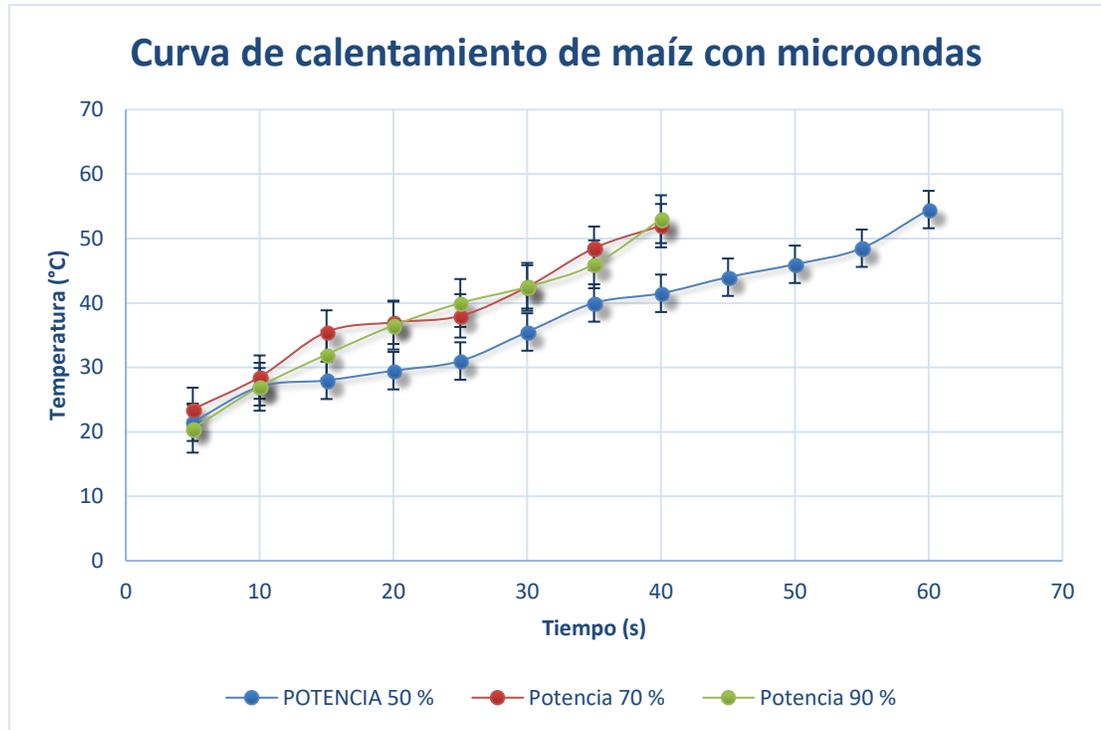


Figura 21. Curvas de calentamiento de maíz a potencias de 50, 70 y 90 % de la potencia máxima del horno.

7.4 Curva de enfriamiento

Se elaboró una curva de enfriamiento para determinar el tiempo necesario para que la temperatura del grano después de recibir el tratamiento con microondas llegara a ser aproximada a la temperatura ambiente. Como se muestra en la Figura 22 cada 30 s se registró la temperatura y se determinó que el enfriamiento fue durante 3.5 min ya que en este tiempo el grano alcanzó la temperatura ambiente aproximadamente (24°C).

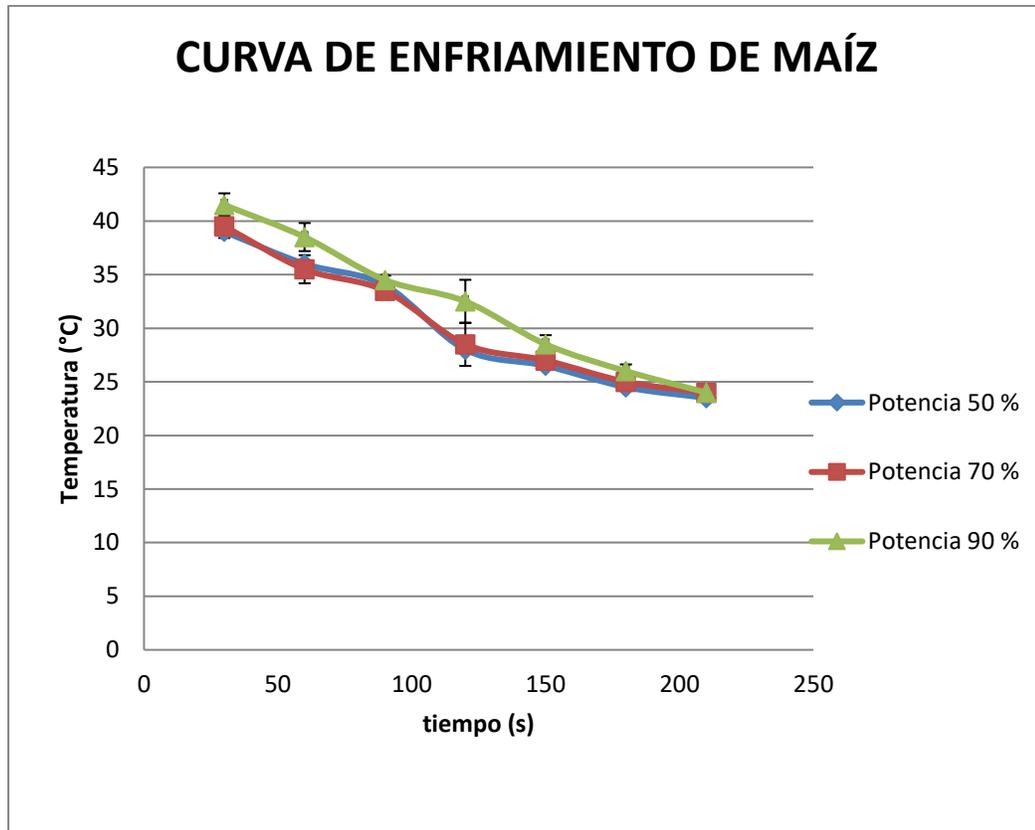


Figura 22. Curva de enfriamiento de maíz.

De acuerdo al diseño del tratamiento con microondas (Figura 23), se puede observar como el tratamiento con 475 W se lleva a cabo en un tiempo menor, por lo que esto trae ventajas en el proceso ya que se reduce la energía aplicada y por lo tanto los costos del proceso.

