

<https://doi.org/10.23913/ride.v12i23.1017>

Artículos científicos

Determinación de la vida útil de la tortilla de maíz adicionada con aceite esencial de tomillo a través de pruebas de vida acelerada

***Determination of Useful Life on Corn Tortilla Added with Thyme Essential
Oil Through Accelerated Life Test***

***Determinação da vida útil de tortilla de milho adicionada com óleo
essencial de tomilho por meio de testes de vida acelerada***

Inocente Yuliana Meléndez Pastrana

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, México
Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez, México

yuliana.mp@cdjuarez.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0002-5260-7977>

Manuel Alonso Rodríguez Morachis

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, México

mmorachis@itcj.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-1581-7737>

Manuel Arnoldo Rodríguez Medina

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, México

manuel_rodriguez_itcj@yahoo.com

<https://orcid.org/0000-0003-1676-0664>

Francisco Zorrilla Briones

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, México

fzorrilla@itcj.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-0553-9841>



Resumen

La tortilla de maíz es uno de los principales componentes en la dieta del mexicano. En el proceso de elaboración, se emplean diferentes conservadores químicos, como el propionato de sodio y algunos acidificantes para incrementar la vida de anaquel de la tortilla de maíz. En México, al no haber una regulación bien definida sobre la adición de conservadores químicos, no existe protección hacia el consumidor. De aquí que esta investigación propone la adición de aceite esencial de tomillo como bioconservador. La metodología utilizada consistió en dos experimentos por separado: uno utilizando una concentración de 0.09 % de aceite esencial de tomillo y otro utilizando propionato de sodio a 0.2 %. Así, usando el modelo de Arrhenius, se calculó la vida útil de la tortilla de maíz adicionada con aceite esencial de tomillo a 21 °C y se encontró que fue de 104.3356 horas, mientras que para la tortilla adicionada con propionato de sodio, bajo las mismas condiciones, se obtuvo una vida de 75.3300 horas. Asimismo, mediante el factor de aceleración, se obtuvo un mejor desempeño del aceite esencial de tomillo como conservador orgánico, en contraste con el propionato de sodio. En suma, no solo mejora la inocuidad alimentaria del producto en cuanto a su vida de anaquel, sino que el aceite esencial de tomillo puede reemplazar a un conservador cancerígeno en la preparación de tortillas de maíz.

Palabras clave: aceite esencial de tomillo, confiabilidad, modelo Arrhenius-Weibull, relación Arrhenius, tortilla de maíz, vida útil.

Abstract

The corn *tortilla* is one of the main components in the Mexican diet. In the manufacturing process, different chemical preservatives are used, such as sodium propionate and some acidifiers to increase the shelf life of the corn *tortilla*. In Mexico, as there is no well-defined regulation on the addition of chemical preservatives, there is no consumer protection. Hence, this research proposes the addition of thyme essential oil as a bioconservative. The methodology used consisted of two separate experiments: one using a concentration of 0.09 % of thyme essential oil and the other using 0.2 % sodium propionate. Thus, using the Arrhenius model, the useful life of the corn tortilla added with thyme essential oil at 21 °C was calculated and it was found to be 104.3356 hours, while for the tortilla added with sodium propionate, under the Same conditions, a life of 75.3300 hours was obtained. Likewise, through the acceleration factor, a better performance of thyme essential oil was

obtained as an organic preservative, in contrast to sodium propionate. In sum, not only does it improve the food safety of the product in terms of its shelf life, but thyme essential oil can replace a carcinogenic preservative in the preparation of corn tortillas.

Keywords: thyme essential oil, reliability, Arrhenius-Weibull model, Arrhenius ratio, corn tortilla, shelf life.

Resumo

A tortilha de milho é um dos principais componentes da dieta mexicana. No processo de fabricação, são utilizados diversos conservantes químicos, como o propionato de sódio e alguns acidificantes, para aumentar a vida útil da tortilha de milho. No México, como não existe uma regulamentação bem definida sobre a adição de conservantes químicos, não há proteção ao consumidor. Assim, esta pesquisa propõe a adição de óleo essencial de tomilho como bioconservador. A metodologia utilizada consistiu em dois experimentos distintos: um utilizando uma concentração de 0,09% de óleo essencial de tomilho e outro utilizando propionato de sódio 0,2%. Assim, usando o modelo de Arrhenius, a vida útil da tortilha de milho adicionada com óleo essencial de tomilho a 21 ° C foi calculada e encontrada em 104,3356 horas, enquanto para a tortilha adicionada com propionato de sódio, nas mesmas condições, uma vida de 75.3300 horas. Da mesma forma, por meio do fator de aceleração, obteve-se um melhor desempenho do óleo essencial de tomilho como conservante orgânico, ao contrário do propionato de sódio. Em suma, além de melhorar a segurança alimentar do produto em termos de prazo de validade, o óleo essencial de tomilho pode substituir um conservante cancerígeno na preparação de tortilhas de milho.

Palavras-chave: óleo essencial de tomilho, confiabilidade, modelo de Arrhenius-Weibull, razão de Arrhenius, tortilha de milho, vida de prateleira.

Fecha Recepción: Febrero 2021

Fecha Aceptación: Agosto 2021

Introducción

La tortilla de maíz es uno de los alimentos más consumidos por los mexicanos, aunado a otros cuya base también es el maíz, tales como los totopos (triángulos de tortilla de maíz fritos, del náhuatl *totopochtli*), la harina y el aceite de maíz y una gran variedad de frituras, entre otros. La Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (Enigh) estimaba que, al tercer trimestre de 2018, el consumo anual por hogar de tortilla de maíz era de 264.7 kg y por individuo de 74.6 kg (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria [Cedrssa], 2019). La tortilla de maíz es altamente perecedera y es afectada a nivel microbiológico por hongos del género *Aspergillus* (que producen aflatoxinas, micotoxinas que suponen un grave peligro para la salud humana) (Wall *et al.*, 2019). Por esta razón, dentro del proceso de elaboración de la tortilla, se utilizan diferentes productos químicos para mejorar su apariencia, sabor y durabilidad. Y en esa línea, el propionato de sodio es uno de los conservadores más utilizados, cuyos efectos nocivos en la salud (obesidad, diabetes, entre otras enfermedades) han sido registrados en diferentes publicaciones (Darwiche *et al.*, 2001; Hoseinifar, Safari y Dadar, 2017; Türkoğlu, 2008; Zengin, Yüzbaşıoğlu, Unal, Yılmaz y Aksoy, 2011). Es aquí donde surge el interés de investigar, desarrollar y aplicar un conservador de alimentos de origen natural que sea seguro, eficiente y económico. Asimismo, esta investigación pretende difundir la importancia de modelos de confiabilidad para que sean considerados en los planes de estudio en las instituciones de educación superior, donde sea pertinente, con la finalidad de aplicarlos en el análisis de vida útil de diversos productos.

