

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades



Evaluación de los parámetros de rancidez de *Macadamia integrifolia* y su relación con distintos niveles de actividad de agua y contenido de humedad

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por Maria Reneé Kefalas Ordoñez para optar por el grado académico de Licenciada en Química

Guatemala,

2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ciencias y Humanidades




Evaluación de los parámetros de rancidez de *Macadamia integrifolia* y su relación con distintos niveles de actividad de agua y contenido de humedad

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por Maria Reneé Kefalas Ordoñez para optar por el grado académico de Licenciada en Química

Guatemala,


2024

Vo. Bo.:

(f). 

Lic. Allan Ronaldo Vásquez Bolaños


Tribunal examinador:

(f). 

Lic. Allan Ronaldo Vásquez Bolaños

(f). 

M.A. Irma Patricia Orellana Catalán

(f). 

Lic. Ingrid Marie Schrei Godoy

Fecha de aprobación: 30 de mayo, 2024

Índice

Lista de figuras.....	vii
Lista de cuadros	viii
Resumen.....	x
Abstract	xi
1. Introducción y justificación	1
2. Objetivos	2
2.1 General	2
2.2 Específicos.....	2
3. Preguntas de investigación.....	3
4. Hipótesis	4
5. Antecedentes	5
6. Marco teórico	6
6.1 La nuez de macadamia	6
6.2 Rancidez	18
6.2.1 Rancidez oxidativa.....	18
6.2.2 Rancidez hidrolítica	20
6.3 Parámetros de rancidez.....	21
6.3.1 Actividad de agua y contenido de humedad	21
6.3.2 Valor de peróxidos	22
6.3.3 Ácidos grasos libres	22
6.3.4 P-anisidina	22
6.4 Estudio acelerado	23
7. Marco metodológico	24
7.1 Materiales	24
7.2 Reactivos	24
7.3 Método para el estudio de envejecimiento acelerado.....	24
8. Población muestra	25
9. Variables.....	26
9.1 Variables dependientes	26
9.2 Variables independientes	26
10. Alcances y limitaciones.....	27
10.1 Alcances.....	27

10.2 Limitaciones	27
11. Diseño experimental.....	28
11.1 Preparación de las muestras.....	28
11.2 Medición de variables dependientes iniciales	28
11.3 Empaquetado de muestras	29
11.4 Incubación de muestras	29
11.5 Medición de todas las variables durante cada semana	29
12. Análisis estadístico.....	30
12.1 Cálculo del valor promedio de cada variable	30
12.2 Cálculo del a desviación estándar	30
12.3 Prueba de distribución normal.....	31
12.3.1 Prueba de Kruskal-Wallis	31
13. Resultados	34
14. Discusión de resultados.....	38
15. Conclusiones	44
16. Recomendaciones	45
17. Referencias.....	46
18. Anexos.....	48

Lista de figuras

Figura 1. Ecuación para calcular la media.....	30
Figura 2. Ecuación para calcular desviación estándar.....	31
Figura 3. Estadístico de prueba Shapiro-Wilk.....	31
Figura 4. Estadístico de prueba de Kruskal-Wallis.....	32
Figura 5. Comparación del parámetro de actividad de agua de los niveles 1 a 4 a lo largo del tiempo.....	35
Figura 6. Comparación del parámetro de contenido de humedad de los niveles 1 a 4 a lo largo del tiempo.....	35
Figura 7. Comparación del parámetro de valor de peróxidos de los niveles 1 a 4 a lo largo del tiempo.....	36
Figura 8. Comparación del parámetro de ácidos grasos libres de los niveles 1 a 4 a lo largo del tiempo.....	36
Figura 9. Comparación del parámetro del valor de p-anisidina de los niveles 1 a 4 a lo largo del tiempo.....	37

Lista de cuadros

Cuadro 1. Información nutricional de la nuez de macadamia.....	18
Cuadro 2. Tiempos de secado para cada nivel trabajado.....	28
Cuadro 3. Resultados del contenido de humedad y actividad de agua para los cuatro niveles de análisis.....	34
Cuadro 4. Valor-p de cada parámetro obtenido de la prueba Shapiro-Wilk.....	34
Cuadro 5. Resultados del valor-p obtenidos.....	34
Cuadro 6. Mediciones individuales realizadas en triplicado para el contenido de humedad.....	48
Cuadro 7. Mediciones individuales realizadas en triplicado para la actividad de agua.....	49
Cuadro 8. Mediciones individuales realizadas en triplicado para el valor de peróxidos....	50
Cuadro 9. Mediciones individuales realizadas en triplicado para el contenido de ácidos grasos libres.....	50
Cuadro 10. Mediciones individuales realizadas en triplicado para el valor de p-Ansidina..	51
Cuadro 11. Mediciones promedio para el contenido de humedad.....	52
Cuadro 12. Mediciones promedio para la actividad de agua.....	52
Cuadro 13. Mediciones promedio para el valor de peróxidos.....	53
Cuadro 14. Mediciones promedio para el contenido de ácidos grasos libres.....	53
Cuadro 15. Mediciones promedio para el valor de p-anisidina.....	54
Cuadro 16. Desviación estándar del valor de humedad.....	54
Cuadro 17. Desviación estándar de la actividad de agua.....	54
Cuadro 18. Desviación estándar de peróxidos.....	55
Cuadro 19. Desviación estándar del contenido de ácidos grasos libres.....	55
Cuadro 20. Desviación estándar del valor de p-anisidina.....	56
Cuadro 21. Prueba de Kruskal-Wallis: asignación de rangos y suma de rangos por nivel para el valor de peróxidos.....	56
Cuadro 22. Prueba de Kruskal-Wallis: asignación de rangos y suma de rangos por nivel, para el contenido de ácidos grasos.....	57
Cuadro 23. Prueba de Kruskal-Wallis: asignación de rangos y suma de rangos por nivel para el valor de p-anisidina.....	57

Cuadro 24. Prueba de Kruskal-Wallis: datos utilizados en la Ecuación 3.....58
Cuadro 25. Prueba de Kruskal-Wallis: datos utilizados para encontrar el valor-p.....59

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la relación de la actividad del agua y el contenido de humedad con los parámetros de rancidez de la nuez de macadamia, *Macadamia integrifolia*. Los parámetros de rancidez medidos fueron valor de peróxidos, contenido de ácidos grasos y valor de p-anisidina. Estos fueron sometidos a niveles de actividad de agua y contenido de humedad diferentes para comprobar si había diferencias significativas al cambiar estas variables. Tras su realización, se encontró que sí hay una relación entre la actividad de agua y el contenido de humedad con el valor de peróxidos y ácidos grasos libres, mas no con el valor de p-anisidina. Estos resultados fueron congruentes con la investigación realizada. Cabe destacar que se encontraron datos atípicos y muy diferentes entre sí, por lo que se cree que el principal factor que afectó la variación fue la heterogeneidad de la muestra utilizada. Por lo que, se recomienda un mayor control sobre la procedencia de la muestra.

Palabras clave: *Macadamia integrifolia*, contenido de humedad, actividad de agua, rancidez

Abstract

The aim of this study was to evaluate the relationship between water activity and moisture content and the rancidity parameters of macadamia nuts, *Macadamia integrifolia*. The rancidity parameters measured were peroxide value, fatty acid content, and p-anisidine value. These were subjected to different levels of water activity and moisture content to assess whether there were significant differences when these variables were changed. After completion, it was found that there is a relationship between water activity and moisture content with the peroxide value and free fatty acids, but not with the p-anisidine value. These results were consistent with the research conducted. It should be noted that atypical and very different data were found, so it is believed that the main factor affecting the variation was the heterogeneity of the sample used. Therefore, greater control over the origin of the sample is recommended.

Key words: *Macadamia integrifolia*, moisture content, water activity, rancidity

1. Introducción y justificación

El consumo de nueces en la población mundial, a lo largo del tiempo, ha ido en incremento debido a que el consumidor percibe dicho alimento como rico en nutrientes. La nuez de macadamia, originaria de Australia, no ha sido la excepción, ya que contiene ácidos grasos monoinsaturados, los cuales pueden reducir el colesterol LDL y la probabilidad de padecer diabetes, enfermedades cardiovasculares e infartos. También se cree que las macadamias son un buen alimento para la salud cerebral y que están asociadas con la longevidad. Debido a esto, la producción de macadamia a nivel mundial ha ido en aumento. En 14 años (2006 a 2020) hubo un incremento de un 114% en su producción y se estima que siga en aumento (Bungay, 2022).

Debido a su alto contenido de grasa, que representa un 75% (p/p), la posibilidad de que se rancie es mayor que en otras nueces. Entre los factores que pueden contribuir a acelerar el proceso de rancidez se encuentra la exposición a la humedad del ambiente, lo cual puede contribuir a un incremento en el contenido de humedad y actividad de agua del producto. Se cree que un alto nivel de ambos factores induce el proceso de rancidez hidrolítica, reduciendo el tiempo de vida del producto (Wallace y Walton, 2011).