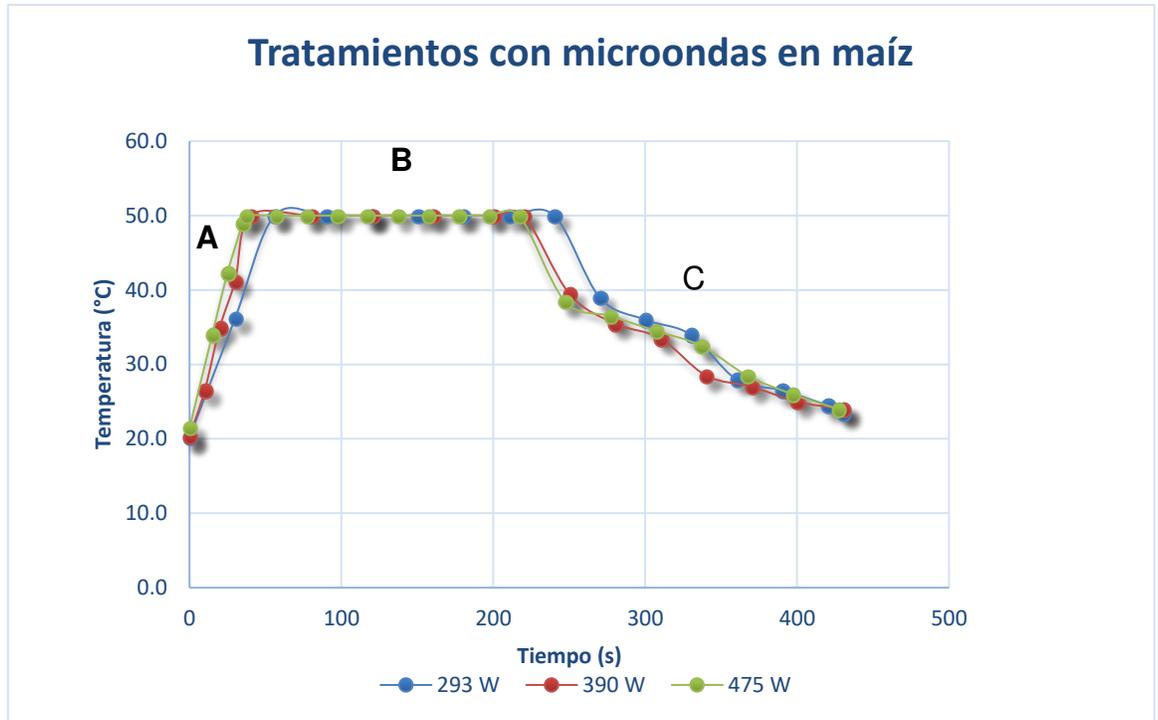


Figura 23. Tratamientos en maíz microondas a diferentes potencias: A. Tiempo de calentamiento para llegar a 50°C, B. Tiempo de retención (3 min) y C. Tiempo de enfriamiento (3.5 min).

7.5 Uniformidad del calentamiento

7.5.1 Coeficiente de variación

El cálculo del coeficiente de variación indica que los mejores tratamientos son el del 50% (293 W) y el de 90% (475 W), esto porque presentan los valores menores de CV, lo cual indica mayor uniformidad (Figura 24).

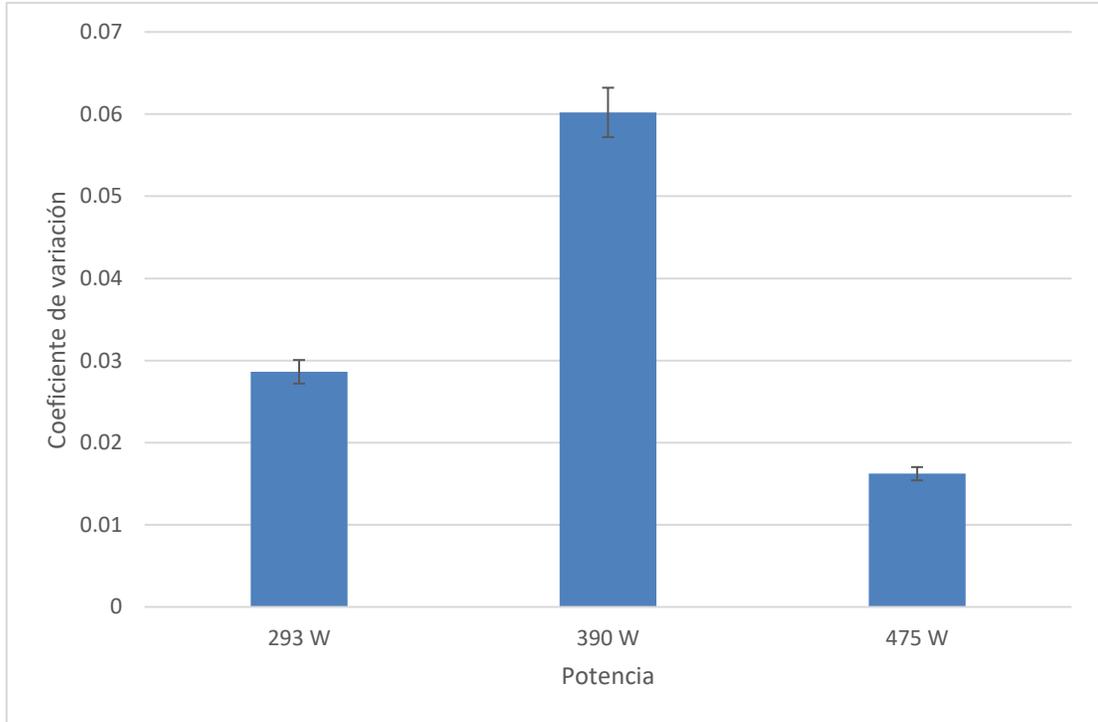
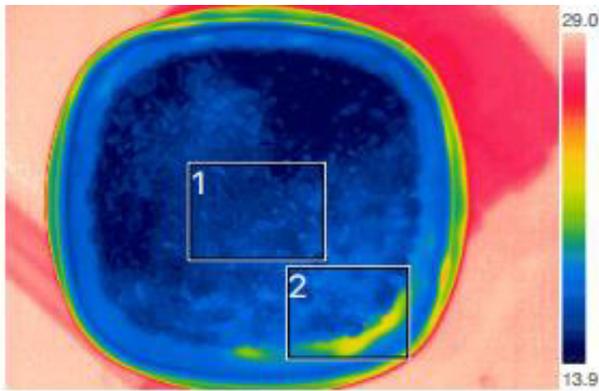


Figura 24. Coeficiente de variación de las temperaturas en el centro de los granos de maíz tratados a los tres niveles de potencia estudiados.

7.5.2 Imágenes térmicas

En las Figuras 25 a 28 se muestra la captura de imágenes térmicas del lote de maíz a temperatura ambiente (18°C) y del maíz con los tratamientos a 50, 70 y 90% de la potencia nominal del horno, al llegar a la temperatura objetivo de 50°C.

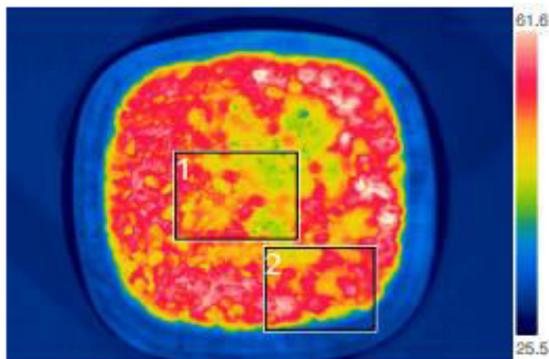


MEASUREMENTS	°C
Area 1 Max.	18.4
Area 1 Min.	14.1
Area 1 Avg.	15.9
Area 2 Max.	26.7
Area 2 Min.	15.9
Area 2 Avg.	18.2

PARAMETERS	
Emissivity	0.90
Refl. temp.	20.00 °C
Distance	1.00 m
Relative humidity	50 %
Atmospheric temperature	20.00 °C
Transmission	0.90

Figura 25. Imagen térmica de maíz a temperatura ambiente

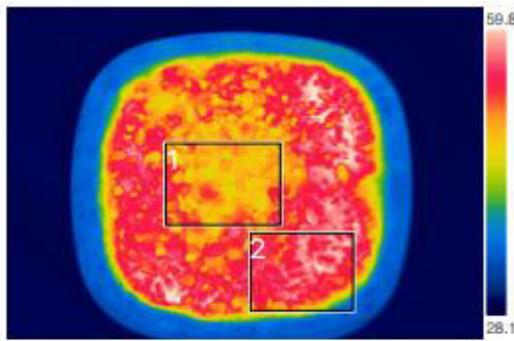
En la Figura 25 se observa una coloración azul casi en la totalidad de la muestra, esto representa la uniformidad de temperatura en el maíz aun sin tratamiento.