Las propiedades de los aceites esenciales derivados de las plantas han sido reconocidas empíricamente durante siglos, pero científicamente confirmadas solo recientemente. En efecto, recientemente se ha encontrado que pueden ser utilizados como agentes antimicrobianos y antioxidantes en los productos alimenticios tanto para prolongar su vida útil como para mantener y potenciar su calidad y características organolépticas (Regnier *et al.* 2012; Smith *et al.* 2001). Hoy en día la preocupación por consumir alimentos saludables y naturales, libres de aditivos y conservantes químicos, ha incrementado. En esta investigación se evaluó el aceite esencial de tomillo como conservador en la tortilla de maíz para contrastar su eficiencia con respecto al propionato de sodio.

La calidad es la certeza de que un producto satisface las necesidades, gustos y preferencias del consumidor y la confiabilidad es aquella que garantiza que el producto

permanece en buenas condiciones durante cierto periodo de tiempo (en nuestro caso, inocuidad alimentaria). Inevitablemente, por la necesidad de actualizarlos continuamente, la industria de alimentos procesados se ha envuelto en la dinámica de determinar la vida útil, fecha de consumo preferente y de caducidad, entre otros, de sus productos, ya que una fecha mal estimada implica mermas o pérdidas monetarias (Acuña, 2003). Corradini (2018) indica que hay un determinado tiempo, después de haber elaborado el producto, en el que se mantienen sus propiedades sensoriales y de seguridad, bajo determinadas condiciones de almacenamiento. Así, la calidad es independiente de la confiabilidad, es decir, saber si un producto funcionará a lo largo de un periodo de tiempo es una cuestión de probabilidad.

Un producto confiable es un producto que cumple su función en todo momento, bajo todas las condiciones operativas. Cabe señalar que la definición técnica para *confiabilidad* difiere ligeramente de la hasta aquí tratada, ya que solo añade el factor de probabilidad: la confiabilidad es la probabilidad de que un producto no falle bajo condiciones ambientales y funcionales dadas durante un período de tiempo definido (Nelson, 2004). La confiabilidad se evalúa mediante pruebas de vida, las cuales se realizan de dos modos distintos: estándar o acelerado. En el caso del modo estándar, los ensayos se llevan a cabo con parámetros de funcionamiento normales y a temperatura ambiente; además, el tiempo de funcionamiento actual se considera como el tiempo de prueba. En el caso de la modalidad acelerada, parámetros como el voltaje, la temperatura, la humedad y la presión, entre otros, son variados por encima de los valores normales para reducir el tiempo de la prueba, o la prueba podría ser simplemente una de muerte súbita (Zio, 2009).

Fundamentos teóricos

En esta sección se presentan los fundamentos teóricos que soportan la metodología utilizada en esta investigación. En la sección de introducción se plasmó lo más relevante y actual respecto al marco referencial pertinente.

Modelo para la degradación cinética

El deterioro de los alimentos sigue modelos de orden cero o primer orden. Dichos modelos cinéticos son dependientes de la temperatura, por lo tanto, el aumento de las temperaturas de almacenamiento tiene un efecto de aceleración sobre el deterioro del producto (Clancy et al 2016; Haldimann *et al.*, 2013; Peleg, 2019; Van Boekel, 1996). El modelo para la reacción de orden cero se presenta en la ecuación 1.

$$-\frac{dX}{dt} = k \quad (1)$$

Integrando la ecuación 1, se tiene la ecuación de una línea recta con pendiente k . Cabe señalar que aquí k es la constante específica de reacción, cuyo valor depende de la temperatura.

$$X_F = X_0 - k_{tu} \quad (2)^1$$

La ecuación 2 explica matemáticamente la relación entre la temperatura y la degradación de un alimento, esto es, existe una relación entre la temperatura a la que se almacena un alimento y la rapidez con que se descompone.

Relación de Arrhenius

De acuerdo con Peleg et al (2012), la relación de vida-esfuerzo (vida-estrés) de Arrhenius es extensamente usada como una función de la temperatura. Cuando las fallas son aceleradas como resultado de un incremento en la temperatura, este enfoque, basado en el modelo Arrhenius (Ebeling, 2010), es usado para describir la relación entre la tasa de una reacción química y la temperatura (Rodríguez y Santos, 2008).

$$k = Ae^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} \quad (3)$$

En este caso, k es la constante de velocidad de reacción, R es la constante de los gases ideales, $8.314472 \frac{J}{mol \cdot K}$, E_a es la energía de activación en $\frac{J}{mol}$, T es la temperatura absoluta en grados Kelvin, A es el factor pre exponencial característico del mecanismo de falla del producto cuyas unidades son iguales a la de la constante de velocidad. Así, el tiempo nominal de falla τ (vida) es inversamente proporcional a la tasa de falla (Pascual, 2009). Esto produce la relación de vida de Arrhenius.