Es por esto por lo que el presente estudio pretende investigar la relación entre el contenido de humedad y actividad de agua con tres parámetros de rancidez de *Macadamia integrifolia*, siendo estos: valor de peróxidos, valor de p-anisidina y ácidos grasos libres. Este será de gran importancia para el proceso de producción y el almacenamiento de la nuez, permitiendo elegir las condiciones óptimas en ambos procedimientos para así establecer el mejor tiempo de vida del producto y garantizar la satisfacción del consumidor.

2. Objetivos

2.1 General

- Medir la relación de la actividad de agua y el contenido de humedad con los parámetros de rancidez de la nuez de macadamia.

2.2 Específicos

- Llevar a cabo un estudio de envejecimiento acelerado para luego cuantificar el valor de los parámetros de rancidez (peróxidos, ácidos grasos libres y p-anisidina) de la nuez de macadamia a cinco niveles de actividad de agua y contenido de humedad diferentes.
- Llevar a cabo un análisis estadístico por medio del modelo ANOVA, para determinar la relación existente entre la actividad de agua y el contenido de humedad con los parámetros de rancidez.

3. Preguntas de investigación

1. ¿Cuál es la relación entre la actividad de agua y el contenido de humedad de la nuez de macadamia con los parámetros de rancidez (valor de peróxidos, ácidos grasos libres y p-anisidina)?
2. ¿A qué valor de actividad de agua y contenido de humedad se puede minimizar la rancidez de la nuez, medida por los parámetros de rancidez?

4. Hipótesis

Las medias de los parámetros de valor de peróxidos, ácidos grasos libres y p-anisidina son significativamente diferentes según el nivel de contenido de humedad y actividad de agua.

5. Antecedentes

En 1966, Cavaletto y de la Cruz llevaron a cabo un estudio en donde se monitorearon diversos factores que podrían afectar a la estabilidad de la nuez de macadamia. Su principal conclusión fue que el contenido de humedad afectaba a la nuez más significativamente, siendo las nueces con un contenido de humedad del 1% las más estables. A partir de este estudio, se han llevado a cabo investigaciones para conocer las condiciones óptimas de secado, empaque, almacenamiento y demás, que permitan prolongar el tiempo de vida del producto. Es por esto que en 2009, Borompichaichartkul y colaboradores realizaron un estudio para determinar la mejor forma de secado de la nuez para reducir su contenido de humedad.

Sin embargo, todos los estudios hasta la fecha se han enfocado únicamente en el contenido de humedad. Dominguez et al (2007) realizó un estudio en donde se encontró que la actividad de agua óptima para preservar la nuez se encuentra entre 0.36 y 0.44. Un mayor contenido de humedad y actividad de agua podría inducir el proceso de rancidez hidrolítica (Wallace y Walton, 2011).

Debido a que el proceso de rancidez ocurre de forma lenta, se han realizado estudios acelerados para observar cambios en un menor tiempo. Gama y colaboradores (2020) realizaron un estudio acelerado a una temperatura de 45°C, a la cual se pudieron observar cambios en la estabilidad oxidativa de la nuez (Duduzile, 2018).

6. Marco teórico

6.1 La nuez de macadamia

La nuez de macadamia es originaria de Australia y fue descubierta en el año 1828 por explorador y botanista Alan Cunningham. Luego, en 1882, las semillas del árbol de esta nuez fueron importadas y sembradas en Hawaii. Inicialmente, los árboles eran utilizados para proteger a las plantaciones de caña de azúcar contra el viento, así como árboles ornamentales. Para ese entonces, se desconocían los beneficios de su fruto (Bungay, 2022).

Años después, estudios demostraron que la macadamia, debido a su alto contenido de ácidos grasos monoinsaturados, puede ser beneficiosa para la salud, reduciendo el contenido de colesterol LDL en el cuerpo, lo cual puede prevenir enfermedades cardiovasculares y la posibilidad de sufrir un infarto (Bungay, 2022). Asimismo, el ácido palmitoléico, un omega- 7 bastante inusual, que se encuentra en la macadamia, puede aumentar la sensibilidad a la insulina y reducir el riesgo de diabetes (Hu et al. 2019). Es por esto por lo que su producción mundial ha ido en aumento, dando como resultado un incremento de un 114% en su producción entre 2006 y 2020 (Bungay, 2022).

Cuadro 1.

Información nutricional de la nuez de macadamia

Porción	10 nueces (31 g)
Calorías	204 kJ
Grasa total	67.3 %
Grasa saturada	16.3 %
Grasa poliinsaturada	2.2 %
Omega-6	1.9 %
Omega-3	0.3 %
Monoinsaturadas	77.1 %
Omega-7	17.7 %
Omega-9	59.4 %
Carbohidratos	15.7 %
Carbohidratos netos	4.8 %
De los cuales azúcares	3.2 %
Fibra	7.7 %

Nota. Adaptada de Organización Mundial de Macadamia (2024).

6.2 Rancidez

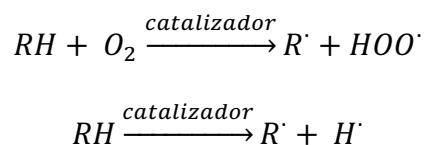
Aunque el alto contenido de grasa de la macadamia sea beneficioso para la salud, este también representa un reto para las industrias productoras de esta nuez, debido a que la vuelve más vulnerable al proceso de rancidez (Wallace y Walton, 2011). La rancidez se basa en la percepción organoléptica subjetiva de mal olor o sabor en un alimento. Los aceites o grasas en un producto funcionan como reservorios para estos malos olores y sabores. Existen dos tipos de rancidez: la rancidez oxidativa y la rancidez hidrolítica (Allen y Hamilton, 1994).

6.2.1 Rancidez oxidativa

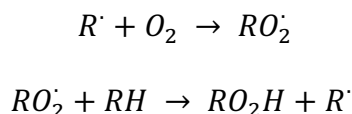
La rancidez oxidativa ocurre cuando los ácidos grasos insaturados presentes en el alimento reaccionan con el oxígeno atmosférico. Este proceso puede ser iniciado por temperaturas altas, pro-oxidantes, ciertas enzimas (como la lipooxigenasa) o la luz. Este primer proceso de oxidación da como resultado la liberación de hidroperóxidos (Allen y Hamilton, 1994).

La reacción inicia cuando los lípidos reaccionan con el oxígeno atmosférico y liberan radicales libres; este paso se conoce como iniciación. Los radicales libres producidos en este paso pueden reaccionar para formar otro radical libre que da como resultado un hidroperóxido. Los tres pasos de reacción ocurren de la siguiente manera:

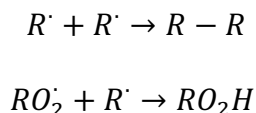
Iniciación:



Propagación:



Terminación:



En donde RH es un ácido insaturado, $R\cdot$ es un radical libre del ácido insaturado $RO_2\cdot$ es un radical libre lípido-peróxido y RO_2H el hidroperóxido (Allen y Halmiton, 1994).

El proceso de oxidación tiene una segunda etapa, en donde los hidroperóxidos se descomponen en aldehídos volátiles, como el hexanal, dejando una parte del ácido graso, que no es volátil (McConchie et al. 2010).

Ya que estos procesos solo ocurren si hay oxígeno, muchas empresas han optado por empaquetar sus productos al vacío y con empaques laminados con baja

permeabilidad de oxígeno, para reducir la posibilidad de que ocurran estas reacciones (Bungay, 2022). Sin embargo, algunos estudios comprueban que un alto contenido de humedad y actividad de agua también conllevan al proceso de rancidez oxidativa, por lo que, aunque el oxígeno sea una variable controlada, también podrían observarse cambios en el valor de peróxidos y de p-anisidina (Wallace y Walton, 2011).

6.2.2 Rancidez hidrolítica

La rancidez hidrolítica ocurre cuando los glicéridos presentes en la nuez, bajo la acción de humedad y calor, se descomponen para formar ácidos grasos libres. Una de estas reacciones hidrolíticas es la lipólisis, la cual da como productos ácidos oléico, linoléico y linolénico (Allen y Hamilton, 1994). Dada la alta presencia de estos ácidos en la nuez, que son bastante susceptibles al fenómeno de autooxidación, el proceso de rancidez oxidativa se regenera, por lo que la rancidez oxidativa e hidrolítica están altamente enlazadas (Wallace y Walton, 2011).

Como se mencionó anteriormente, la rancidez hidrolítica ocurre cuando hay presencia de humedad y calor. Estudios previos se han enfocado en explicar los efectos del contenido de humedad, que es el vapor de agua y otros compuestos volátiles de la nuez, sobre la rancidez hidrolítica. Sin embargo, existe otro factor de mucha relevancia que es la actividad de agua, que es el agua libre y disponible presente en el producto (Wallace y Walton, 2011). Se ha comprobado que ambos factores tienen una relación y que crecen juntos de manera exponencial, por lo que una alta actividad de agua también es un factor influyente en la rancidez hidrolítica: a mayor actividad de agua, habrá mayor producción de ácidos grasos libres y lo mismo con el contenido de humedad (Domínguez et al. 2007).