MEASUREMENTS		°C	PARAMETERS	
Area 1 Max.		58.4	Emissivity	0.90
Area 1 Min.		41.5	Refl. temp.	20.00 °C
Area 1 Avg.		50.2	Distance	1.00 m
Area 2 Max.		60.9	Relative humidity	50 %
Area 2 Min.		30.7	Atmospheric temperature	20.00 °C
Area 2 Avg.		50.2	Transmission	0.90

Figura 26. Imagen térmica de maíz después del tratamiento a 90 % (475 W, 37 s)

En la Figura 26 se observa una coloración azul en el borde del recipiente y es la zona más fría, en los granos tratados se observa que no existe una total uniformidad puesto que hay zonas más frías en el centro y el contorno del recipiente. Sin embargo, se puede observar, con base en las 2 zonas marcadas, que el promedio de la temperatura en el área 1 es de 50.2°C y en el área 2 también es de 50.2°C, esto es favorable en el tratamiento puesto que la temperatura objetivo es de 50°C para lograr la mortalidad de las larvas de *S.cerealella*.

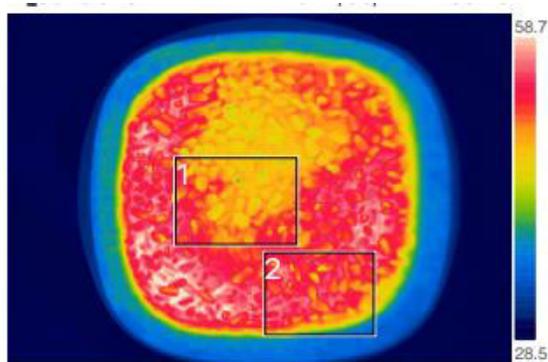


MEASUREMENTS	°C
Area 1 Max.	56.9
Area 1 Min.	44.4
Area 1 Avg.	50.3
Area 2 Max.	60.0
Area 2 Min.	34.9
Area 2 Avg.	53.7

PARAMETERS	
Emissivity	0.90
Refl. temp.	20.00 °C
Distance	1.00 m
Relative humidity	50 %
Atmospheric temperature	20.00 °C
Transmission	0.90

Figura 27. Imagen térmica de maíz después del tratamiento a 70 % (390 W, 40 s).

En la Figura 27 se observa una coloración azul en el borde del recipiente y es la zona más fría, en los granos tratados se observa que no existe una total uniformidad puesto que hay zonas más frías en el centro y el contorno del recipiente. Sin embargo se puede observar, en base a las 2 zonas marcadas los resultados mostrados, que el promedio de la temperatura en el área 1 es de 50.3°C y en el área 2 es de 53.7°C, esto indica que se excede de la temperatura objetivo que es de 50°C para lograr la mortalidad de las larvas de *S. cerealella*; el exceso de temperatura en el tratamiento puede repercutir en las características y propiedades del maíz tratado.



MEASUREMENTS		°C
Area 1 Max.		56.3
Area 1 Min.		41.8
Area 1 Avg.		50.3
Area 2 Max.		57.7
Area 2 Min.		35.7
Area 2 Avg.		51.2

PARAMETERS	
Emissivity	0.90
Refl. temp.	20.00 °C
Distance	1.00 m
Relative humidity	50 %
Atmospheric temperature	20.00 °C
Transmission	0.90

Figura 28. Imagen térmica de maíz después del tratamiento a 50 % (293 W, 56 s).

En la Figura 28 se observa una coloración azul en el borde del recipiente y es la zona más fría, en los granos tratados se observa que no existe una total uniformidad puesto que hay zonas más frías en el centro y el contorno del recipiente. Sin embargo se puede observar, en base a las 2 zonas marcadas los resultados mostrados, que el promedio de la temperatura en el área 1 es de 50.3°C y en el área 2 es de 51.2°C, esto indica que se excede de la temperatura objetivo que es de 50°C para lograr la mortalidad de las larvas de *S. cerealella*; el exceso de temperatura en el tratamiento puede repercutir en las características y propiedades del maíz tratado, sin embargo exceso de temperatura es menor que el presentado en el tratamiento con la potencia al 70%.

Con base en las imágenes térmicas se puede decir que los tratamientos realizados con microondas no son completamente uniformes, estos resultados son similares a los reportados por Vadivambal *et al.*, (2010), utilizaron un sistema industrial de microondas a escala piloto a 2450 MHz para matar estadios larvarios

y adultos de tres insectos en granos almacenados: *Sitophilus zeamais*, *Tribolium castaneum* y *Plodia interpunctella* en maíz, midieron la temperatura superficial del maíz después del calentamiento con microondas, usando una cámara infrarroja y observaron que la temperatura no era uniforme. La falta de uniformidad de la temperatura en el tratamiento puede deberse a varias causas, a la forma del recipiente que contiene la muestra, que a pesar de ser un horno de cavidad pequeña el empleado para los tratamientos, se requiere implementar estrategias para que energía de las microondas llegue con mayor uniformidad en la muestra, esto puede lograrse utilizando un recipiente con forma más redondeada y empleando un mecanismo de movimiento en la muestra durante el tratamiento. Sin embargo con el tratamiento diseñado se logró alcanzar y mantener la temperatura objetivo (50°C) para alcanzar el 100% de mortalidad en larvas de *S. cerealella*. Vadivambal *et. al.*, (2010) reportan una temperatura promedio de la superficie del maíz entre 52-55°C, después de tratamiento con microondas, y con ello se obtuvo la mortalidad de los tres insectos: *Sitophilus zeamais*, *Tribolium castaneum* y *Plodia interpunctella* en maíz.

Al relacionar las imágenes térmicas con el cálculo del coeficiente de variación, el cual es otro indicador de la uniformidad de calentamiento, se observa que el tratamiento con la potencia 90% obtuvo un CV menor (0.016) y con promedios de temperatura homogéneos (50.2°C), seguido de la potencia del 50% (CV= 0.028), con diferencias entre las temperaturas promedio de 0.9°C y finalmente el tratamiento con potencia de 70% (CV=0.068) y con una diferencia en las temperaturas promedio de 3.4°C.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, se establece que el mejor tratamiento con microondas para maíz, es con 90% de potencia.

7.6 Mortalidad de la palomilla *Sitotroga cerealella* con el tratamiento de microondas.

Para determinar el índice de mortalidad se realizó el tratamiento diseñado en un lote de maíz de 250 g con 50% de infestación. El tratamiento con microondas

se realizó cuando los granos con *Sitotroga cerealella* se encontraban infestados en el estadio larval (día 28-30 del ciclo de vida), puesto que es la etapa más termoresistente del insecto, y en la cual causa más daños, debido a que se alimenta del endospermo de los granos de maíz (FAO) provocando pérdidas postcosecha de 10-20% (Feíto *et al.*, 2015). Después del tratamiento, los granos se quebraron y se recuperaron 146 ± 14 larvas, las cuales no presentaron movilidad después de 30 min de observación, es decir se logró el 100% de mortalidad.