¹ X_0 ordenada al origen.

$$\tau = A \exp[E_a/(RT)] \quad (4)$$

La ecuación de la línea recta se obtiene aplicando el logaritmo a la ecuación 3:

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (5)$$

La relación de Arrhenius es altamente utilizada para explicar y calcular la velocidad en la que un producto cualquiera pierde funcionalidad cuando es “estresado”. En ingeniería de confiabilidad, se entiende el *estrés* como la acción de someter un producto a condiciones que de antemano se sabe le son adversas, esto es, si le afecta la temperatura, humedad, vibración, amperaje, voltaje, por poner algunos ejemplos, se utiliza entonces esa variable para acelerar su desgaste, su fallo. En otras palabras, no se tiene que esperar, por poner un ejemplo más, a que un alimento se descomponga en 20 días; si se “estresa” con una alta temperatura, en un periodo corto de tiempo (horas), se puede provocar su descomposición y, a través de estos planteamientos matemáticos, se puede entonces pronosticar el momento de su fallo real.

Modelo Arrhenius-Weibull

Continuando con la explicación del párrafo anterior, para realizar ese pronóstico de falla se requiere primordialmente conocer cuál es la distribución de probabilidad que siguen los datos de vida útil, esto es, los datos obtenidos de las distintas muestras cuando fueron sometidas a condiciones extremas (estresantes) de operación. En este caso, la vida útil de la tortilla de maíz es afectada por la temperatura de almacenamiento, y de acuerdo con los datos observados, la distribución de probabilidad estimada corresponde a la Weibull. El tratamiento matemático para este caso se muestra a continuación.

Dahlquist *et al.* (2016) y Ahmadini y Coolen (2019) mencionan que la vida útil de un producto puede describirse con una distribución de Weibull. Los supuestos del modelo Arrhenius-Weibull son:

- A una temperatura absoluta T_a , la vida del producto tiene distribución Weibull; el logaritmo natural de la vida tiene una distribución de valores extremos.
- El parámetro de forma β es una constante independiente de la temperatura; la distribución del valor extremo del logaritmo natural de la vida tiene un parámetro de escala constante $\delta = 1/\beta$.

- El logaritmo natural de la vida en Weibull es una función lineal de la inversa de la temperatura.

$$\ln[\alpha(T)] = \gamma_0 + \left(\gamma_1/T\right) \quad (6)$$

Los parámetros γ_0 , γ_1 y β son característicos del producto $\alpha(T)$ se expresa como una línea recta en la relación de Arrhenius y líneas de percentiles de Weibull mostrado en la ecuación 6.

La confiabilidad de un dispositivo se define como la probabilidad de que ese dispositivo realice su función por al menos un tiempo determinado bajo ciertas condiciones (Yin et al 2017). La función de densidad de probabilidad ajustada a Arrhenius se expresa en la ecuación 7:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (7)$$

Factor de aceleración

El factor de aceleración se refiere a la relación de la vida entre el nivel de uso y un nivel de estrés más alto (temperatura de estrés), tal como lo muestra la ecuación 8 (Pina et al 2015).

$$A_f = e^{\left[\left(\frac{E_a}{R}\right)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T'}\right)\right]} \quad (8)$$

La metodología del factor de aceleración (A_f) es una alternativa para estimar el número de veces que un producto sobrevive respecto a su rango normal de operación, entre una referencia y otra, por ejemplo, a una temperatura ambiente y a una temperatura muy superior.

Método

Se utilizó harina de maíz comercial nixtamalizada (la nixtamalización del maíz es un proceso precolombino que consiste en cocer el grano de maíz en una solución alcalina usando hidróxido de calcio [Castillo et al, 2009]), aceite esencial de tomillo y agua purificada (agua libre de impurezas hasta un grado imperceptible). La masa se elaboró mezclando 100 g de harina de maíz con 160 ml de agua purificada y adicionando aceite esencial (por cada 100

gramos de harina, se agregaron 90 microlitros de aceite esencial). La mezcla se amasó hasta no observar presencia de grumos en la masa.

Siguiendo la metodología de la patente de Martínez et al (1996), se elaboraron discos de masa con las siguientes características y condiciones aproximadas (variables de entrada o independientes): 45 g de masa para cada disco, que fueron prensados en una prensa manual, y se obtuvieron tortillas con dimensiones de un diámetro de 15 cm y un espesor de 2 mm, que son las medidas estándar en el mercado local. Las tortillas se cocinaron en una plancha caliente a una temperatura de 200 °C. Cada tortilla se cocinó por 25 segundos por un lado y 26 segundos del otro lado hasta inflar y formar la ampolla por el primer lado, indicativo del buen cocimiento de la tortilla y de su calidad. Posteriormente, las tortillas se enfriaron a temperatura ambiente por 31 min y se empacaron en bolsas de polietileno. Las tortillas se almacenaron a 25 °C, 30 °C, 35 °C y 40 °C. La vida útil de las tortillas se calculó de acuerdo con el procedimiento utilizado por Islam et al (1984) y Martínez et al (2004). Para estos autores la referencia es el tiempo en que las tortillas se mantienen sin mostrar rastros aparentes de hongo (variable de salida del proceso). Se preparó un control sin adicionar aditivos a la masa. Además, se prepararon tortillas adicionadas con propionato de sodio a 0.2 % para contrastar la eficiencia. Las tortillas obtenidas se empacaron y almacenaron en las mismas condiciones que las tortillas con aceite esencial de tomillo.

Resultados

Se realizaron las pruebas de estrés a diferentes temperaturas de almacenamiento utilizando un equipo de incubación automático marca Hertherm modelo 50125590. Los tiempos de vida de la tortilla de maíz adicionada con aceite esencial de tomillo a 0.09 % (parámetro de salida o medible de vida útil en horas) se muestran en la tabla 1. Se utilizó el *software* Minitab versión 17 para el manejo y análisis de la información. Se utilizó un arreglo unifactorial en cuatro niveles: 25 °C, 30 °C, 35 °C y 40 °C, con diez réplicas en cada nivel.

Tabla 1. Datos de vida de la tortilla de maíz adicionada con aceite esencial de tomillo sometida a diferentes temperaturas

	Temperatura			
	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C
Vida (horas)	84	78	60	36
	72	60	48	48
	84	78	66	40
	78	72	60	44
	78	54	66	44
	90	72	60	44
	84	72	60	36
	90	78	48	40
	84	78	60	44
	84	60	54	36

Fuente: Elaboración propia

Luego de realizar la prueba de normalidad a los datos mostrados en la tabla 1 y de someterlos a la prueba de Kolmogorov-Smirnov, se obtuvo un valor p de 0.053, lo que indica que los datos muestran estadísticamente un comportamiento normal.