6.3 Parámetros de rancidez

Para poder llevar un control sobre el tiempo de vida de la macadamia, existen diferentes parámetros que brindan diferente información sobre su proceso de rancidez. Entre ellos se encuentran: la actividad de agua, el contenido de humedad, el valor de peróxidos, ácidos grasos libres y p-anisidina.

6.3.1 Actividad de agua y contenido de humedad

Como se mencionó anteriormente, la actividad de agua se define como el agua libre de un producto alimenticio, que en este caso es la nuez de macadamia (Wallace y Walton, 2011). Por otro lado, el contenido de humedad representa al porcentaje de vapor de agua y de vapor de otros compuestos volátiles presentes en la nuez (Wallace y Walton, 2011). Domínguez y colaboradores (2007), demostraron en un estudio que la relación entre ambos parámetros es proporcional y que crecen de manera exponencial. Ambos parámetros son considerados como parámetros de rancidez, ya que, como se expuso en la sección previa, estos son precursores de la rancidez hidrolítica e incluso de la rancidez oxidativa (Wallace y Walton, 2011).

Cabe destacar que, aunque ambos parámetros tengan una relación proporcional entre ellos, existen factores que pueden hacer que uno varíe significativamente del otro. Por ejemplo, la permeabilidad de vapor de agua del empaque del alimento puede hacer que el contenido de humedad baje o suba, dependiendo de las condiciones en las que el producto empacado se encuentre (Siracusa, 2012). Esto no necesariamente afectaría a la actividad de agua, ya que únicamente habría una variación del vapor de agua y no del agua libre.

Asimismo, si la temperatura de medición al momento de medir la actividad de agua es diferente a la temperatura de análisis, los valores para este último parámetro podrían ser diferentes a los esperados. Esto se debe a que existe un único valor para la actividad de agua de un alimento a cierta temperatura (Barbosa-Cánovas et al. 2020).

6.3.2 Valor de peróxidos

Probablemente, el valor de peróxidos es el parámetro de rancidez más antiguo que existe, ya que originalmente solo se conocía el proceso de rancidez oxidativa. Este mide el valor de hidroperóxidos total en la muestra y su dimensional es miliequivalentes de oxígeno por kg de grasa (meq O₂/kg) (Allen y Hamilton, 1994). Actualmente, se recomienda que el valor máximo para este parámetro sea de 3 meq O₂/kg, para así preservar la nuez en condiciones óptimas durante un año (WMO, 2024). A pesar de que el proceso oxidativo inicia tan pronto como la nuez es cosechada, debido a su baja energía de activación (entre 4 y 5 kcal/mol), los cambios en el valor de peróxidos no son perceptibles sino hasta un tiempo prolongado de almacenamiento de la nuez, que puede ser de un año a condiciones de temperatura ambientales (Allen y Hamilton, 1994 y Chitundu, 1994).

6.3.3 Ácidos grasos libres

Los ácidos grasos libres son el producto de la rancidez hidrolítica, siendo los más comunes el oléico, linoléico y el linolénico en la nuez de macadamia. Sin embargo, al determinar este parámetro, este se representa como el porcentaje de ácido oléico, que es el más abundante en esta muestra. La WMO (2023) recomienda que este parámetro no sea mayor a 0.5%. Como se mencionó anteriormente en esta sección, el valor de ácidos grasos libres está directamente relacionado con la actividad de agua y el contenido de humedad, por lo que si se quiere disminuir la cantidad de ácidos grasos libres se deben reducir estos dos parámetros (McConchie et al. 2010).

6.3.4 P-anisidina

El proceso de rancidez oxidativa tiene una etapa primaria y una secundaria. En la oxidación secundaria, los hidroperóxidos formados en la primera etapa se descomponen para formar aldehídos volátiles, como el hexanal. Asimismo, queda restante una parte no volátil, que corresponde a la molécula del glicérido que reaccionó. La prueba de p-anisidina mide el contenido de los compuestos no volátiles que resultan de este proceso. Dado que esto ocurre de manera aún más lenta que el proceso de oxidación primario, toma aún más tiempo poder apreciar un

cambio perceptible para el valor de p-anisidina en la muestra. Se recomienda que su valor sea menor a 10, el cual es adimensional (Wallace y Walton, 2011)

6.4 Estudio acelerado

Dado que los procesos de rancidez ocurren de manera lenta, es necesario optar por un estudio de envejecimiento acelerado, en donde las condiciones de temperatura y humedad relativa son las que conllevan a la observación de cambios perceptibles en un menor tiempo. Según la investigación de Gama y colaboradores (2020), a 45°C ya pueden observarse cambios en la estabilidad de la nuez, así como a una humedad relativa de entre 20 y 20% (Duduzile, 2018).

7. Marco metodológico

7.1 Materiales

- Equipo cdR Foodlab, especializado en análisis de alimentos
- Tubos de ensayo pequeños, aptos para el equipo cdR Foodlab, con tapadera
- Prensa manual y accesorios
- Incubadora para análisis microbiológico marca Thermo Fisher
- Equipo PreAqua Lab
- Termobalanza mettler Toledo modelo HG63
- Horno industrial
- Quebradora Pinhalense
- Centrifugadora
- Bolsas laminadas para empaque al vacío
- Empacadora al vacío
- Tubos Eppendorf
- Micropipetas de diferentes capacidades

7.2 Reactivos

- Kit de reactivos del equipo cdR Foodlab para medir ácidos grasos libres, valor de peróxidos y valor de p-anisidina.

7.3 Método para el estudio de envejecimiento acelerado

- Temperatura: 45°C
- Tiempo de análisis: 21 días

8. Población muestra

- Población: se trabajó con nueces de macadamia de un mismo lote.
- Muestra: se trabajó con aproximadamente 24 libras de nueces de ese mismo lote.

9. Variables

Previo al análisis experimental, se definieron las siguientes variables.

9.1 Variables dependientes

- Cantidad de peróxidos
- Cantidad de ácidos grasos libres
- Valor de p-anisidina

9.2 Variables independientes

- Actividad de agua
- Contenido de humedad
- Tiempo de análisis
- Contenido de oxígeno dentro del empaque
- Temperatura de la incubadora

10. Alcances y limitaciones

10.1 Alcances

Se cuantificaron únicamente los parámetros de: actividad de agua, contenido de humedad, cantidad de peróxidos, ácidos grasos libres y el valor de p-anisidina en una muestra de un lote específico de la nuez de macadamia.

10.2 Limitaciones

Se evaluaron únicamente muestras de nuez de macadamia, tomando en cuenta solo aquellas clasificadas como grado A, es decir que no tuvieran picaduras de insecto, moho o estuvieran arañadas. Además, dado que el horno de secado tuvo un descenso en la temperatura que duró varios días, el quinto nivel de humedad y actividad de agua esperado debió ser omitido y se trabajó solo con cuatro. Finalmente, dado que el lote de nueces utilizado proviene de diferentes proveedores, se trabajó con una muestra que no fue homogénea.

11. Diseño experimental

11.1 Preparación de las muestras

La preparación de las nueces de macadamia implicó dejarlas en un horno de secado industrial a 60°C por diferentes horas para llegar al contenido de humedad y actividad de agua deseados, que fueron de aproximadamente 2.5, 2, 1.5 y 1% de contenido de humedad y sus valores correspondientes de actividad de agua. Los tiempos de secado fueron los siguientes:

Cuadro 2

Tiempos de secado para cada nivel trabajado

Número del nivel de actividad de agua y contenido de humedad	Tiempo de secado (h)
1	0
2	24
3	48
4	72

Nota. Elaboración propia.

El primer nivel no fue sometido al proceso de secado, ya que se encontraba a un valor de actividad de agua y porcentaje de contenido de humedad adecuados para dar inicio al estudio. La medición de estos dos parámetros fue llevada a cabo utilizando la termobalanza Mettler Toledo modelo HG63 (para el contenido de humedad) y el equipo PreAqua Lab (para la actividad de agua).

11.2 Medición de variables dependientes iniciales

Tras haberse asegurado que las nueces tuvieran los valores deseados para el contenido de humedad y la actividad de agua, posterior a su tiempo de secado, se procedió a extraer el aceite de la nuez utilizando una prensa manual, el cual luego fue almacenado en tubos Eppendorf y centrifugado. Este proceso se hizo con el fin de medir el valor de peróxidos, ácidos grasos libres y p-anisidina de estas. Esto se llevó a cabo utilizando el

equipo cdR Foodlab, con su respectivo kit de reactivos. La medición de cada parámetro de rancidez se realizó en triplicado. Todos los valores obtenidos para estas variables correspondieron al día cero de medición, es decir representaron a los valores previos a la incubación de las muestras.

11.3 Empaquetado de muestras

Una vez obtenidos dichos valores iniciales, se empacaron las nueces en bolsas laminadas y al vacío. Cada bolsa contuvo aproximadamente 310 gramos de nueces.

11.4 Incubación de muestras

Luego de su empaquetado, las nueces fueron incubadas en una incubadora para análisis microbiológico durante 1, 7, 14 y 21 días.