En la Figura 29 se observan las imágenes de granos sanos (Figura 29 a) y granos infestados (Figura 29b), se puede apreciar claramente como en los granos dañados existe la evidencia de las perforaciones realizadas por *Sitotroga cerealella* para ingresar al grano y alimentarse de él. De acuerdo a la FAO, *S. cerealella* es considerada la plaga de los granos más destructora en el Continente Americano; ataca el trigo, el maíz y otros granos. Las hembras ponen varios cientos de huevos sobre los granos en forma individual o en grupos de hasta 20 huevos; estos eclosionan en cuatro días a cuatro semanas y las larvas cavan galerías en los granos alimentándose de su parte amilácea. Esto debido a que presentan aparato bucal mandibulado. Al completar su desarrollo las larvas dejan cavado un túnel de salida para el adulto, cerrado por una fina capa transparente como una cubierta para una salida de emergencia (Figura 29b); en ese momento tejen un capullo dentro del grano para pasar a pupas y los adultos emergen rompiendo la capa de salida.



Figura 29. Grano de maíz sano (a) y maíz infestado (b)



Figura 30. Maíz infestado y quebrado para recuperar las larvas de *Sitotroga cerealella*.

En las Figura 31 se muestran imágenes de las larvas recuperadas de los granos tratados, se pueden observar que presentan las características típicas de lepidópteros tienen aparato bucal de tipo masticador, con mandíbulas bien desarrolladas, tienen patas verdaderas y falsas, aunque a veces sólo sean vestigiales; además produce sedosidades.



Figura 31. Larvas de *Sitotroga cerealella* recuperadas de los granos de maíz.

7.7. Caracterización posterior al tratamiento.

7.7.1. Humedad

La humedad de los granos de maíz no fue afectada por los diferentes tratamientos aplicados con microondas ($p < 0.05$).

El maíz tratado no presentó diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$) en las tres potencias (293, 390 y 475 W) hasta el día 30 sin embargo; los granos tratados en el día 90 sí presentan diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$) y en el día 90 de almacenamiento los granos tratados presentan diferencia estadísticamente significativa en la potencia del 50% (Cuadro 5).

Cuadro 5. Humedad de maíz después del tratamiento con las tres potencias y el testigo durante el tiempo de almacenamiento.

Día	Testigo	Potencia 90% (475 W)	Potencia 70 % (390 W)	Potencia 50% (293 W)
0	12.545 ± 0.133 ^a	12.2667 ± 0.286 ^a	12.592 ± 0.124 ^a	12.26 ± 0.160 ^a
15	12.211 ± 0.096 ^a	12.111 ± 0.378 ^a	12.315 ± 0.148 ^a	11.671 ± 0.237 ^a
30	12.099 ± 0.339 ^a	11.349 ± 0.115 ^a	11.580 ± 0.154 ^a	11.152 ± 0.361 ^a
90	10.143 ± 1.231 ^b	9.812 ± 0.504 ^b	9.818 ± 0.010 ^b	8.023 ± 0.707 ^c

Las medias que no comparten letra en día de almacenamiento son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

El maíz sometido a los tratamientos con microondas evaluados cumple con las especificaciones de la norma Mexicana NMX-FF-034/1-SCFI-2002, ya que en todas las determinaciones se obtuvieron valores menores de 14% de humedad, que es el valor máximo establecido en la norma para maíz blanco. Los resultados fueron mayores a los reportados por Patlán González (2015), quien realizó tratamientos con microondas en tres variedades de maíz (blanco, azul y morado), los valores reportados para humedad en maíz blanco fueron de 8.7 ± 0.3 (Testigo), 9.0 ± 1.6 (275 W), 10.5 ± 0.4 (380 W) y 9.1 ± 0.2 (490 W).

Después de aplicar los tratamientos y a pesar de que el maíz cumple con lo especificado en la normatividad, no es recomendable almacenarse en las condiciones establecidas en estos experimentos después de 90 días, puesto que comienza a haber mayor pérdida de humedad y esto puede repercutir en el uso posterior del maíz.

7.7.2 Actividad de agua

De acuerdo con los resultados mostrados en el Cuadro 6 se observa que no existe una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$) entre tratamientos. Solo hay diferencia estadísticamente significativa a partir del día 90 de almacenamiento del maíz tratado y esto puede deberse a las condiciones de almacenamiento, más que al tratamiento aplicado, por lo cual no se recomienda que el maíz sea almacenado por largos periodos de tiempo después de su cosecha (>90 días), bajo las condiciones establecidas en este protocolo.

Los resultados obtenidos después del tratamiento fueron muy similares, a lo reportado por la FAO (1993) que es de 0.572 a temperatura ambiente, en el día 0; y menores en los días 15, 30 y 90 después del tratamiento.

Cuadro 6. Actividad de agua de maíz después del tratamiento con las tres potencias y el testigo durante el tiempo de almacenamiento.

Día	Testigo	Potencia 90% (475 W)	Potencia 70 % (390 W)	Potencia 50% (293 W)
0	0.575 ± 0.067 ^a	0.579 ± 0.024 ^a	0.587 ± 0.026 ^a	0.563 ± 0.060 ^a
15	0.536 ± 0.024 ^a	0.533 ± 0.024 ^a	0.451 ± 0.056 ^a	0.458 ± 0.036 ^a
30	0.535 ± 0.038 ^a	0.491 ± 0.030 ^a	0.542 ± 0.019 ^a	0.437 ± 0.024 ^a
90	0.399 ± 0.062 ^b	0.279 ± 0.029 ^c	0.333 ± 0.065 ^b	0.291 ± 0.020 ^c

Las medias que no comparten letra en día de almacenamiento son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

7.7.3. Densidad

El tratamiento con microondas no afectó la densidad de los granos de maíz, puesto que no hay diferencias significativas entre los diferentes tratamientos, ni entre los días de almacenamiento del maíz (Cuadro 7). Además el maíz tratado cumple con la Norma Mexicana NMX-FF-04/1-SCFI-2002, que especifica una densidad mínima de 740 kg/m³.

Cuadro 7. Densidad (kg/m³) de maíz después del tratamiento con las tres potencias y el testigo durante el tiempo de almacenamiento.

Día	Testigo	Potencia 90% (475 W)	Potencia 70 % (390 W)	Potencia 50% (293 W)
0	782.667 ± 10.627 ^a	787.067 ± 2.345 ^a	782.833 ± 2.278 ^a	776.367 ± 5.624 ^a
15	780.667 ± 3.769 ^a	786.443 ± 3.733 ^a	785.1 ± 3.012 ^a	786.467 ± 5.878 ^a
30	784.767 ± 6.658 ^a	790.1667 ± 5.120 ^a	791.166 ± 2.570 ^a	788.933 ± 2.339 ^a
90	784.7 ± 4.573 ^a	787 ± 2.157 ^a	783.4 ± 4.436 ^a	794.467 ± 2.756 ^a

Las medias que no comparten letra en día de almacenamiento son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

7.7.4. Dureza

Para esta determinación se realizaron las pruebas en 15 granos, esto para reducir la variación, pero aun así se presentaron valores altos de desviación estándar.

Los resultados se muestran en el Cuadro 8 y se observa que existe diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$) principalmente en la dureza de los granos tratados y con almacenamiento de 90 días, esto puede ser debido mayormente al tiempo de almacenamiento y las condiciones del mismo y no al tratamiento, debido a que se observa que en todos los tratamientos hasta el día 30 no hay diferencia estadísticamente significativa. Solo existe diferencia estadísticamente significativa en la potencia de 50% en el día 15 con respecto al testigo, esto pudo deberse a alguna inconsistencia en el equipo el día de la medición o a la propia variabilidad de los granos en ese lote.

Cuadro 8. Dureza (N) de granos de maíz después del tratamiento con las tres potencias y el testigo, durante el tiempo de almacenamiento.