Aunado a lo anterior, se realizó un análisis de varianza (Anova) de un solo factor; aquí la respuesta es la vida en horas de la tortilla hasta que muestra presencia visible de hongo y el factor es la temperatura en cuatro niveles (25 °C, 30 °C, 35 °C y 40 °C). Los resultados de la Anova se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Análisis de varianza de un solo factor para tortillas de maíz estresada a diferentes temperaturas

Fuente	GL	SC ajust.	MC ajust.	Valor F	Valor p
Temperatura (°C)	3	9421	3140.40	74.26	0.000
Error	36	1522	42.29		
Total	39	10944			

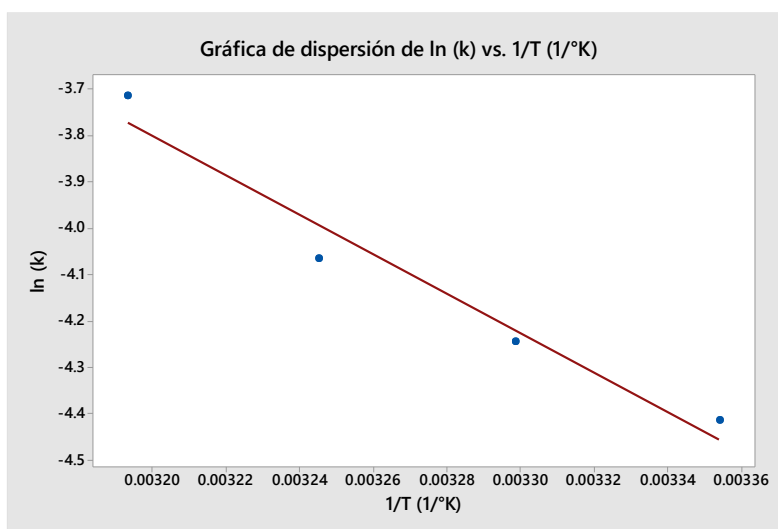
Fuente: Elaboración propia

El valor p calculado es menor a 0.05, lo que indica que la temperatura es significativa con respecto al tiempo de vida de la tortilla. Con un coeficiente de determinación R^2 de 86.09 % y un R^2 ajustado de 84.93 %, se puede decir que se tiene buen ajuste lineal.

Puesto que la constante de velocidad de reacción es función de la temperatura, esta dependencia es descrita por la relación de vida de Arrhenius. Al aplicar los logaritmos, se obtiene la ecuación de una línea recta con pendiente E_a/R , además de los valores de β_0 y β_1 .

Para las cuatro temperaturas de estrés se aplicó el modelo de Arrhenius, tal y como se expresa en la ecuación 3, aplicando logaritmos a ambos lados de la ecuación, gracias a lo cual se obtuvo la figura 1 (Minitab) del $\ln(k)$ en función a $1/T$.

Figura 1. Gráfico del $\ln(k)$ en función de $1/T$



Fuente: Elaboración propia

La ecuación de regresión lineal simple que se obtiene permite estimar la vida útil de la tortilla maíz adicionada con aceite esencial de tomillo para diferentes temperaturas de almacenamiento, expresada en la ecuación 9:

$$\ln(k) = 9.7848 - 4245.3 \, 1/T \, (1/^\circ\text{K}) \quad (9)$$

Con un coeficiente de determinación R^2 de 95.90 % y un R^2 ajustado de 93.86 %, se puede decir que existe un buen ajuste lineal. La energía de activación es la energía mínima necesaria para que se produzca una reacción química. Datos teóricos reportados por Vega et al (2006) sugieren que, para la harina de maíz, se tiene una energía de activación promedio de 8.2480 kcal/mol. En nuestro caso, dado que $E_a/R = \beta_1$, y $\ln(A) = \beta_0$:

$$E_a = (4245.3) (1.987 \times 10^{-3}) = 8.4354 \text{ kcal/mol}$$

Si consideramos que la referencia corresponde a un estudio reportado en Brasil, los resultados son aceptablemente similares. A continuación tenemos que:

$$A = e^{-9.7848} = 5.630090 \times 10^{-5}$$

Sustituyendo valores en la ecuación 4, se obtiene la vida media a 21 °C.

$$k = 5.630090 \times 10^{-5} e^{\left(\frac{8.4354}{(1.987 \times 10^{-3})(294.15)}\right)} = 104.3356 \text{ horas}$$

El tiempo pronosticado de vida para la tortilla de maíz adicionada con aceite esencial de tomillo a 0.09 % a una temperatura de 21 °C es de 104 horas.

Por otra parte, realizando el mismo análisis para las tortillas adicionadas con propionato de sodio, considerando que $E_a/R = \beta_1$, y $\ln(A) = \beta_0$, tenemos lo siguiente:

$$E_a = (3216.4) (1.987 \times 10^{-3}) = 6.3910 \text{ kcal/mol}$$

$$A = e^{-6.6127} = 1.3432 \times 10^{-3}$$

Sustituyendo valores en la ecuación, se obtiene la vida media a 21 °C.

$$k = 1.3432 \times 10^{-3} e^{\left(\frac{6.3910}{(1.987 \times 10^{-3})(294.15)}\right)} = 75.33 \text{ horas}$$

De aquí que 73 horas es el tiempo pronosticado de vida para la tortilla de maíz adicionada con propionato de sodio a 0.2 % a una temperatura de 21 °C.

