



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

LICENCIATURA EN QUÍMICA

TESIS

**CARACTERIZACIÓN DE LA CAPACIDAD
ANTIOXIDANTE DE FLORES COMESTIBLES
MEDIANTE VOLTAMPEROMETRÍA CÍCLICA Y SU
EFECTO EN LA ELABORACIÓN DE HELADOS A
BASE DE LECHE**

Para obtener el título de

Licenciado en Química

PRESENTA

Adrián López Rosales

Director

Dr. José Antonio Rodríguez Ávila

Codirectora

Dra. Eva María Santos López

Mineral de la Reforma, Hgo., México, 2025



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 26 de septiembre de 2025

Número de control: ICBI-D/1716/2025
Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado al egresado de la Licenciatura en Química **Adrian Lopez Rosales**, quien presenta el trabajo de titulación **"Caracterización de la capacidad antioxidante de flores comestibles mediante voltamperometría cíclica y su efecto en la elaboración de helados a base de leche"**, ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Carlos Andrés Galán Vidal

Secretario: Dra. Irais Sánchez Ortega

Vocal: Dr. José Antonio Rodríguez Ávila

Suplente: Dra. Eva María Santos López

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director de ICBI



GVR/YCC

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carbocheras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uaeh.edu.mx

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi madre, Virginia, quien, aunque no ha estado presente físicamente en mi vida, siempre ha permanecido en mi corazón, siempre presente con su apoyo, amor y esfuerzo incondicional hacia mí y mi hermano. Su ejemplo de fortaleza y sacrificio ha sido una motivación constante para dar lo mejor de mí y para no rendirme ante las dificultades.

A mi abuelo Juan, por todos los conocimientos y enseñanzas que me ha compartido a lo largo de mi vida. Sus palabras y su ejemplo me han mostrado el valor del esfuerzo, la perseverancia, cualidades que me han permitido llegar hasta aquí.

A mi abuela materna Catalina, quien partió antes de que pudiera compartir con ella este logro. Su memoria sigue viva en mi corazón y en las lecciones de vida que me transmitió. Este trabajo también es un homenaje a su cariño y a la huella imborrable que dejó en mí.

A mis tíos Juan, Susana, Yuliana, Ricardo, Marilú y Javier, por su apoyo, consejos y cariño incondicional. Cada uno, a su manera, ha contribuido a mi formación y me ha brindado el respaldo que en muchos momentos necesité para seguir adelante.

A mis asesores de tesis, el Dr. José Antonio Rodríguez Ávila y la Dra. Eva María Santos López, por su valiosa orientación, paciencia y compromiso en cada etapa de esta investigación. Sus consejos y su confianza han sido fundamentales para que este proyecto alcanzara su forma final.

A mis amigos, bobes, por su apoyo constante, su amistad sincera y por estar presentes en los momentos más complejos, recordándome que la vida también se construye con risas, compañía y afecto genuino.

A mi amiga Adi, por su compañía y su disposición a estar siempre que la he necesitado, ofreciendo su ayuda y su escucha en los momentos en que más lo requería.

Y, finalmente, a la niña que ha sido un pilar importante en mi vida, la que llevo tatuada en mi piel, que, durante todo este proceso, me ha apoyado a salir adelante incluso cuando las circunstancias parecían adversas. Su fe en mí y su apoyo incondicional a pesar de todos los problemas que han pasado, ha sido una luz que me ha guiado y motivado a continuar persiguiendo mis metas.