Día	Testigo	Potencia 90% (475 W)	Potencia 70 % (390 W)	Potencia 50% (293 W)
0	141.317 ± 17.182 ^a	130.504 ± 13.839 ^a	128.497 ± 14.633 ^a	127.979 ± 16.272 ^a
15	137.111 ± 20.644 ^a	137.712 ± 11.571 ^a	132.809 ± 10.616 ^a	177.702 ± 13.813 ^b
30	169.751 ± 27.076 ^a	146.702 ± 15.661 ^a	142.845 ± 9.174 ^a	148.115 ± 13.874 ^a
90	214.372 ± 48.345 ^c	289.817 ± 12.321 ^d	172.096 ± 8.740 ^b	188.922 ± 12.268 ^b

Las medias que no comparten letra en día de almacenamiento son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

Se puede concluir que los tratamientos no afectaron la textura del maíz. Dalmoro *et al.*, (2015) trabajaron en la desinfestación de frijol y trigo con tratamientos de microondas también midieron la dureza antes y después del

tratamiento, reportaron que no hubo diferencia significativa antes ni posterior al tratamiento.

7.7.5. Color

Con base en los resultados que se presentan en el cuadro 9 se puede observar que no existen diferencias significativas entre los parámetros de color en los diferentes tratamientos ($p < 0.05$). Ya que los valores permanecen con muy poca variabilidad durante el almacenamiento de los granos de maíz después del tratamiento.

Cuadro 9. Color de maíz después del tratamiento con las tres potencias y el testigo durante el tiempo de almacenamiento.

Color				
Día	Potencia (%)	L*	a*	b*
0	Testigo	67.715 ±0.286 ^a	2.383 ±0.115 ^a	25.385 ±0.528 ^a
15		68.477 ±0.356 ^a	1.687 ±0.128 ^b	24.898 ±0.374 ^a
30		68.538 ±0.318 ^a	2.112 ±0.027 ^a	25.495 ±0.520 ^a
90		69.122 ±0.086 ^a	2.047 ±0.139 ^a	25.503 ±0.236 ^a
0	475 W (90%)	69.698 ±0.791 ^a	1.893 ±0.340 ^a	25.577 ±0.214 ^a
15		69.093 ±0.669 ^a	3.27 ±0.163 ^b	26.41 ±0.233 ^a
30		68.012 ±0.288 ^a	2.122 ±0.027 ^a	25.853 ±0.333 ^a
90		67.838 ±0.615 ^a	1.97 ±0.124 ^a	25.391 ±0.435 ^a
0	390 W (70%)	69.457 ±0.567 ^a	2.345 ±0.232 ^b	26.96 ±0.420 ^a
15		68.877 ±0.410 ^a	3.238 ±0.135 ^c	26.378 ±0.486 ^a
30		66.623 ±0.730 ^a	1.732 ±0.253 ^a	24.862 ±0.554 ^a
90		68.671 ±0.873 ^a	1.998 ±0.131 ^a	25.09 ±0.361 ^a
0	293 W (50%)	69.382 ±0.644 ^a	2.09 ±0.170 ^a	25.898 ±0.964 ^a
15		69.515 ±0.366 ^a	2.078 ±0.099 ^a	26.078 ±0.588 ^a
30		68.433 ±0.257 ^a	2.067 ±0.055 ^a	25.693 ±0.623 ^a
90		67.767 ±0.344 ^a	2.162 ±0.055 ^a	25.7373 ±0.641 ^a

Las medias que no comparten letra en día de almacenamiento son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

Cuaran (2013), reporta valores similares ($L=70.07 \pm 3.9$, $a^*=1.53 \pm 0.8$ y $b^*=22.18 \pm 1.2$) en maíz blanco pero sin ningún tratamiento y de una variedad

chilena, por ello y con los valores obtenidos se puede decir que el color no se ve afectado con el tratamiento aplicado con microondas.

Patlán González (2015) reporta valores de determinación de color a potencia de 100%: $L^*=72.82 \pm 1.57$, $a^*=1.37 \pm 0.77$ y $b^*=24.39 \pm 1.46$; potencia de 70%: $L^*=70.32 \pm 1.26$, $a^*=2.35 \pm 0.46$ y $b^*=25.8 \pm 1.43$ y potencia de 50%: $L^*=71.20 \pm 2.29$, $a^*=2.62 \pm 0.83$ y $b^*=26.08 \pm 1.9$. Tales valores fueron determinados en el día cero de tratamiento y son similares a los obtenidos en este estudio.

7.7.6. Germinación

Con base a los resultados obtenidos se puede observar que no hay diferencia estadísticamente significativa ($p<0.05$) entre los diferentes tratamientos (Cuadro 10), incluso si se observan los resultados en algunos de los tratamientos el porcentaje de germinación incrementa en un porcentaje pequeño, por lo que se puede decir que los tratamientos aplicados con microondas no afectan la capacidad de germinación de maíz blanco, en la Figura 32 se observan algunas muestras de maíz colocadas en el germinador EasyGreen y en la Figura 33 se muestran algunas muestras de maíz germinados a las diferentes potencias (90, 70 y 50%), en las cuales se observa un crecimiento aéreo, que se mantuvo en un rango de 3-10 cm; el crecimiento de la radícula fue de 2-12 cm, esto para los diferentes tratamientos y días de almacenamiento de los granos de maíz.

Cuadro 10. Germinación de maíz después del tratamiento con las tres potencias y el testigo durante el tiempo de almacenamiento.

Día	Testigo	Potencia 90% (475 W)	Potencia 70 % (390 W)	Potencia 50% (293 W)
0	95 ± 5^a	97.5 ± 4.33^a	100 ± 0^a	90 ± 0^a
15	92.5 ± 8.29^a	92.5 ± 4.33^a	100 ± 0^a	90 ± 0^a
30	92.5 ± 4.33^a	92.5 ± 8.29^a	97.5 ± 4.33^a	90 ± 0^a
90	92.5 ± 4.33^a	92.5 ± 8.29^a	95 ± 5^a	97.5 ± 4.33^a

Los datos obtenidos son semejantes a lo reportado por Dalmoro *et al.*, (2015), quienes realizaron tratamientos con microondas en frijol a 1000 W, 75 s. Estos investigadores concluyeron que la germinación en el frijol tratado con microondas no se modificó significativamente.

Purhobit *et al.*, (2013) mencionan que la germinación de soya verde (*Vigna radiata*) tratada con microondas a 400 W durante 28 s fue del 70%. Vadivambal *et al.*, (2007) reportaron que la germinación en trigo tratado con microondas de 250 a 500 W durante 28-56 s disminuyó significativamente (81-47%).



Figura 32. Granos de maíz en germinador Easygreen.

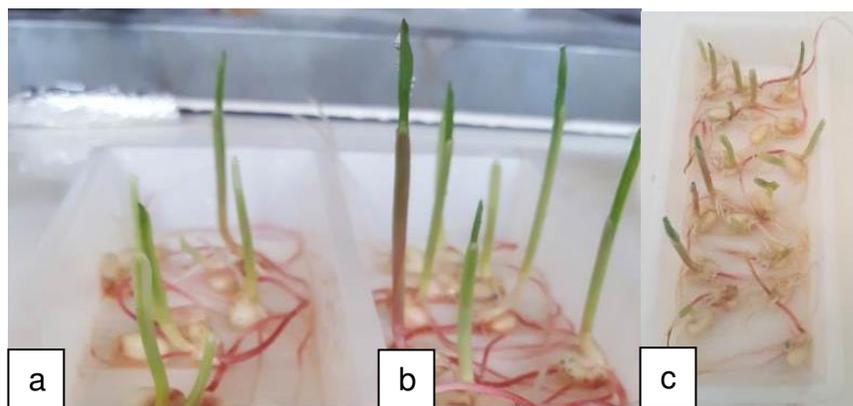


Figura 33. Germinación de granos de maíz en las tres diferentes potencias.

a) 90%, b) 70% y c) 50%

En base a los análisis realizados durante los diferentes tratamientos, este método con microondas puede ser escalado a nivel industrial debido a la necesidad de adoptar tecnologías alternativas sostenibles desde el punto de vista económico y ambiental para la desinfestación, que actúen como alternativa a la desinfestación química.