También se estima el factor de aceleración (cuántas veces dura más el producto a 21 °C que a 40 °C) para las tortillas con aceite esencial de tomillo:

$$A_f = e^{\left[\left(\frac{E_a}{R}\right)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T'}\right)\right]} = e^{\left[\left(\frac{8.4354}{1.987 \times 10^{-3}}\right)\left(\frac{1}{21+273.15} - \frac{1}{40+273.15}\right)\right]} = 2.40048$$

Así, una tortilla de maíz se mantiene sin crecimiento visible de hongo 2.4 veces más tiempo a 21 °C que a 40 °C. En otras palabras, si una tortilla muestra presencia visible de hongos después de una hora a los 40 °C, la vida útil de la tortilla será de 2.4 horas a los 21 °C. De manera similar, si una tortilla no muestra presencia visible de hongos en una hora a 40 °C, la tortilla sobrevivirá 2.4 horas a los 21 °C.

Asimismo, se calculó la vida útil de la tortilla adicionada con propionato de sodio a 0.2 % y se estresó bajo las mismas condiciones que la tortilla adicionada con aceite esencial de tomillo a 0.09 %, la comparación de los tiempos de vida útil de las tortillas adicionadas

con aceite esencial de tomillo y propionato de sodio a diferentes temperaturas de almacenamiento se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Predicción del tiempo de vida útil de la tortilla de maíz adicionada con aceite esencial de tomillo a 0.09 % y tortilla de maíz adicionada con propionato de sodio a 0.2 %

	Aceite esencial de tomillo a 0.09 %	Propionato de sodio a 0.2 %
Temperatura (°C)	Tiempo de vida útil (horas)	Tiempo de vida útil (horas)
15	140.9142	115.2023
20	109.6029	94.5926
25	85.9706	78.1940
28	74.6015	69.9686
30	67.9762	65.0524
35	54.1594	52.4488

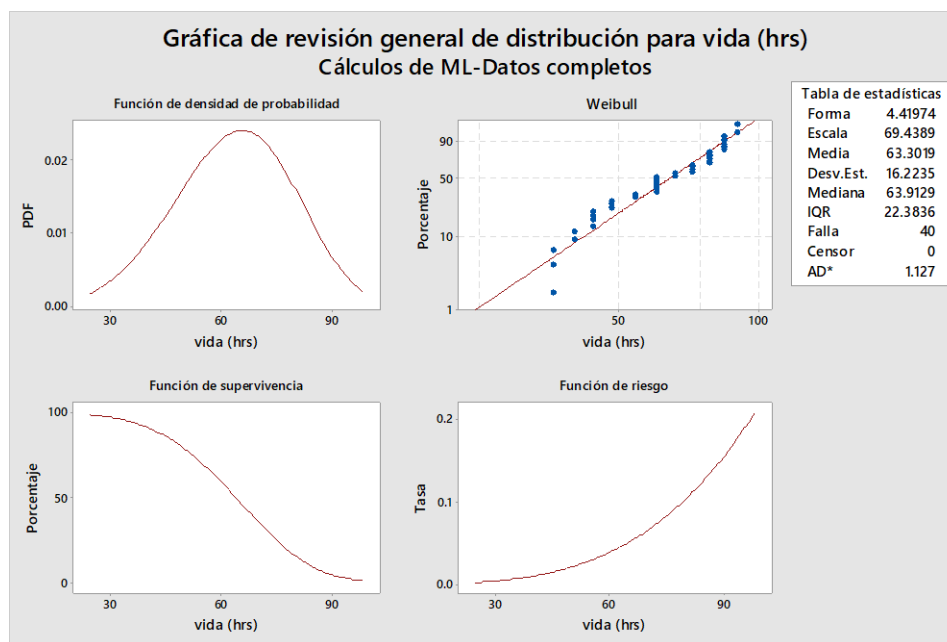
Fuente: Elaboración propia

Es importante tener en cuenta que la industria utiliza conservadores químicos por tres razones. En primer lugar, no existe una regulación clara respecto a la cantidad máxima a utilizar en los productos elaborados. La norma mexicana deja todo a la “buenas prácticas de manufactura”, a pesar de la vasta literatura que identifica a estos conservadores como cancerígenos. En segundo lugar, estos conservadores químicos, tales como el propionato de sodio, son muy baratos, lo que invita a su uso indiscriminado. Por último, son pocos los estudios que proponen el uso de bioconservadores, como los aceites esenciales. Especialmente, en tortilla de maíz no existe literatura en donde se apliquen aceites esenciales como conservadores.

Modelo Arrhenius-Weibull

Con los datos de vida en horas obtenidos y con el *software* Minitab se obtuvo la gráfica general de distribuciones mostrada en la figura 2.

Figura 2. Revisión general de distribución para la vida en horas de la tortilla de maíz adicionada con aceite esencial de tomillo a 0.09 % estresada a diferentes temperaturas



Fuente: Elaboración propia

β es el parámetro de forma con un valor de 4.41974. Así, sustituyendo los valores en la ecuación 7 y tomando como ejemplo la probabilidad de que la tortilla dure tres días a 21 °C, se obtiene el siguiente resultado:

$$f(\text{falla a 72hrs}) = \frac{4.41974}{104.3356} \left(\frac{72}{104.3356} \right)^{4.41974-1} e^{-\left(\frac{72}{104.3356} \right)^{4.41974}}$$

$$f(\text{falla a 72hrs}) = 9.81197 \times 10^{-3}$$

Es decir, la probabilidad de que el producto falle a las 72 horas es 9.81197×10^{-3} . También se calcula la función acumulada de falla, como se muestra en las ecuaciones 7 y 10, junto con el parámetro de forma obtenido de la figura 2, de que el producto viva menos de 72 horas a 21 °C.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^\beta} \tag{10}$$

Sustituyendo valores:

$$F(72 \text{ hrs}) = 1 - e^{-\left(\frac{72}{104.3356}\right)^{4.41974}} = 0.1764$$

La probabilidad de que el producto cumpla satisfactoriamente con la función para la cual fue diseñado se calcula con la función de confiabilidad de la siguiente manera.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (11)$$

Sustituyendo datos:

$$R(72 \text{ hrs}) = e^{-\left(\frac{72}{104.3356}\right)^{4.41974}} = 0.8235$$

Se sabe que la temperatura mínima y máxima de climatización de ambiente en supermercados es de 21 °C a 26 °C. En la tabla 4 se muestran probabilidades de falla calculadas para diferentes temperaturas, así como la función acumulada de falla y la función de confiabilidad.