11.5 Medición de todas las variables durante cada semana

Tras haber transcurrido un día de incubación, se realizó la medición de todas las variables (actividad de agua, contenido de humedad, valor de peróxidos, ácidos grasos libres y valor de p-anisidina) del grupo de muestra correspondiente al día de análisis. Esto se hizo con el fin de tener los valores iniciales de cada parámetro habiendo sido ya incubadas las muestras. El procedimiento seguido fue el indicado en las secciones uno y dos de este mismo apartado y repetido en los días 7, 14 y 21 de análisis. De igual manera se trabajó en triplicado.

12. Análisis estadístico

12.1 Cálculo del valor promedio de cada variable

Tras haber trabajado cada grupo de muestras en triplicado, se hizo el cálculo del valor promedio de cada variable medida, sea dependiente o independiente. Para ello se utilizó la siguiente ecuación:

Figura 1

Ecuación para calcular la media

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

\bar{x} ... representa a la media experimental

$\sum_{i=1}^N x_i$... representa la suma de todos los valores de todas las réplicas.

N ... representa al número total de mediciones en el conjunto.

Escriba aquí la ecuación.

Nota. Adaptado de Skoog et al. (2015).

12.2 Cálculo del a desviación estándar

Con el fin de medir la variación de cada medición en torno al valor promedio y eliminar aquellos datos considerados atípicos, se calculó la desviación estándar utilizando la ecuación en este apartado. Si el dato se encontraba a más de una desviación estándar de la media, este fue considerado atípico y por lo tanto, descartado. La fórmula fue:

Figura 2.

Ecuación para calcular desviación estándar

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N d_i^2}{N - 1}}$$

s... representa la desviación estándar

$\sum d_i^2$... representa a la suma de todas las desviaciones del valor x_i de la media \bar{x}

$N - 1$... representa a los grados de libertad

Nota. Adaptado de Skoog et al. (2015).

12.3 Prueba de distribución normal

Para poder llevar a cabo el análisis estadístico, fue necesario realizar una prueba para comprobar que los datos de cada parámetro individualmente (valor de peróxidos, ácidos grasos libres y p-anisidina) siguieran una distribución normal. Para ello, se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk. Si el valor-p obtenido fue menor que el nivel de significancia, se consideró que el conjunto de datos no seguía una distribución normal. La fórmula utilizada para encontrar el estadístico de Shapiro-Wilk fue la siguiente:

Figura 3.

Estadístico de prueba Shapiro-Wilk

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{i=1} - \bar{x})^2}$$

Nota. Adaptado de Anderson et al. (2012).

12.3.1 Prueba de Kruskal-Wallis

Una vez comprobado que los datos no seguían una distribución normal, se procedió a llevar a cabo la prueba de Kruskal-Wallis para el análisis estadístico de cada parámetro y

así verificar si existe una relación entre la actividad del agua y el contenido de humedad con cada parámetro de rancidez. Cabe destacar que solo fueron utilizados los datos del día 21, ya que, según la literatura citada, durante los días 0 a 14 no es muy probable observar cambios significativos. Para esta prueba se siguió el siguiente procedimiento:

1. Se colocaron todos los datos del día 21 de análisis en una misma columna, ordenados de menor a mayor.
2. A la par, se le asignó un rango a cada dato, desde el número 1 hasta la cantidad de datos que tuviera ese parámetro, debido a que cada uno contaba con una cantidad diferente de mediciones a causa de la eliminación de datos atípicos. Para aquellos repetidos, se asignó un rango promedio.
3. Se creó un cuadro que incluía la siguiente información: medición individual de cada nivel del día 21 de análisis, rango y por nivel. En los Cuadros 21 a 23 de la sección de Anexos se encuentra dicha información.
4. Se calculó el cuadrado de la suma de rangos de cada nivel y se dividió dentro de la cantidad de mediciones realizadas para cada uno.
5. Se sumaron los datos obtenidos en el paso anterior.
6. Se utilizó la Figura No.4, indicada al finalizar este apartado, para calcular el estadístico H de la prueba de Kruskal-Wallis.
7. Se calculó el valor-p con una fórmula de Microsoft Excel, que requiere el valor H y los grados de libertad que para todos los análisis fue de tres. Esta información se encuentra en el Cuadro 24 de la sección de Anexos.
8. Se hicieron conclusiones a partir del valor-p obtenido y el nivel de significancia que para las tres pruebas, fue de $\alpha = 0.05$.

Figura 4

Estadístico de prueba de Kruskal-Wallis

$$H = \left[\frac{12}{n_T(n_T + 1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} \right] - 3(n_T + 1)$$

k = número de poblaciones

n_i = número de observaciones en la muestra i

n_T = número total de observaciones en todas las muestras

R_i = suma de los rangos para la muestra i

Nota. Adaptado de Anderson et al. (2012).

13. Resultados

Cuadro 3.

Resultados del contenido de humedad y actividad de agua para los cuatro niveles de análisis

Nivel	Contenido de humedad (%)	Actividad de agua (adimensional)
1	2.09	0.463
2	1.85	0.436
3	1.68	0.381
4	1.30	0.308

Nota. Elaboración propia. Se presentan los valores para el contenido de humedad y actividad de agua de los cuatro niveles de análisis. Estos datos fueron promediados de las mediciones tomadas en triplicado durante el día 0 de análisis.

Cuadro 4

Valor-p de cada parámetro obtenido de la prueba de Shapiro-Wilk

Parámetro de rancidez	Valor-p
Valor de peróxidos	<0.01
Ácidos grasos libres	0.5
p-anisidina	<0.01

Nota. Elaboración propia. Se presenta el valor-p de cada parámetro de rancidez, obtenido al realizar la prueba de Shapiro-Wilk para comprobar la normalidad de los datos.

Cuadro 5

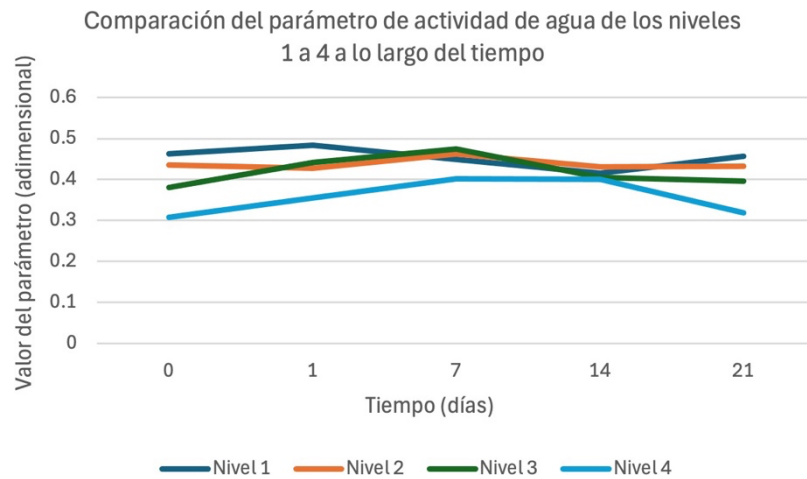
Resultados del valor-p obtenidos, a partir de la prueba Kruskal Wallis

Parámetro de rancidez	Valor-p
Valor de peróxidos	$4.11 \cdot 10^{-12}$
Ácidos grasos libres	$6.15 \cdot 10^{-12}$
p-anisidina	0.44

Nota. Elaboración propia. Tras haber realizado la prueba de Kruskal-Wallis, se calcularon los valores-p que se presentan en este cuadro. Estos fueron contrastados contra un valor de significancia de $\alpha=0.05$, para poder concluir acerca de la hipótesis planteada.

Figura 5

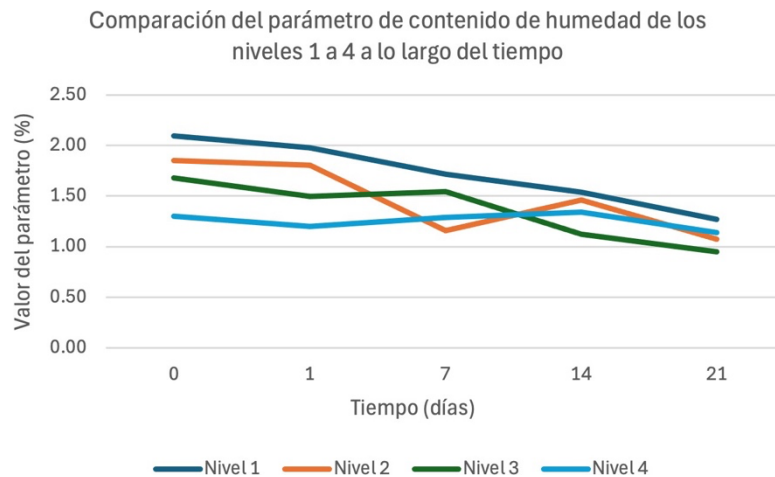
Comparación del parámetro de actividad de agua de los niveles 1 a 4 a lo largo del tiempo



Nota. Elaboración propia. Se presenta una gráfica en donde se compara el comportamiento de la actividad de agua a lo largo del tiempo, para cada uno de los niveles de trabajo.