En algunos países Europeos se emplea el método físico a microondas Misya (Microwaves SYstem for Agrofood), desarrollado por la empresa italiana EMitech, el cual utiliza el principio de la termalización de la energía electromagnética para la exterminación de posibles plagas en cereales o legumbres sin afectar a sus características y sin dejar residuos tóxicos.

Este método da cumplimiento de las normativas internacionales en tema de tutela ambiental: la tecnología MW es concorde con los acuerdos suscritos en el Protocolo de Montreal y acogido por el Reglamento Europeo CE2037/2000 sobre el uso de sustancias y gases tóxicos. Esta tecnología es sustitutiva al Bromuro de Metilo, gas altamente tóxico y definitivamente prohibido desde el 1 de enero 2005.

VIII. CONCLUSIONES

Los tratamientos realizados en maíz blanco, con las tres diferentes potencias (50, 70 y 100%), equivalentes a 275, 380 y 490 W, respectivamente resultaron efectivos para la desinfestación de *Sitotroga cerealella* en maíz, logrando el 100% de la mortalidad de esta plaga en su estadio larval.

Con base a los hallazgos encontrados en esta investigación se puede establecer que los tratamientos diseñados no modificaron significativamente la calidad del maíz tratado.

Los mejores tratamientos en base a la uniformidad del calentamiento (CV), fueron con la potencia al 90% y 50%. Siendo, el tratamiento que tarda menos tiempo en alcanzar la temperatura objetivo (50°C) para lograr la mortalidad de las larvas es el de 90% (475 W), por lo cual se define como el mejor tratamiento, ya que además no modifica significativamente la calidad de maíz tratado.

De acuerdo la captura de imágenes térmicas y relacionándolas con el CV se establece que el mejor tratamiento con microondas para maíz, es con 90% (490 W, 37 s), puesto que se logra una mejor uniformidad en las temperaturas promedio, un valor menor en el CV y además, es el tratamiento en el que se requiere menos tiempo para llegar a la temperatura objetivo (50°C) y con ello lograr la mortalidad del 100% de las larvas de *S. cerealella* de forma rápida y eficiente.

Se logró diseñar un tratamiento efectivo asistido con microondas para la desinfestación postcosecha de maíz blanco, el cual es una alternativa para la fumigación, que puede ser escalada a nivel industrial y con ello reducir contaminación ambiental, así como los residuos tóxicos en los granos, emisiones a la atmosfera, resistencia a los productos químicos e intoxicaciones a las personas. La energía necesaria para realizar los tratamientos propuestos puede ser generada por medio de fuentes renovables, lo cual lo hace especialmente amigable con el medio ambiente.

Se recomienda que en futuros trabajos se realicen tratamientos con microondas, incluyendo otro insecto de importancia económica para el maíz, como lo es *Sitophilus zeamais*.

También se recomendable realizar tratamientos con radiofrecuencia, debido que también es una tecnología en base a calentamiento dieléctrico y en la literatura existen reportes de que la desinfestación con esta tecnología resulta eficaz en productos agrícolas.

IX. LITERATURA CITADA

Alfaifi, B., Wang, S., Tang, J., Rasco, B., Sablani, S., Jiao, Y., 2013. Radio frequency disinfestation treatments for dried fruit: Dielectric properties. *LWT-Food Science and Technology* 50:746-754.

Anderson, E. 1946. Maize in Mexico. A preliminary survey. *Annals of Missouri Botanical Garden* 33: 147- 247

Anderson, E.F., Cutler, H.C., 1942. Races of *Zea mays*: I Their recognition and classification. *Annals Missouri Botanical Garden*. 29: 69–88.

AOAC (2000). *Official Methods of Analysis*. Association of Official Analytical Chemists, Washington, D.C.

Bansal N., Dhaliwal A.S., Mann K.S. 2015. Dielectric properties of corn flour from 0.2 to 10 GHz. *Journal of Food Engineering*. 166: 255–262.

Barber H. 1983. *Electroheat*. New York: Granada Publishing.

Biodiversidad Mexicana, 2012. Disponible en: <http://www.biodiversidad.gob.mx/usos/maices/maiz.html>. Fecha de consulta: 20 de Marzo 2016.

Birla S.L., Wang S., Tang J., y Hallman G. 2004. Improving heating uniformity of fresh fruit in radio frequency treatments for pest control. *Postharvest Biology and Technology*. 33: 205–217.

Buffler C.R. 1993. *Microwave Cooking and Processing: Engineering Fundamentals for the Food Scientist*. New York: Van Nostrand Reinhold.

Bulathsinghala, A.T. y Shaw, I.C., 2014. The toxic chemistry of methyl bromide. *Human and Experimental Toxicology*. 33 (1): 81-91.

Carvalho, M.O., Pires, I., Barbosa, A., Barros, G., Riudavets, J., Garcia, A.C., Brites, C., y Navarro, S. 2012. The use of modified atmospheres to control *Sitophilus*

zeamais and *Sitophilus oryzae* on stored rice in Portugal. Journal Stored Products Research. 50: 49-56.

CIMMYT, 2012. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. <http://www.cimmyt.org/>. 20 Marzo 2016.

CONABIO. 2011. Base de datos del proyecto global “Recopilación, generación, actualización y análisis de información acerca de la diversidad genética de maíces y sus parientes silvestres en México”. Octubre de 2010. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D. F.

CONABIO 2010. Argumentación para conservar las razas de maíces nativos de México. Taller con especialistas en maíces nativos, realizado los días 17 y 18 de marzo de 2010 en las instalaciones de la CONABIO. México, D. F. http://www.biodiversidad.gob.mx/genes/pdf/proyecto/Anexo6_ReunionesTalleres/Tabla%20razas_marzo%202010.pdf.

Cuaran Guerrero M.J. 2013. Diseño de un proceso tecnológico para la industrialización de mote de maíz (*Zea mays*, variedad blanco Urumbamba). Concepción Chile. Tesis Magister.

Dalmoro A., Barba A., Caputo S., Marra F, Lamberti G. 2015. Microwave Technology Applied in Post-Harvest Treatments of Cereals and Legumes. Chemical Engineering Transactions. 44: 13-18.

Domínguez J.E. y Marrero L., 2010, “Catálogo de la entomofauna asociada a almacenes de alimentos en la provincia de Matanzas”, Fitosanidad. 14: 75-82.

FAO, 2012. Food and Agriculture Organization <http://http.fao.org/docrep/fao/010/a1374s/a1374s07.pdf>. 25 de Marzo de 2016

FAO. 1985 Food and Agriculture Organization <http://www.fao.org/docrep/003/X7650S/x7650s11.htm>. 25 de Marzo 2016

Feitó M., Martínez G., Covas D. y Barrera A. 2015. Control de la temperatura para la prevención de plagas poscosecha en la conservación de granos. *Ingeniería y desarrollo*. 33(2): 217-237.

Fields P. G. y Muir W. E. 1992. *Physical Control. Integrated management of insects*. Canadá. Merce Dekker, Inc. Pp. 196-198.