Tabla 4. $F(t)$ y $R(t)$ a diferentes temperaturas para la tortilla de maíz adicionada con aceite esencial de tomillo a 0.09 %

Temperatura °C	Días	$F(t)$	$R(t)$
21	3	0.17636	0.82363
	4	0.49938	0.50061
	5	0.84356	0.15643
23	3	0.25840	0.74159
	4	0.65564	0.34435
	5	0.94263	0.05736
26	3	0.43197	0.56802
	4	0.86693	0.13306
	5	0.99551	0.00448

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla 4, entre menor es el tiempo y la temperatura, menor es la probabilidad de falla, mientras que la función de confiabilidad disminuye conforme el tiempo y las temperaturas elevadas son mayores.

Estimación de los tiempos de fallo

El modelo para la prueba acelerada ajusta adecuadamente los datos permitiendo dar una buena estimación de la distribución de los tiempos de fallo de una tortilla de maíz adicionada con aceite esencial de tomillo expuesta a 21°C. En la tabla 5 se muestran los cuantiles estimados de dicha distribución.

Tabla 5. Estimación de los tiempos de fallo con intervalos de confianza de 95 %

Porcentaje	Duración estimada (horas)	Intervalo de confianza	
		Inferior	Superior
0.1	73.4212	65.5828	82.1964
0.5	77.8448	70.1155	86.4262
1	80.0853	72.4007	88.5855
5	86.5395	78.9198	94.8948
10	90.1902	82.5502	98.5372
20	100.8176	87.0761	103.247
50	108.342	96.0747	113.321
80	114.824	105.449	125.032
90	120.715	110.489	131.887
95	125.807	114.730	137.954
99	135.946	122.902	150.376

Fuente: Elaboración propia

Si se desea estimar la vida a una temperatura de 21°C, la duración es 104.324 horas aproximadamente. En situaciones reales, se requiere estimar un cuantil que proporcione garantía a los consumidores, por ejemplo, el 90, 95 o 99. En este caso, para el cuantil 95 la duración sería 125.807 horas aproximadamente, lo que quiere decir que existe una probabilidad de 0.95 de que la tortilla muestre presencia visible de hongo (falla).

Discusión

Durante siglos, los aceites esenciales se han utilizado por su potencial antimicrobiano y antioxidante contra una amplia variedad de productos alimenticios. Sin embargo, su aplicación es una tendencia reciente y creciente que refleja el interés del consumidor por adquirir productos con un nivel nutricional elevado, una buena manera para prevenir enfermedades, y hacia la prolongación de la vida útil de los alimentos.

De origen francés, el *Thymus vulgaris*, o mejor conocido como *tomillo*, es un subarbusto de la familia *Lamiaceae* que es perenne y aromático, rico en aceite esencial, cuyo principal componente es el timol; se comercializa principalmente por sus hojas y aceite esencial. El aceite esencial está constituido principalmente por fenoles monoterpénicos, como timol, carvacrol, p-cimeno, gamma-terpineno, limoneno, borneol y linalol. No obstante, se ha de tener en cuenta que la composición del aceite esencial es variable según la época y lugar de la cosecha (Borugă et al, 2014).

El aceite esencial de tomillo tiene un efecto antiséptico y antifúngico superior al del fenol y al del agua oxigenada. De hecho, en el siglo XIX y primera mitad del XX, cuando todavía no se conocían los antibióticos, el tomillo era considerado como un eficaz desinfectante.

En esta investigación se desarrolló un diseño para pruebas de vida acelerada y análisis de confiabilidad a tortillas de maíz adicionadas con aceite de tomillo con el fin de establecer tiempos de garantía convenientes al momento de vender el producto a clientes e impactar en los gastos por garantía y ofrecer un producto libre de aditivos químicos. Una forma de acelerar la vida de un producto es aumentando la temperatura en la que este se encuentra habitualmente. Para extrapolar los resultados de las pruebas de vida acelerada a temperatura nominal, el modelo más utilizado es el de Arrhenius. Así, se construyó un gráfico del $\ln(k)$ en función de $1/T$; el gráfico de Arrhenius arroja una línea recta desde la cual pueden ser determinados tanto la energía de activación como el factor preexponencial. La energía de activación predicha mediante la ecuación de Arrhenius es de 8.43 kcal/mol. La vida útil estimada de la tortilla de maíz adicionada con aceite esencial de tomillo a 15 °C, 25 °C, 30 °C y 35 °C es de 140 días, 85 días, 67 días y 54 días, respectivamente.

Con los tiempos y las temperaturas estudiadas se obtuvo una ecuación general para estimar la vida útil de este producto para diferentes temperaturas de almacenamiento. La ecuación de vida útil establecida permite predecir el comportamiento del producto a las

diferentes condiciones de temperatura que pueden encontrarse en las diferentes regiones del país. La importancia de usar modelos de confiabilidad es que proporcionan bases para seleccionar la estrategia experimental que permite obtener información requerida al costo mínimo, así como la evaluación de los resultados experimentales en la selección de la mejor opción que ofrece más confiabilidad a las conclusiones.

Conclusiones

La vida útil estimada de la tortilla de maíz adicionada con aceite esencial de tomillo a 0.09 % de concentración como conservador a 21 °C es 104.3 horas, aproximadamente. Es relativamente más bajo el tiempo de vida adicionando propionato de sodio a 0.2 %. Cabe destacar que, según la NOM-187-SSA1/SCFI-2002, no existe un límite máximo al agregar propionato de sodio a tortillas de maíz, lo deja a consideración de las buenas prácticas de fabricación del empresario. No existe certeza absoluta de la cantidad de propionato de sodio que llevan las tortillas comerciales.