Figura 6

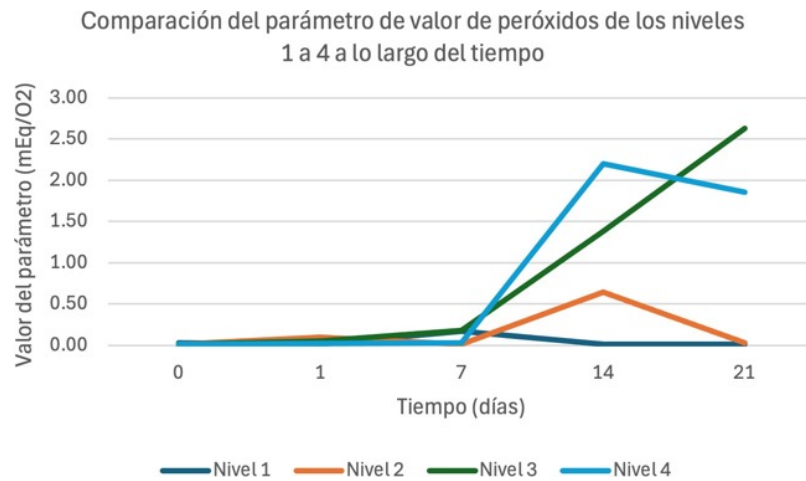
Comparación del parámetro de contenido de humedad de los niveles 1 a 4 a lo largo del tiempo



Nota. Elaboración propia. Se presenta una gráfica en donde se compara el comportamiento del contenido de humedad a lo largo del tiempo, para cada uno de los niveles de trabajo.

Figura 7

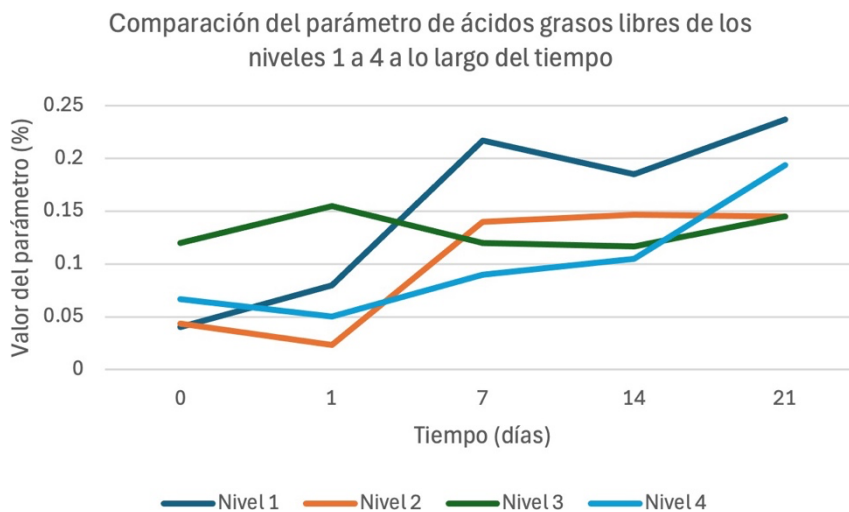
Comparación del parámetro de valor de peróxidos de los niveles 1 a 4 a lo largo del tiempo



Nota. Elaboración propia. Se presenta una gráfica en donde se compara el comportamiento del valor de peróxidos a lo largo del tiempo, para cada uno de los niveles de trabajo.

Figura 8

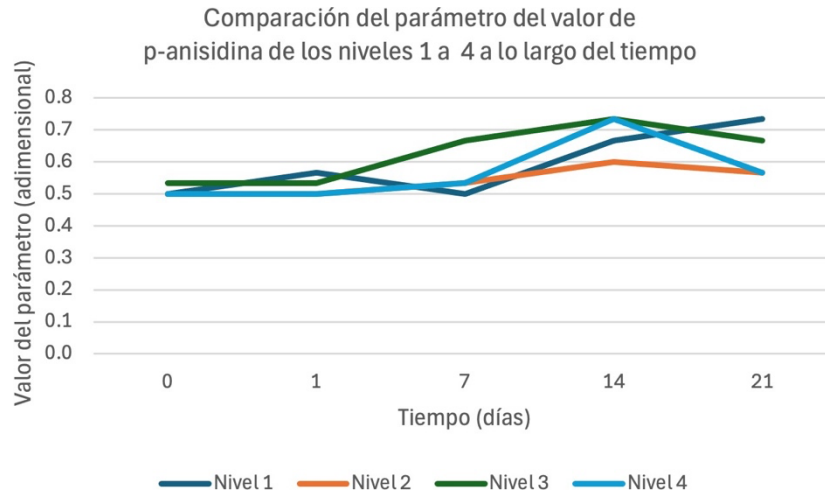
Comparación del parámetro de ácidos grasos libres de los niveles 1 a 4 a lo largo del tiempo



Nota. Elaboración propia. Se presenta una gráfica en donde se compara el comportamiento de los ácidos grasos libres a lo largo del tiempo, para cada uno de los niveles de trabajo.

Figura 9

Comparación del parámetro del valor de p-anisidina de los niveles 1 a 4 a lo largo del tiempo



Nota. Elaboración propia. Se presenta una gráfica en donde se compara el comportamiento del valor de p-anisidina a lo largo del tiempo, para cada uno de los niveles de trabajo.

14. Discusión de resultados

El objetivo principal del presente estudio fue comprobar la relación entre la actividad de agua y el contenido de humedad con los parámetros de rancidez de la nuez de macadamia, de la variedad *Macadamia integrifolia*. Para ello, se llevó a cabo un estudio acelerado durante 21 días, con el fin de poder apreciar cambios notables en los parámetros de rancidez de la nuez durante el menor tiempo posible. Tras la realización de la parte experimental, se llevó a cabo un análisis estadístico por medio de la prueba de Kruskal-Wallis.

En los objetivos planteados, se buscó comprobar dicha relación a partir de cinco niveles de actividad de agua y contenido de humedad diferentes. Durante el experimento, el horno de secado en donde fueron colocadas las nueces sufrió de un descenso en la temperatura (de 60°C a 17°C, aproximadamente) que duró varios días, por lo que tomó más tiempo secar las nueces hasta el último nivel planeado, que era de 0.5%. Es por esto por lo que este nivel fue omitido, ya que no se logró alcanzar el valor deseado a partir de las condiciones de secado utilizadas. Dicho lo anterior, se trabajó únicamente con cuatro niveles distintos, cuyos valores de actividad de agua y contenido de humedad pueden encontrarse en el Cuadro 3 de la sección de Resultados.

Inicialmente, se propuso llevar a cabo el análisis estadístico por medio de la prueba de análisis de varianza (ANOVA, por sus siglas en inglés). Para ello, se llevó a cabo un análisis para comprobar que los datos siguieran una distribución normal, utilizando la prueba de Shapiro-Wilk. Dado que el valor-p, obtenido de la prueba individual de los parámetros de valor de peróxidos y p-anisidina ($p < 0.01$ para ambos), fue menor al nivel de significancia ($\alpha = 0.05$) se puede concluir que estos datos no presentan normalidad. Entonces, se procedió a utilizar la prueba estadística de Kruskal-Wallis para el análisis de los datos. El valor-p de la prueba de Shapiro Wilk de los ácidos grasos libres fue mayor al

nivel de significancia ($p=0.5$), por lo que se concluye que estos datos sí siguen una distribución normal. Sin embargo, la prueba de Kruskal-Wallis es aplicable a datos que sí siguen y que no siguen una distribución normal, por lo que esta misma prueba estadística fue utilizada para analizar los datos de los ácidos grasos libres.

Tras el análisis estadístico, se comprobó que dos de los tres parámetros de rancidez (valor de peróxidos y ácidos grasos) sí tienen relación con la actividad de agua y el contenido de humedad de la muestra, mientras que el valor de p-anisidina no tiene relación con estas dos variables. Los resultados del valor-p para estos tres parámetros fueron de $4.11 \cdot 10^{-12}$, $6.15 \cdot 10^{-12}$ y 0.44, respectivamente. Dado que los dos primeros valores son menores al nivel de significancia ($\alpha=0.05$), se acepta la hipótesis planteada, en donde se buscaba comprobar si hay diferencias significativas entre las medias de cada parámetro, de forma individual. Para el parámetro de p-anisidina, se rechaza la hipótesis planteada, debido a que el valor-p obtenido es mayor al nivel de significancia. Cabe destacar que solo se analizaron los datos del día 21 de cada parámetro, ya que entre los días 0-14, según la literatura, no se pueden observar cambios notables y que es con el pasar del tiempo que estos pueden apreciarse, por lo que se eligió el último día de estudio para realizar el análisis (Chitundu, 1994).