Food and Drug Administration. (FDA). 2000. *Kinetics of Microbial Inactivation for Alternative Food Processing Technologies. Microwave and Radio Frequency Processing*. Disponible en: <http://www.fda.gov/Food/FoodScienceResearch/SafePracticesforFoodProcesses/ucm100250.htm>. 02 de Abril 2016.

Fragoso, D.B., Guedes, R.N.C., y Peternelli, L.A., 2005. Developmental rates and population growth of insecticide-resistant and susceptible populations of *Sitophilus zeamais*. *Journal of Stored Products Research*. 41 (3): 271-281.

Geedipalli S.S.R., Rakesh V., y Datta A.K. 2007. Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens. *Journal of Food Engineering* 82: 359-368.

Gao M., Tang J., Wang Y., Powers J., y Wang S., 2010. Almond quality as influenced by radio frequency heat treatments for disinfestations. *Postharvest Biology and Technology* 58(3): 225-231

González-Amaro R.M., Figueroa-Cárdenas J.D., Perales H., y Santiago-Ramos D. 2015. Maize races on functional and nutritional quality of tejate: A maize-cacao beverage. *LWT - Food Science and Technology*. 63: 1008-1015.

Hansen J.D., Johnson J.A., y Winter D.C. 2011. History and use of heat in pest control: a review. *International Journal of Pest Management*. 57: 267–289.

Hansen J.D y Johnson J.A. 2007. *Introduction. Heat treatments for postharvest pest control (1, 2, 7)*. Washington, DC. CABI.

Hansen, J.D., Drake, S.R., Heidt, M.L., Watkins, M.A., Tang, J., y Wang. S. 2004. Potential radio frequency-hot water dip treatment for postharvest codling moth control in fresh apples. HortTechnology. 14: 533-537.

Hernández X., E. 1985. Maize and man in the Greater Southwest. Economic Botany. 39(4): 416-430.

Ikediala, J.N., Tang, J., Neven, L.G. y Drake, S.R. 1999. Alternative quarantine treatment of cherries using 915 MHz microwaves: temperature mapping, codling moth mortality and fruit quality. Postharvest Biology and Technology.16: 127-137.

Ikediala, J.N., Tang, J. y Wig T. 2000. Design and analysis of a heating block system for studying thermal effect on insect pests. Transactions of the ASAE. 43(2): 351-358.

Kato Y., T. A. 1996. Revisión del estudio de la introgresión entre maíz y teocintle. En: J.A. Serratos, M.C. Willcox y F. Castillo. Flujo genético entre maíz criollo, maíz mejorado y teocintle: Implicaciones para el maíz transgénico, México, D.F. CIMMYT. 48-57.

Li W., Wang K., Chen L., Johnson J.A., y Wang S. 2015. Tolerance of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae) to heated controlled atmosphere treatments. Journal of Stored Products Research. 62: 52-57.

Marra F., Zhang L., y Lyng J. 2009. Radio frequency treatment of foods: Review of recent advances. Journal of Food Engineering 91: 497–508.

Martin, G. 2008. Factors that affect power and uniformity of heating in microwave ovens. Proceedings of 42nd Symposium of IMPI, New Orleans, LA, p. 24.

Mason, L.J. y Strait, C.A. 1998. Stored product integrated pest management with extreme temperatures. In: Temperature Sensitivity in Insects and Application in

Integrated Pest Management, ed. G. J. Hallman, and D. L. Denlinger, 141–176. Boulder, CO: Westview Press.

Metaxas A.C. y Meredith R.J. 1993. Industrial Microwave Heating. London: Peter Peregrinus Ltd. Pp. 5-24.

Mitcham E.J., Veltman R.H., Feng X., de Castro E., Johnson J.A., Simpson T.L., Biasi W.V., Wang S., y Tang J. 2004. Application of radio frequency treatments to control insects in in-shell walnuts. *Postharvest Biology Technology* 33(1): 93-101

Mohsenin, N.N., 1986. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. Gordon and Breach Science Publishers, New York.

Moreira, M. y J. Maldonado. 1986. Biología de *Sitotroga cerealella* Oliver (Lepidoptera: Gelechiidae) palomilla de los cereales almacenados en Venezuela. *Agronomía Tropical*. 35(1-3):117-124.

Moreno-Martinez, E., Jiménez, S., y Vázquez, M.E., 2000. Effect of *Sitophilus zeamais* and *Aspergillus chevalieri* on the oxygen level in maize stored hermetically. *Journal Stored Products Research*. 36 (1): 25-36.

NMX-FF-034/1-SCFI-2002. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano-Cereales - Maíz (*Zea mays* L.). Especificaciones y métodos de prueba. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 11 de agosto de 1995.

Nelson, S. O. 1991. Dielectric properties of agricultural products. Measurements and applications. *IEEE Transactions on Electrical Insulation* 26 (5):845–869.

Nuss, E.T., y S.A. Tanumihardjo, 2010. Maize: a paramount staple crop in the context of global nutrition. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 9: 417–436.

Patlán González J.S.J. 2015. Tratamiento asistido con microondas como propuesta para desinfestación poscosecha en maíz. Universidad de Guanajuato. Irapuato, Gto., México. Tesis de licenciatura. Ingeniería en alimentos.

Pérez Salazar, O.E y Pacheco Flores, S.A. (2002). Determinación del ciclo biológico de Sitotroga cerealella olivier hospedero facticio de Trichogramma pretiosum Riley, en la cría comercial del Centro de Investigación y Reproducción de Controladores Biológicos de la UNAN-León. Tesis de Ingeniería, Universidad Nacional Agraria, UNA.

Plagas de importancia económica en México: Aspectos de su biología y ecología. INIFAP 2013, disponible en: http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/bitstream/handle/123456789/4069/CIRPA_C_010106185000052663.pdf?sequence=1. 10 deAbril 2016

Pingali P.L 2001, Meeting world maize needs: technological opportunities and priorities for the public sector. International Maize and Wheat Improvement Center.

Piyasena, P., Dussault, C., Koutchma, T., Ramaswamy, H. S., y Awuah, G.B.. 2003. Radio frequency heating of foods: Principles, applications and related properties—A review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 43(6):587–606.

Purohit, P., Jayas, D. S., Chelladurai, V., Fields, P. G. y White, N. D. G. 2013. Microwaves to control *Callosobruchus maculatus* in stored mung bean (*Vigna radiata*). Journal of Stored Products Research. 53: 19-22.

Richarson P. 2001. Thermal Technologies in Food Processing. Boca Ratón, FL: CRC Press, Chapter 9.

Ruiz Corral, J.A., Durán Puga, N., Sánchez González, J.J., Ron Parra, J., González Euiarte, R., Holland, J.N., y Medina García, G., 2008. Climatic adaptation and ecological descriptors of 42 Mexican races. Crop Science. 48: 1502–1512.

SAGARPA 2016. Producción de maíz blanco y amarillo en México. <http://www.gob.mx/sagarpa/articulos/maiz-blanco-y-amarillo-alimentacion-e-industria>. 20 de abril 2016.

Salinas-Moreno Y., y Aguilar-Modesto L. (2010). Efecto de la dureza del grano de maíz (*Zea mays L.*) sobre el rendimiento y calidad de la tortilla. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas* 2(1): 5-11.