Con tiempos de vida obtenidos a diferentes temperaturas, se obtuvo la ecuación general para estimar la vida útil de la tortilla de maíz adicionada con aceite esencial de tomillo a 0.09 % para diferentes temperaturas de almacenamiento, la cual está descrita por la ecuación:

$$k = 5.630090 \times 10^{-5} e^{\left(\frac{8.4354}{(1.987 \times 10^{-3})(T)}\right)}$$

La probabilidad acumulada de que el producto viva menos de 72 horas a 21 °C es de $F(t) = 0.1764$ y la probabilidad de que el producto cumpla satisfactoriamente con la función para la cual fue diseñado durante 72 horas a 21 °C es de $R(t) = 0.8235$. Para productos no perecederos, tales como equipos electrónicos, mecánicos, estructurales, entre otros, una confiabilidad de 80 % es considerada aceptable, según la literatura de la ingeniería de confiabilidad, por lo que un nivel de confiabilidad de 82.35 % en un producto perecedero como la tortilla de maíz es muy aceptable.

Por otra parte, la vida útil predicha a una temperatura alta es corta, razón por la que es necesario que se utilice además alguna tecnología de empaque para preservar la vida de las tortillas de maíz. Al igual que muchos otros productos alimenticios, un sistema de enfriamiento es inevitable, como un refrigerador doméstico, por ejemplo, sin embargo, es evidente que este enfriamiento, por sí solo, tiene un efecto positivo mínimo en la conservación del producto.

Futuras líneas de investigación

En esta sección se documentan algunos de los hallazgos encontrados en el desarrollo de esta investigación de manera que sirvan de pauta para futuras investigaciones.

Aún y cuando no es el propósito de esta investigación, se ha encontrado una fuerte carencia de contenidos programáticos, a nivel licenciatura y maestría, del concepto y aplicación de la *ingeniería de confiabilidad*, por lo que es menester difundir las potencialidades de estas herramientas entre la comunidad académica y profesional, ya que es un medio muy efectivo para desarrollar nuevo conocimiento.

En esta investigación solo se utilizó la variable temperatura como el medio estresante para acelerar las pruebas de vida, sin embargo, es importante, para futuras investigaciones, considerar otras variables tales como la luz, la humedad, el pH, etcétera, de manera que la operación degradante sea más integral.

De la misma manera, deben considerarse otros materiales derivados del maíz, tales como los totopos, tortilla tostada, harinas preparadas, etcétera.

Un elemento que puede ser importante considerar, a pesar de que no se encontró un sabor perceptible al aceite de tomillo, es un análisis sensorial, principalmente si se extrapolan estos resultados a otros aceites esenciales, tales como el de hierba de limón, clavo, etcétera.

Aunque no se incluyeron formalmente, sí se realizaron pruebas sensoriales *a priori* en las que se encontró que el sabor del tomillo es prácticamente imperceptible.

Referencias

- Acuña, J. (2003). *Ingeniería de confiabilidad*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Ahmadini, A. y Coolen, F. (2019). Statistical inference for the Arrhenius-Weibull accelerated life testing model with imprecision based on the likelihood ratio test. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 234(2). Retrieved from <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1748006X19884860>.
- Borugă, O., Jianu, C., Mișcă, C., Golet, I., Gruia, A. T. and Horhat, F. G. (2014) Thymus vulgaris essential oil: chemical composition and antimicrobial activity. *Journal of Medicine and Life*, 7(3), 56-60.
- Castillo, V. K. C., Ochoa, M. L. A., Figueroa, C. J. D., Delgado, L. E., Gallegos, I. J. A. y Morales, C. J. (2009). Efecto de la concentración de hidróxido de calcio y tiempo de cocción del grano de maíz (*Zea Mays L*) nixtamalizado, sobre las características fisicoquímicas y reológicas del nixtamal. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 54(4). Recuperado de <https://www.alanrevista.org/ediciones/2009/4/art-11/>.
- Clancy, D., Hodnett, N., Orr, R., Owen, M. and Peterson, J. (2016). Kinetic Model Development for Accelerated Stability Studies. *AAPS PharmSciTech*, 18(4), 1158-1176. Retrieved from <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27422651/>.
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria [Cedrssa]. Consumo de alimentos. Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH, 2018). Ciudad de México, México: Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. Recuperado de <http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/74ENIGH2018-Investigaci%C3%B3n.pdf>.
- Corradini, M. G. (2018). Shelf Life of Food Products: From Open Labeling to Real-Time Measurements. *Annual Review of Food Science and Technology*, 9(1), 251-269. Retrieved from annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-food-030117-012433.
- Dahlquist, R. M., Marshall, M. N., Betts, S. L., Tuell, C. C., VanderGheynst, J. S. and Stapleton, J. J. (2016). Development and validation of a Weibull–Arrhenius model to predict thermal inactivation of black mustard (*Brassica nigra*) seeds under fluctuating temperature regimens. *Biosystems Engineering*, 151, 350-360.

- Darwiche, G., Östman, E. M., Liljeberg, H. G. M., Kallinen, N., Björgell, O., Björck, I. M. E. and Almér, L. O. (2001). Measurements of the gastric emptying rate by use of ultrasonography: studies in humans using bread with added sodium propionate. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 74(2), 254-258. Retrieved from <https://doi.org/10.1093/ajcn/74.2.254>.
- Ebeling, C. E. (2010). *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering* (2nd ed.) Illinois, United States: Waveland Press.
- Haldimann, M., Alt, A., Blanc, A., Brunner, K., Sager, F. and Dudler V. (2013) Migration of antimony from PET trays into food simulant and food: determination of Arrhenius parameters and comparison of predicted and measured migration data. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 30(3), 587-598. Retrieved from [tandfonline.com/doi/full/10.1080/19440049.2012.751631](https://doi.org/10.1080/19440049.2012.751631).
- Hoseinifar, S. H., Safari, R. and Dadar, M. (2017) Dietary sodium propionate affects mucosal immune parameters, growth and appetite related genes expression: Insights from zebrafish model. *General and Comparative Endocrinology*, 243, 78-83. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2016.11.008>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi]. (2019). Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH). 2018. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Islam, M., Liro, M. and DelValle, F. (1984); Mold inhibition in tortilla by dimethyl fumarate. *Journal of Food Processing and Preservation*, 8, 41-45.
- Martínez, B., Figueroa, C., Sanchez, J., Gonzalez, J., Martinez, L. and Ruiz, T. (1996) Method for the preparation of instant fresh corn dough or masa. Patent Number 5532013. Retrieved from <https://patentimages.storage.googleapis.com/5d/99/73/47153f380be4aa/US5532013.pdf>.
- Martínez, H., Gaytán, M., Figueroa, J., Martínez, F., Reyes, M. and Rodríguez, A. (2004). Effect of some preservatives on shelf-life of corn tortillas obtained from extruded masa. *Agrociencia*, 38(3), 285-292
- Nelson, W. (2004). *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis*. New York, United States: John Wiley and Sons.
- Pascual, F. (2009). Accelerated life test planning with independent lognormal competing risks. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 140(4), 1089-1100.