Los resultados obtenidos a partir del análisis estadístico son congruentes a lo encontrado en la literatura citada. Esto se debe a que mientras más alto sea el valor del contenido de humedad y la actividad de agua, los ácidos grasos libres tenderán a aumentar. Asimismo, como se mencionó en la sección de marco teórico, las reacciones de oxidación también pueden verse afectadas por estas dos variables y, por ende, aumentar el valor de peróxidos si estas dos tienen valores elevados. El resultado del análisis del valor de p-anisidina también es un resultado esperado, ya que las pruebas de este parámetro únicamente muestran resultados significativos mucho tiempo después de que la nuez haya sufrido el proceso de rancidez, ya que este parámetro mide los productos de la rancidez oxidativa secundaria, la cual toma bastante tiempo.

Es importante mencionar que varios datos para cada uno de los parámetros son muy diferentes entre ellos. El primer y más importante supuesto que se tiene sobre este hecho, es la heterogeneidad de la muestra. El lote de la muestra utilizada consiste en nueces proporcionadas por distintos proveedores. Además, no se tiene un control del tiempo transcurrido desde el momento de cosecha de cada proveedor, hasta la entrega del producto a la empresa que lo procesa. Esto conlleva a resultados tan diferentes entre sí y un escaso control sobre los parámetros de rancidez, ya que algunas nueces pueden ser más antiguas y, al ser mezcladas con nueces más frescas, pueden variar significativamente los resultados.

Este factor puede observarse en las gráficas que comparan a los tres parámetros de rancidez con la actividad de agua y el contenido de humedad. En la Figura 3 de la sección de Resultados, se aprecia cómo el valor de peróxidos tiene picos que sobresalen del resto, que tienen incrementos muy abruptos o que aumentan abruptamente y luego vuelven a descender. Como se mencionó en el párrafo anterior, el hecho de que el lote no sea homogéneo hace que, al momento de realizar las mediciones, se pueda tomar una muestra significativamente distinta a los demás y que varíen los resultados. Por eso también se trabajó en triplicado, para así poder eliminar aquellos datos atípicos. Para ello se utilizó el criterio de la desviación estándar, en donde aquellos resultados que tuvieran una variación mayor a la de una desviación estándar fueron removidos. Esto permitió, aunque no en su totalidad, controlar la variación ocasionada por la heterogeneidad del lote utilizado. Todas las mediciones individuales de cada nivel se encuentran en los Cuadros 4 a 8 de la sección de Anexos.

Asimismo, en cuanto a la segunda pregunta de investigación, en donde se buscaba averiguar a qué valor de actividad de agua y contenido de humedad se puede minimizar la rancidez de la nuez, solo se pueden hacer conclusiones y responder a esta pregunta basándose en el análisis de ácidos grasos libres ya que, este fue el único parámetro que presentó tener una relación estadísticamente significativa con la actividad de agua y contenido de humedad y, además, sus valores se mantuvieron estables a lo largo del tiempo y no con tanta variación como el valor de peróxidos. Entonces, a partir de esto, el nivel de humedad que mantuvo más bajos y estables a lo largo del tiempo los valores de ácidos

grasos libres fue el nivel 3. A pesar de que los otros niveles hayan comenzado el día 0 de análisis con valores de ácidos grasos libres más bajos (0.04% para el nivel 1, 0.04% para el nivel 2 y 0.07% para el nivel 4) que el nivel 3 (0.12%), la tendencia de este parámetro a aumentar en el nivel 3 fue menor que en los otros niveles (Figura 4, sección de Resultados), por lo que si se secara y procesara la macadamia hasta estos valores de contenido de humedad (1.68%) y actividad de agua (0.381) podría reducirse el proceso de rancidez y preservar con mayor tiempo la nuez. Esta pregunta no puede ser respondida partiendo del valor de p- anisidina, ya que según el análisis estadístico, no hay una relación entre las variables medidas y este parámetro.

Curiosamente, el contenido de humedad fue disminuyendo a lo largo del tiempo en los cuatro niveles (Figura 2, sección de Resultados). Una razón para este hecho es la permeabilidad de vapor de agua del empaque laminado utilizado, que equivale a $1.0 \text{ g/m}^2 \times \text{día}$. Este valor es considerablemente mayor al recomendado por la Organización Mundial de Macadamia (WMO, por sus siglas en inglés), el cual debería ser menor a $0.25 \text{ g/m}^2 \times \text{día}$ (WMO, 2022). Entonces, al tener una permeabilidad mayor en el empaque utilizado, existe un mayor intercambio de vapor de agua del interior de la bolsa con el entorno en el que se encuentra, pudiendo ser que el vapor de agua de la nuez migrara de dentro hacia afuera. Por el fenómeno de la difusión, se esperaría que la migración del vapor de agua fuera de afuera hacia adentro, es decir del área con mayor humedad hacia el de menor humedad (Siracusa, 2012). Sin embargo, no se tuvo control de la humedad en la incubadora utilizada, por lo que no puede saberse si la humedad relativa dentro de la incubadora fue realmente mayor a la del interior del empaque.

Esto resultó también en la observación de que el contenido de humedad y la actividad de agua no son siempre proporcionales. Según Domínguez et al (2007), ambas variables crecen juntas, de manera exponencial. Pero, según lo observado en los resultados, una variable puede disminuir, como lo hizo el contenido de humedad, mientras la otra se mantiene relativamente estable, que en este caso fue la actividad de agua.

Otro fenómeno observado, que tiene relación con la actividad del agua, es el cambio de color de las nueces del nivel 1: pasaron de color natural a tornarse cada vez más cafés. En el día 21 de análisis, las nueces de este nivel se encontraban totalmente tostadas. La razón por la cual este hecho tiene relación con la actividad del agua es porque un alto nivel de esta variable, a una temperatura elevada, como los 45°C para el análisis y un almacenamiento prolongado bajo las dos condiciones mencionadas ocasionan que la nuez cambie de color y se oscurezca. El alto valor de la actividad de agua resulta en el aumento de la producción de ácidos grasos libres, Figura 8, donde los ácidos grasos libres del nivel 1 aumentan con el tiempo. A su vez, la producción de ácidos grasos libres en la nuez, como el ácido oléico, linoléico y linolénico, muy propensos a sufrir el proceso de autooxidación (Allen y Hamilton, 1994), puede conllevar a la oxidación lipídica de la macadamia, que da como resultado un cambio de color (Domínguez et al. 2007).

Se cree que el tiempo de análisis fue un factor influyente y que podría hacer que estos variaran más a lo largo del tiempo. Si se quisiera observar claramente la tendencia de los datos al aumento, como en el caso de los ácidos grasos, habría que extender el tiempo de análisis. Sin embargo, con 21 días de trabajo experimental, fue posible comprobar la relación entre el contenido de humedad y la actividad del agua con dos de los tres parámetros de rancidez, lo que valida la hipótesis planteada.

15. Conclusiones

Los resultados del presente estudio indican que sí existe una relación entre la actividad del agua y el contenido de humedad con el valor de peróxidos y ácidos grasos libres, mas no con el valor de p-anisidina de *Macadamia integrifolia*, pudiendo responder la primera pregunta de investigación. También, se pudo observar datos significativamente diferentes entre sí para el mismo parámetro, como en el valor de peróxidos. Se cree que la principal razón para este hallazgo es la heterogeneidad de la muestra. Asimismo, se observó que dos variables que se creía que tenían una relación proporcional entre ellas, siendo estos el contenido de humedad y la actividad de agua, no necesariamente mantienen esta relación, y que factores como la permeabilidad del vapor de agua del empaque pueden conllevar a resultados diferentes a los esperados.

En cuanto a la segunda pregunta de investigación, se encontró que el nivel 3 mantiene a los ácidos grasos libres más bajos y estables a lo largo del tiempo, por lo que secar y procesar la nuez a un contenido de humedad de 1.68% y una actividad de agua de 0.381 podría mantener la nuez en buenas condiciones por más tiempo. El valor de peróxidos no fue un parámetro válido para responder esta pregunta, a pesar de tener una relación con estas dos variables, debido a la alta variación de sus datos. Asimismo, el valor de p-anisidina no es un parámetro concluyente para esta pregunta, al no mostrar una relación estadísticamente significativa con las variables.

16. Recomendaciones

Considerando los puntos de discusión, se recomienda que en futuras investigaciones se tenga un mayor control de la procedencia de la muestra y que esta sea lo menos homogénea posible. Asimismo, para reducir o evitar la variación en el contenido de humedad, se recomienda disminuir la permeabilidad de vapor de agua del empaque a utilizar. En cuanto a la medición de la actividad del agua, se recomienda trabajar con un equipo que cuente con un ajuste de temperatura manual, para adaptarse a las condiciones de trabajo deseadas. Finalmente, se recomienda prolongar el tiempo de análisis, para observar diferentes resultados.