Contenido

Índice de figuras	ii
Índice de tablas.....	iii
1. Resumen	1
2. Antecedentes.....	3
2.1 Flores comestibles y sus propiedades	3
2.2. Compuestos bioactivos presentes en las flores comestibles.	5
2.2.1. Fenoles.....	5
2.2.2. Flavonoides.	6
2.2.3. Carotenoides	7
2.3. Caracterización de flores	8
2.3.1. Taxonómica	8
2.3.2. Química	9
2.4. Uso de plantas comestibles en alimentos	12
3. Objetivos.....	16
3.1 Objetivo general	16
3.2 Objetivos específicos	16
4.1 Reactivos y soluciones	18
4.2 Voltamperometría cíclica.....	18
4.3 Evaluación de la capacidad antioxidante en extractos metanólicos	19
4.4 Elaboración y evaluación helado base leche.....	20
5.1 Análisis de compuestos de referencia.....	25
5.1.1 Voltamperometría cíclica de los compuestos de referencia.....	25
5.2.1 Voltamperometría cíclica para los extractos flores	33
6. Conclusión.	45
7. Referencias.....	47

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama que muestra los beneficios de la salud relacionadas a las flores comestibles.....	4
Figura 2. Ejemplos de algunas estructuras de fenoles simples.....	6
Figura 3. Ejemplos de algunos tipos de flavonoides.....	7
Figura 4. Estructuras de algunos ejemplos de carotenoides.....	8
Figura 5. Diagrama con la composición nutricional básica de las flores y sus técnicas para analizar.....	10
Figura 6. Voltamperograma cíclico del ácido ascórbico y su reacción de oxidación asociada.....	26
Figura 7. Voltamperograma cíclico del ácido gálico y su reacción de oxidación asociada.....	27
Figura 8. Voltamperograma cíclico del ácido cafeico y su reacción de oxidación asociada.....	28
Figura 9. Voltamperograma cíclico de la Alizarina S y su reacción de oxidación asociada.....	29
Figura 10. Voltamperograma cíclico de la Hidroquinona y su reacción de oxidación asociada.....	30
Figura 11. Voltamperograma cíclico de Trolox y su reacción de oxidación asociada.....	31
Figura 12. Tabla de datos FRAP vs voltaje de compuestos de referencia.....	33
Figura 13. Voltamperogramas cíclicos del extracto metanólico para las flores: a) romero, b) lavanda, c) flor de durazno, d) flor de sábila roja.....	34
Figura 14. Estructura del ácido rosmarínico.....	35
Figura 15. Estructura del ácido vanílico.....	36
Figura 16. Estructura del ácido 3,5-di-O-cafeoilquínico.....	36
Figura 17. Estructura del ácido 5-O-cafeoilquínico.....	37
Figura 18. Voltamperograma de flor de buganvilla, flor de colorín, flor de diente de león y flor de calabaza.....	38
Figura 19. Voltamperograma de flor de maguey, flor de garambullo, flor de jamaica y flor de sábila amarilla.....	38
Figura 20. Síntesis de 7-hidroxi-5-pentil-4H-cromeno-4,4-d ₂ -3-carbaldehído.....	41
Figura 21. Evolución del índice TBA (iTBA, expresado en mg de MDA por kg de muestra) durante el almacenamiento en refrigeración de helados a base de leche.....	42

Índice de tablas

Tabla 1. Ingredientes y cantidades por formulación. Las marcas especificadas corresponden a los productos utilizados en el estudio.	21
Tabla 2. Datos de compuestos de referencia obtenidos de la prueba FRAP y voltamperometría cíclica	32
Tabla 3. Valores de FRAP experimentales obtenidos de los extractos metanólicos florales	39
Tabla 4. Resultados obtenidos de la prueba TBARS aplicada a las muestras de helado a base leche con la flor de lavanda y caramelo, y helado con caramelo de lavanda	40
Tabla 5. Comparación de las pendientes de incremento de iTBA ($\text{mg}_{\text{MDA}}/\text{kg}_{\text{muestra}}$) durante el almacenamiento de las distintas formulaciones de helado.	42

1. Resumen

Las flores comestibles han sido utilizadas desde tiempos ancestrales por sus propiedades sensoriales, nutricionales y medicinales. En México, su uso está profundamente arraigado en la cultura prehispánica, destacando especies como la flor de calabaza (*Cucurbita pepo*), el cempasúchil (*Tagetes erecta*). Estas flores no solo aportan color, aroma y sabor a los alimentos, sino que también contienen compuestos bioactivos con actividad antioxidante, antiinflamatoria y antimicrobiana, principalmente fenoles, flavonoides y carotenoides. Dichos compuestos pueden desempeñar un papel relevante en la prevención de enfermedades degenerativas y en la estabilización oxidativa de productos alimenticios.