- Peleg, M. (2019). Modeling Degradation Kinetics in Dry Foods Storage under Varying Temperature and Moisture Content- Theoretical Evaluation. *Food Engineering Review*, 11, 1-13. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s12393-018-9185-y>.
- Peleg, M., Normand, M. and Corradini, M. (2012). The Arrhenius Equation Revisited. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 52, 830-851.
- Pina, M., Ávila, C. and Márquez, C. (2015). Weibull accelerated life testing analysis with several variables using multiple linear regression. *Dyna*, 82(191), 156-162.
- Regnier, T., Combrinck, S. and Du Plooy, W. (2012). Essential Oils and Other Plant Extracts as Food Preservatives. In Bhat, R., Alias, A. K. and Paliyath, G. (eds.), *Progress in Food Preservation* (pp. 539-579). United Kingdom: John Wiley & Sons. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/9781119962045.ch26>.
- Rodríguez, J. M. y Santos, M. T. (2008). Study of the best designs for modification of the Arrhenius equation. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 95(2) 199-208.
- Türkoğlu, S. (2008) Evaluation of genotoxic effects of sodium propionate, calcium propionate and potassium propionate on the root meristem cells of *Allium cepa*. *Food and Chemical Toxicology*, 46(6), 2035-2041. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.01.043>.
- Smith, A., Stewart, J. and Fyfe, L. (2001). The potential application of plant essential oils as natural food preservatives in soft cheese. *Food Microbiology*, 18(4), 463-470. Retrieved from <https://doi.org/10.1006/fmic.2001.0415>.
- Van Boekel, M. (1996). Statistical Aspects of Kinetic Modeling for Food Science Problems. *Journal of Food Science*, 61(3), 477-486. Retrieved from <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1996.tb13138.x>.
- Vega, A., Lara, E. y Lemus, R. (2006). Isotermas de adsorción en harina de maíz (*Zea mays* L.). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 26(4), 821-827.
- Wall, H. A., Ramírez, A., Wesolek, N., Brabet, C., Durand, N., Rodríguez, G. C., García, M. A., Salgado, M. A., Robles, V. J. and Roudot, A.C. (2019) Risk assessment of exposure to mycotoxins (aflatoxins and fumonisins) through corn *tortilla* intake in Veracruz City (Mexico). *Food Additives & Contaminants: Part A*, 36(6), 929-939. Retrieved from [10.1080/19440049.2019.1588997](https://doi.org/10.1080/19440049.2019.1588997).

- Yin, Y. C., Coolen, F. P. A. and Coolen, T. (2017). An imprecise statistical method for accelerated life testing using the power-Weibull model. *Reliability Engineering and System Safety*, 167, 158-167.
- Zengin, N., Yüzbaşıoğlu, A., Unal, F., Yılmaz, S. and Aksoy, H. (2011). The evaluation of the genotoxicity of two food preservatives: sodium benzoate and potassium benzoate. *International Journal Food and Chemical Toxicology*, 49(4), 763-769.
- Zio, E. (2009). Reliability engineering: Old problems and new challenges. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(2), 125-141. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.res.2008.06.002>.

Rol de Contribución	Autor(es)
Conceptualización	Inocente Yuliana Meléndez Pastrana (Principal); Manuel Alonso Rodríguez Morachis (Igual) y Manuel Arnoldo Rodríguez Medina (Apoyo).
Metodología	Inocente Yuliana Meléndez Pastrana (Principal) y Manuel Alonso Rodríguez Morachis (Apoyo).
Software	Inocente Yuliana Meléndez Pastrana (Principal); Manuel Alonso Rodríguez Morachis (Apoyo) y Francisco Zorrilla Briones (Apoyo).
Validación	Inocente Yuliana Meléndez Pastrana (Principal).
Análisis Formal	Inocente Yuliana Meléndez Pastrana (Principal) y Manuel Alonso Rodríguez Morachis (Apoyo).
Investigación	Inocente Yuliana Meléndez Pastrana (Principal).
Recursos	Inocente Yuliana Meléndez Pastrana (Principal).
Curación de datos	Inocente Yuliana Meléndez Pastrana (Principal); Manuel Alonso Rodríguez Morachis (Igual) y Francisco Zorrilla Briones (Apoyo).
Escritura - Preparación del borrador original	Inocente Yuliana Meléndez Pastrana (Principal) y Francisco Zorrilla Briones (Igual).
Escritura - Revisión y edición	Inocente Yuliana Meléndez Pastrana (Principal); Manuel Alonso Rodríguez Morachis (Apoyo); Manuel Arnoldo Rodríguez Medina (Apoyo) y Francisco Zorrilla Briones (Apoyo).
Visualización	Inocente Yuliana Meléndez Pastrana (Principal); Manuel Alonso Rodríguez Morachis (Apoyo); Manuel Arnoldo Rodríguez Medina (Apoyo) y Francisco Zorrilla Briones (Apoyo).
Supervisión	Inocente Yuliana Meléndez Pastrana (Principal) y Manuel Alonso Rodríguez Morachis (Igual).
Administración de Proyectos	Inocente Yuliana Meléndez Pastrana (Principal) y Manuel Alonso Rodríguez Morachis (Igual).
Adquisición de fondos	Inocente Yuliana Meléndez Pastrana (Principal).