17. Referencias

- Allen, J., y Hamilton, R. (1994). *Rancidity in Foods*. Chapman and Hall.
- Anderson, D. R., Sweeney, D. J., y Williams, T. A. (2012). *Estadística para negocios y economía*. 11a. ed. Cengage Learning.
- Barbosa-Cánovas, G. V., Fontana, A. J., Schmidt, S. J., y Labuza, T. P. (2020). *Water Activity in Foods*. John Wiley y Sons.
- Bungay, D. (2022). *Macadamias: An Overview and Guide to Preservation Principles and Engineering Practice*. 2nd edición. Jen Davis Design y Photography.
- Borompichaichartkul, C., Luengsode, K., Chinprahast, N., y Devahastin, S. (2009). Improving quality of macadamia nut (*Macadamia integrifolia*) through the use of hybrid drying process. *Journal of Food Engineering*, 93(3), 348–353. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.01.035>
- Chitundu, E. M. (1994). *Studies on the shelf life of macadamia nuts*. University of Western Sydney-Hawkesbury.
- Domínguez, I. L., Azuara, E., Vernon-Carter, E. J., y Beristain, C. I. (2007). Thermodynamic analysis of the effect of water activity on the stability of macadamia nut. *Journal of Food Engineering*, 81(3), 566–571. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.12.012>
- Dudzile Buthelezi, N. M., Samukelo Magwaza, L., y Zeray Tesfay, S. (2019). Postharvest pre-storage processing improves antioxidants, nutritional and sensory quality of macadamia nuts. *Scientia Horticulturae*, 251, 197–208. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.03.026>
- Hu, W., Fitzgerald, M., Topp, B., Alam, M., y O'Hare, T. J. (2019). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S175646461930444X>. *Journal of Functional Foods*, 1756-4646.
- McConchie, C., Yang, A., Forrester, R., Underdown, S., y Macpherson, K. (2010). *Optimising kernel processing for shelf life*. Horticulture Australia.
- Organisation, W. M. (2024). *World Macadamia Organisation*. Obtenido de Nutritional information: <https://www.worldmacadamia.com/nutritional-data/>

- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., y Crouch, S. R. (2015). *Fundamentos de química analítica*. Cengage Learning.
- Wallace, H. M., y Walton, D. A. (2011). Macadamia (*Macadamia integrifolia*, *Macadamia tetraphylla* and hybrids). In *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits* (pp. 450–474e). Elsevier.

18. Anexos

A continuación, en el Cuadro 6 se presentan los datos tomados para cada una de las mediciones realizadas para determinar el contenido de humedad de las muestras, a lo largo de los 21 días de análisis. Los datos resaltados en amarillo representan a los datos considerados atípicos, que fueron eliminados y no tomados en cuenta para el resto de los análisis. Los datos están en porcentaje (%).

Cuadro 6

Mediciones individuales realizadas en triplicado para el contenido de humedad

Medición	Nivel	Día 0	Día 1	Día 7	Día 14	Día 21
1	1	2.16	2.05	1.7	1.52	1.26
2	1	2.11	1.92	1.75	1.55	1.29
3	1	2.01	1.96	1.7	1.55	1.26
1	2	1.85	1.78	1.16	1.28	1.23
2	2	1.87	1.69	1.3	1.5	1.09
3	2	1.84	1.83	1.16	1.42	1.06
1	3	1.64	1.48	1.59	1.11	0.95
2	3	1.68	1.58	1.5	1.06	0.95
3	3	1.71	1.51	1.54	1.19	1.1
1	4	1.24	1.19	1.35	1.14	1.14
2	4	1.32	1.21	1.24	1.53	1.15
3	4	1.35	1.31	1.27	1.36	1.12

Nota. Elaboración propia.

En el Cuadro 7, presentan los datos tomados para cada una de las mediciones realizadas para determinar la actividad de agua de las muestras, a lo largo de los 21 días de análisis. Los datos resaltados en amarillo representan a los datos considerados atípicos, que

fueron eliminados y no tomados en cuenta para el resto de los análisis. Los datos no tienen dimensional.

Cuadro 7

Mediciones individuales realizadas en triplicado para la actividad del agua

Medición	Nivel	Día 0	Día 1	Día 7	Día 14	Día 21
1	1	0.475	0.485	0.449	0.419	0.406
2	1	0.462	0.471	0.449	0.412	0.443
3	1	0.452	0.481	0.440	0.435	0.471
1	2	0.416	0.428	0.463	0.394	0.413
2	2	0.436	0.426	0.464	0.432	0.435
3	2	0.436	0.441	0.461	0.429	0.430
1	3	0.372	0.401	0.475	0.324	0.330
2	3	0.390	0.441	0.488	0.384	0.390
3	3	0.446	0.443	0.475	0.426	0.402
1	4	0.288	0.321	0.384	0.325	0.306
2	4	0.306	0.348	0.400	0.405	0.331
3	4	0.329	0.361	0.403	0.395	0.362

Nota. Elaboración propia.

En el Cuadro 8, se presentan los datos tomados para cada una de las mediciones realizadas para determinar el valor de peróxidos de las muestras, a lo largo de los 21 días de análisis. Los datos resaltados en amarillo representan a los datos considerados atípicos, que fueron eliminados y no tomados en cuenta para el resto de los análisis. Los datos están representados en meq O₂/kg. Cabe destacar que aquellos datos representados como 0.01 meq O₂/kg realmente fueron indicados como <0.01 meq O₂/kg por el equipo. Sin embargo, este no es un valor numérico exacto y no se podía trabajar con él, por lo que se optó por utilizar 0.01 meq O₂/kg.

Cuadro 8

Mediciones individuales realizadas en triplicado para el valor de peróxidos

Medición	Nivel	Día 0	Día 1	Día 7	Día 14	Día 21
1	1	0.06	0.01	0.33	0.15	0.02
2	1	0.01	0.01	1.15	0.01	0.01
3	1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
1	2	0.01	0.16	0.42	3.32	0.04
2	2	0.01	0.1	0.01	0.01	0.02
3	2	0.08	0.1	0.01	1.26	0.52
1	3	0.01	0.53	1.62	3.29	3.4
2	3	0.11	0.08	0.24	1.06	0.04
3	3	0.01	0.01	0.12	1.69	1.85
1	4	0.01	0.19	1.26	2.21	1.84
2	4	0.01	0.02	0.03	3.4	1.23
3	4	0.02	0.01	0.03	2.18	2.5

Nota. Elaboración propia.

En el Cuadro 9, se presentan los datos tomados para cada una de las mediciones realizadas para determinar el contenido de ácidos grasos libres de las muestras, a lo largo de los 21 días de análisis. Los datos resaltados en amarillo representan a los datos considerados atípicos, que fueron eliminados y no tomados en cuenta para el resto de los análisis. Los datos están representados en porcentaje (%).

Cuadro 9

Mediciones individuales realizadas en triplicado para el contenido de ácidos grasos libres

Medición	Nivel	Día 0	Día 1	Día 7	Día 14	Día 21
1	1	0.03	0.34	0.27	0.19	0.22
2	1	0.04	0.11	0.18	1.16	0.25
3	1	0.05	0.05	0.2	0.18	0.24
1	2	0.02	0.01	0.13	0.14	0.38

2	2	0.06	0.02	0.14	0.14	0.14
3	2	0.05	0.04	0.15	0.16	0.15
1	3	0.14	0.17	0.19	0.11	0.45
2	3	0.12	0.4	0.12	0.11	0.12
3	3	0.10	0.14	0.12	0.13	0.17
1	4	0.1	0.15	0.1	0.23	0.22
2	4	0.06	0.06	0.08	0.1	0.19
3	4	0.04	0.04	0.09	0.11	0.17

Nota. Elaboración propia.

En el Cuadro 10, se presentan los datos tomados para cada una de las mediciones realizadas para determinar el valor de p-anisidina de las muestras, a lo largo de los 21 días de análisis. Los datos resaltados en amarillo representan a los datos considerados atípicos, que fueron eliminados y no tomados en cuenta para el resto de los análisis. Los datos no tienen dimensional.

Cuadro 10

Mediciones individuales realizadas en triplicado para el valor de p-anisidina

Medición	Nivel	Día 0	Día 1	Día 7	Día 14	Día 21
1	1	0.5	0.7	0.5	0.7	0.9
2	1	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7
3	1	0.5	0.5	0.5	0.7	0.6
1	2	0.5	0.5	0.6	1	0.6
2	2	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5
3	2	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6
1	3	0.5	0.6	1	0.8	0.9
2	3	0.5	0.5	0.5	0.8	0.5
3	3	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6
1	4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7
2	4	0.5	0.5	0.5	0.7	0.5

3	4	0.5	0.5	0.5	0.8	0.5
---	---	-----	-----	-----	-----	-----

Nota. Elaboración propia.

En el Cuadro 11, se presentan los datos promedio para el contenido de humedad de los diferentes cuatro niveles, a lo largo de los 21 días de análisis. Los datos están representados en porcentaje (%).

Cuadro 11

Mediciones promedio para el contenido de humedad

Nivel	Día 0	Día 1	Día 7	Día 14	Día 21
1	2.09	1.98	1.72	1.54	1.27
2	1.85	1.81	1.16	1.46	1.08
3	1.68	1.50	1.54	1.12	0.95
4	1.30	1.20	1.29	1.34	1.14

Nota. Elaboración propia.