Sánchez G., J. J. 2011. Diversidad del maíz y teocintle. Informe preparado para el proyecto global "Recopilación, generación, actualización y análisis de información acerca de la diversidad genética de maíces y sus parientes silvestres en México", de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 98 p. Manuscrito

Sánchez G. J. J., L. de la Cruz L., R. Miranda M., F. J. Santana M., J. Ron P., V. H. Ramos O., J. M. Hernández C., J. A. Ruiz C., F. Aragón C., S. Ramírez V., N. Gómez M., J. Cañedo C., V. A. Vidal M., S. Taba, Víctor Chávez T. y M. Rivas. 2008. Distribución geográfica del teocintle (*Zea spp.*) en México y situación actual de las poblaciones. Informe final. Proyecto global de maíces nativos y sus parientes silvestres. CONABIO-INE-INIFAP. México, D. F. 50 p.

Sánchez M., Figueroa Cárdenas J. D., Taba S, Reyes Vega M. L., Rincón Sánchez F. y Mendoza Galván A. 2004. Caracterización de accesiones de maíz por calidad de grano y tortilla. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 27: 213-222.

Sánchez J, J., M. M. Goodman y C. W. Stuber. 2000. Isozymatic and morphological diversity in the Races of maize of México. *Economic Botany*. 54(1): 43-59.

Servicio Nacional de Sanidad Agroalimentaria (SENASA) 2010. *Sitotroga cerealella*. SENASA. <http://www.sinavimo.gov.ar> (26 de julio de 2012).

SIAP 2008. Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Disponible en: <http://www.siap.gob.mx/>

SIAP 2011. Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Disponible en: <http://www.siap.gob.mx/>

SIAP 2016. Atlas agroalimentario disponible en: http://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2016/Atlas-Agroalimentario-2016

Sosa-Morales M.E., Tiwari G., Wang S., Tang J., Garcia H.S., y López-Malo A. 2009. Dielectric heating as a potential post-harvest treatment of disinfesting mangoes, Part II: Development of RF-based protocols and quality evaluation of treated fruits. *Biosystems Engineering* 103: 287–296.

Sosa-Morales M.E., Valerio-Junco L., López-Malo A., y García H.S. 2010. Dielectric properties of foods: Reported data in the 21st Century and their potential applications. *LWT - Food Science and Technology*. 43: 1169-1179

Sosa-Morales M.E., Villa-Rojas R., Rojas-Laguna R., y López-Malo A. 2015. RF Deinfestation (Pest Control) of Agricultural Products. En *Radio-Frequency heating in food processing (337-351)*. Washington, USA: Taylor and Francis group.

Soto-Reyes N., Temis-Pérez A.L., Lopez-Malo A., Rojas-Laguna R., y Sosa-Morales M.E. 2015. Effects of Shape and Size of Agar Gels on Heating Uniformity During Pulsed Microwave Treatment. *Journal of Food Science*. 80 (5): E1021-E1025.

Tang J. y Wang S. 2007. Fundamental heat transfer theory for thermal treatments. *Heat treatments for postharvest pest control (27, 28, 41)*. Washington, DC. CABI.

Torrealba Meléndez, R., Sosa Morales M.E., Olvera Cervantes J.L., y Corona Chávez A. 2015. Dielectric properties of cereals at frequencies useful for processes with microwave heating. *Journal Food Science and Technology*. 52 (12):8403–8409.

USEPA, 2001. Protection of stratospheric ozone: process for exempting quarantine and preshipment applications of methyl bromide. Rules Regulation and Federation Register. 66 (139): 37752-37769.

Vadivambal, R., Jayas, D. S. and White, N. D. G. 2007. Wheat disinfestation using microwave energy. *Journal of Stored Products Research* 43: 508-514.

Vadivambal, R., Jayas, D. S. y White, N. D. G. 2008. Determination of mortality of life stages of *tribolium castaneum* in rye using microwave energy. The Canadian Society for Bioengineering. La Société Canadienne de Génie Agroalimentaire et de Bioingénierie Paper No. 08-132: 1-10.

Vadivambal, R., Deji, O.F., Jayas, D.S., and White, N.D.G. 2010. Disinfestation of stored corn using microwave energy. *Agriculture and biology journal of North America*. 1(1): 18-26.

van Heerwaarden, J., J. Doebley, W. H. Brings, J. C. Glaubitz, M. M. Goodman, J. J. Sánchez G. y J. Rosslbarra. 2011. Genetic signals of origin, spread, and introgression in large sample of maize landraces. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108(3):1088-1092.

Vearasilp S., Thanapornpoonpong S., Krittigamas N., Suriyong S., Akaranuchat P., y Hörstenc D. 2015. Vertical operating prototype development supported radio frequency heating system in controlling rice weevil in milled rice. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 5: 184 – 192.

Wang, S., Tang, J., y Cavalieri, R. 2001. Modeling fruit internal heating rates for hot air and hot water treatments. *Postharvest Biology and Technology* 22(3): 257-270.

Wang, S., y Tang, J. 2001. Radio frequency and microwave alternative treatments for nut insect control: a review. *International Agricultural Engineering Journal* 10: 105-120.

Wang, S., Ikediala, J.N., Tang, J., Hansen, J.D., Micham, E., Mao, R., y Swanson, B. 2001. Radio frequency treatments to control codling moth in in-shell walnuts. *Postharvest Biology and Technology* 22 (1):29-38.

Wang, S., Ikediala, J., Tang, J., y Hansen, J.D. 2002. Thermal death kinetics and heating rate effects for 5th instar *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal Stored Products Research* 38:441-453.

Wang, S., Tang, J., Cavalieri, R. P., y Davis, D.C. 2003a. Differential heating of insects in dried nuts and fruits associated with radio frequency and microwave treatments. *Transactions of the ASAE* 46(4):1175–1182.

Wang, S. y J. Tang. 2004. Radio frequency heating: A potential method for post-harvest pest control in nuts and dry products. *Journal of Zhejiang University SCI* 5(10):1169–1174

Wang S., Monzon M., Johnson J.A., Mitcham E.J., y Tang J., 2007a. Industrial-scale radio frequency treatments for insect control in walnuts: I. Heating uniformity and energy efficiency. *Postharvest Biology and Technology* 45(2): 240-246.

Wang S., Monzon M., Johnson J.A., Mitcham E.J., y Tang J., 2007b. Industrial-scale radio frequency treatments for insect control in walnuts: II. Insect mortality and product quality. *Postharvest Biology Technolonoly* 45(2): 247-253.

Wang S., Johnson J.A., Hansen J.D., Tang J. 2009. Determining thermotolerance of fifth-instar *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae) and *Amyelois transitella* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae) by three different methods. *Journal of Stored Products Research* 45 (2009) 184–189.

Wang S., Tiwari G., Jiao S., Johnson J., y Tang J. 2010. Developing postharvest disinfestation treatments for legumes using radio frequency energy. *Biosystems Engineering* 105: 341–349.

Wang S., Tang J., Johnson J., y Cavalieri R.P. 2013. Heating uniformity and differential heating of insects in almonds associated with radio frequency energy. *Journal of Stored Products Research* 55: 15-20.

Wellhausen, E. J., L. M. Roberts, E. Hernández X. En colaboración de P. C. Mangelsdorf. 1951. Razas de maíz en México. Su origen, características y distribución. Oficina de Estudios Especiales-Secretaría de Agricultura y Ganadería. Folleto técnico Núm. 55. México D. F.

Wilkes, H. G. 1977. Hybridization of maize and teosinte, in México and Guatemala and the improvement of maize. *Economic Botany* 31:254-293.

Zhang H., y Datta A.K. 2001. Electromagnetics of microwave heating: Magnitude and uniformity of energy absorption in an oven. In *Handbook of Microwave Technology for Food Application*. A.K. Datta and R.C. Anantheswaran (eds.), New York Marcel Dekker, pp.1-28.