En el Cuadro 12, se presentan los datos promedio para la actividad de agua de los diferentes cuatro niveles, a lo largo de los 21 días de análisis. Los datos no tienen dimensional.

Cuadro 12

Mediciones promedio para la actividad de agua

Nivel	Día 0	Día 1	Día 7	Día 14	Día 21
1	0.463	0.483	0.449	0.416	0.457
2	0.463	0.427	0.463	0.431	0.433
3	0.381	0.442	0.475	0.405	0.396
4	0.308	0.355	0.402	0.400	0.319

Nota. Elaboración propia.

En el Cuadro 13, se presentan los datos promedio para el valor de peróxidos de los diferentes cuatro niveles, a lo largo de los 21 días de análisis. Los datos están representados en meq O₂/kg.

Cuadro 13

Mediciones promedio para el valor de peróxidos

Nivel	Día 0	Día 1	Día 7	Día 14	Día 21
1	0.03	0.01	0.17	0.01	0.01
2	0.01	0.10	0.01	0.635	0.03
3	0.01	0.05	0.18	1.38	2.63
4	0.01	0.02	0.03	2.20	1.86

Nota. Elaboración propia.

En el Cuadro 14, se presentan los datos promedio para el contenido de ácidos grasos libres de los diferentes cuatro niveles, a lo largo de los 21 días de análisis. Los datos están representados en porcentaje (%).

Cuadro 14

Mediciones promedio para el contenido de ácidos grasos libres

Nivel	Día 0	Día 1	Día 7	Día 14	Día 21
1	0.04	0.08	0.22	0.19	0.24
2	0.04	0.02	0.14	0.15	0.15
3	0.12	0.16	0.12	0.12	0.15
4	0.07	0.05	0.09	0.11	0.19

Nota. Elaboración propia.

En el Cuadro 15, se presentan los datos promedio para el valor de p-anisidina de los diferentes cuatro niveles, a lo largo de los 21 días de análisis. Los datos no tienen dimensional.

Cuadro 15

Mediciones promedio para el valor de p-anisidina

Nivel	Día 0	Día 1	Día 7	Día 14	Día 21
1	0.5	0.6	0.5	0.7	0.7
2	0.5	0.5	0.5	0.7	0.6
3	0.5	0.5	0.7	0.7	0.7
4	0.5	0.5	0.5	0.7	0.6

Nota. Elaboración propia.

En el Cuadro 16, se presentan las desviaciones estándar para el contenido de humedad de los cuatro niveles, durante los 21 días de análisis. Los datos están representados en porcentaje (%).

Cuadro 16

Desviación estándar del contenido de humedad

Nivel	Día 0	Día 1	Día 7	Día 14	Día 21
1	0.08	0.07	0.03	0.02	0.02
2	0.02	0.04	0.00	0.06	0.02
3	0.04	0.02	0.05	0.07	0.00
4	0.06	0.01	0.06	0.20	0.02

Nota. Elaboración propia.

En el Cuadro 17, se presentan las desviaciones estándar para la actividad de agua de los cuatro niveles, durante los 21 días de análisis. Los datos no tienen dimensional.

Cuadro 17

Desviación estándar de la actividad de agua

Nivel	Día 0	Día 1	Día 7	Día 14	Día 21
1	0.012	0.003	0.000	0.005	0.020
2	0.000	0.001	0.002	0.002	0.004

3	0.013	0.001	0.000	0.030	0.008
4	0.021	0.009	0.002	0.007	0.018

Nota. Elaboración propia.

En el Cuadro 18, se presentan las desviaciones estándar para el valor de peróxidos de los cuatro niveles, durante los 21 días de análisis. Los datos están representados en meq O₂/kg.

Cuadro 18

Desviación estándar del valor de peróxidos

Nivel	Día 0	Día 1	Día 7	Día 14	Día 21
1	0.03	0.00	0.23	0.00	0.01
2	0.00	0.00	0.00	0.88	0.01
3	0.00	0.05	0.08	0.45	1.10
4	0.01	0.01	0.00	0.02	0.64

Nota. Elaboración propia.

En el Cuadro 19, se presentan las desviaciones estándar para el contenido de ácidos grasos libres de los cuatro niveles, durante los 21 días de análisis. Los datos están representados en %.

Cuadro 19

Desviación estándar del contenido de ácidos grasos libres

Nivel	Día 0	Día 1	Día 7	Día 14	Día 21
1	0.01	0.04	0.05	0.01	0.02
2	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
3	0.02	0.02	0.00	0.01	0.04
4	0.03	0.01	0.01	0.01	0.03

Nota. Elaboración propia.

En el Cuadro 20, se presentan las desviaciones estándar para valor de p-anisidina de los cuatro niveles, durante los 21 días de análisis. Los datos no tienen dimensional.

Cuadro 20

Desviación estándar del valor de p-anisidina

Nivel	Día 0	Día 1	Día 7	Día 14	Día 21
1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2
2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1
3	0.1	0.1	0.3	0.1	0.2
4	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1

Nota. Elaboración propia.

En el Cuadro 21, se presentan los datos promedio para cada nivel y el rango asignado para cada dato, así como la suma de rangos de cada nivel.

Cuadro 21

Prueba de Kruskal-Wallis: asignación de rangos y suma de rangos por nivel para el valor de peróxidos

NIVEL 1	Rango N1	NIVEL 2	Rango N2	NIVEL 3	Rango N3	NIVEL 4	Rango N4
0.02	3.5	0.04	5	3.40	10	1.84	7
0.01	1.5	0.02	3.5	1.85	8	1.23	6
0.01	1.5					2.50	9
SUMA DE RANGOS N1	6.5	SUMA DE RANGOS N2	8.5	SUMA DE RANGOS N3	18	SUMA DE RANGOS N4	22

Nota. Elaboración propia.

En el Cuadro 22, se presentan los datos promedio para cada nivel y el rango asignado para cada dato, así como la suma de rangos de cada nivel.

Cuadro 22

Prueba de Kruskal-Wallis: asignación de rangos y suma de rangos por nivel, para el contenido de ácidos grasos

Nivel 1	Rango N1	Nivel 2	Rango N2	Nivel 3	Rango N3	Nivel 4	Rango N4
0.22	7.5	0.14	2	0.12	1	0.22	7.5
0.25	10	0.15	3	0.17	4.5	0.19	6
0.24	9					0.17	4.5
SUMA DE RANGOS N1	26.5	SUMA DE RANGOS N2	5	SUMA DE RANGOS N3	5.5	SUMA DE RANGOS N4	18

Nota. Elaboración propia.

En el Cuadro 23, se presentan los datos promedio para cada nivel y el rango asignado para cada dato, así como la suma de rangos de cada nivel.

Cuadro 23

Prueba de Kruskal-Wallis: asignación de rangos y suma de rangos por nivel para el valor de p-anisidina

Nivel 1	Rango N1	Nivel 2	Rango N2	Nivel 3	Rango N3	Nivel 4	Rango N4
0.9	11.5	0.6	6.5	0.9	11.5	0.7	9.5
0.7	9.5	0.5	2.5	0.5	2.5	0.5	2.5
0.6	6.5	0.6	6.5	0.6	6.5	0.5	2.5
SUMA DE RANGOS N1	27.5	SUMA DE RANGOS N2	15.5	SUMA DE RANGOS N3	20.5	SUMA DE RANGOS N4	14.5

Nota. Elaboración propia.

En el Cuadro 24, se presentan los datos necesarios para poder encontrar el estadístico H de la prueba de Kruskal-Wallis, para cada uno de los tres parámetros de rancidez. El significado de cada término fue explicado anteriormente en la sección de Análisis Estadístico, en la Ecuación No. 4.

Cuadro 24

Prueba de Kruskal-Wallis: datos utilizados en la Figura 3.

Parámetro de rancidez y nivel	R_i^2	n_i	R_i^2/n_i	n_T
Valor de peróxidos (N1)	42.25	3	14.08	7
Valor de peróxidos (N2)	72.25	2	36.13	
Valor de peróxidos (N3)	324	2	162.00	
Valor de peróxidos (N4)	484	3	161.33	
Ácidos grasos libres (N1)	702.25	3	234.08	7
Ácidos grasos libres (N2)	25	2	12.5	
Ácidos grasos libres (N3)	30.25	2	15.13	
Ácidos grasos libres (N4)	324	3	108	
p-anisidina (N1)	756.25	3	252.08	12
p-anisidina (N2)	240.25	3	80.08	
p-anisidina (N3)	420.25	3	140.08	
p-anisidina (N4)	210.25	3	70.08	

Nota. Elaboración propia.

Utilizando los datos presentados en el Cuadro 25 y una fórmula de Microsoft Excel, se pudo encontrar el valor-p, necesario para hacer conclusiones sobre los datos obtenidos.

Cuadro 25

Prueba de Kruskal-Wallis: datos utilizados para encontrar el valor-p

Parámetro de rancidez	Estadístico de Kruskal-Wallis H	Grados de libertad
Valor de peróxidos	56.04	3
Ácidos grasos libres	55.22	3
p-anisidina	2.71	3

Nota. Elaboración propia.