El objetivo de este estudio fue evaluar la capacidad antioxidante de extractos metanólicos de doce especies de flores comestibles mediante voltamperometría cíclica (CV) y determinar su impacto en la inhibición de la oxidación lipídica en helados a base de leche. Los extractos fueron caracterizados utilizando técnicas de voltamperometría cíclica (CV) y espectrofotométricas (FRAP, Folin-Ciocalteu), estableciendo correlaciones entre los potenciales de oxidación y la capacidad antioxidante. Entre las especies analizadas, *Lavandula angustifolia* destacó por su bajo potencial de oxidación y elevada capacidad reductora, atribuida a compuestos fenólicos como el ácido cafeico.

A partir de estos resultados, se formuló un helado funcional enriquecido con flor de lavanda, cuya estabilidad oxidativa fue evaluada mediante el ensayo TBARS. La incorporación del extracto floral redujo en un 12% los niveles iniciales de malondialdehído (MDA) y disminuyó significativamente la tasa de oxidación durante el almacenamiento.

En conjunto, este estudio validó el uso de la voltamperometría cíclica como una herramienta eficaz para la caracterización electroquímica de matrices vegetales complejas, destacando a *Lavandula angustifolia* como un ingrediente funcional con potencial antioxidante en productos lácteos. La aplicación de sus extractos en helados no solo mejoró la estabilidad oxidativa del producto, sino que integró atributos nutracéuticos, abriendo nuevas perspectivas para el desarrollo de alimentos innovadores basados en recursos naturales.

Antecedentes



2. Antecedentes

2.1 Flores comestibles y sus propiedades

Las flores comestibles se han utilizado tradicionalmente para el consumo humano en diversas culturas. Mejoran la apariencia, el sabor y el valor estético de los alimentos, aspectos que los consumidores aprecian, justificando la tendencia creciente de las ventas de flores frescas de primera calidad en todo el mundo (Pires et al., 2021). Sin embargo, los consumidores también demandan alimentos con propiedades beneficiosas para la salud, además de los nutrientes que contienen, buscando cualidades funcionales como propiedades antioxidantes y antimicrobianas.

A lo largo de los siglos, las flores comestibles han sido valoradas tanto por sus propiedades medicinales como por su uso en el ámbito culinario en diversas regiones. Actualmente, se reconoce una amplia diversidad de flores comestibles (Fernández-López et al., 2020), respaldada por numerosos estudios que analizan su composición química y exploran sus posibles propiedades antioxidantes y funcionales. Son fuentes de una variedad de compuestos bioactivos, los más comunes incluyen fenoles, flavonoides, carotenoides, tocoles y compuestos terpénicos. Sin embargo, la mayoría de las flores comestibles se centran en los beneficios para la salud y en algunas de ellas se incluye una breve descripción de los principales componentes (Kandyliis, 2022).

Las flores comestibles suelen poseer sus colores llamativos, aromas envolventes y sabores únicos, características que estimulan intensamente los sentidos y las convierten en elementos atractivos en la gastronomía. Además de su aporte sensorial, poseen un gran valor funcional gracias a su contenido de compuestos bioactivos, sus beneficios para la salud y sus múltiples aplicaciones en el ámbito médico en el tratamiento de enfermedades (Fig. 1) como enfermedades metabólicas (*diabetes mellitus*), enfermedades cardiovasculares (hipertensión), enfermedades inflamatorias (artritis), trastornos neurodegenerativos (alzheimer y parkinson) e infecciones microbianas (Lara-Cortez et al., 2013).

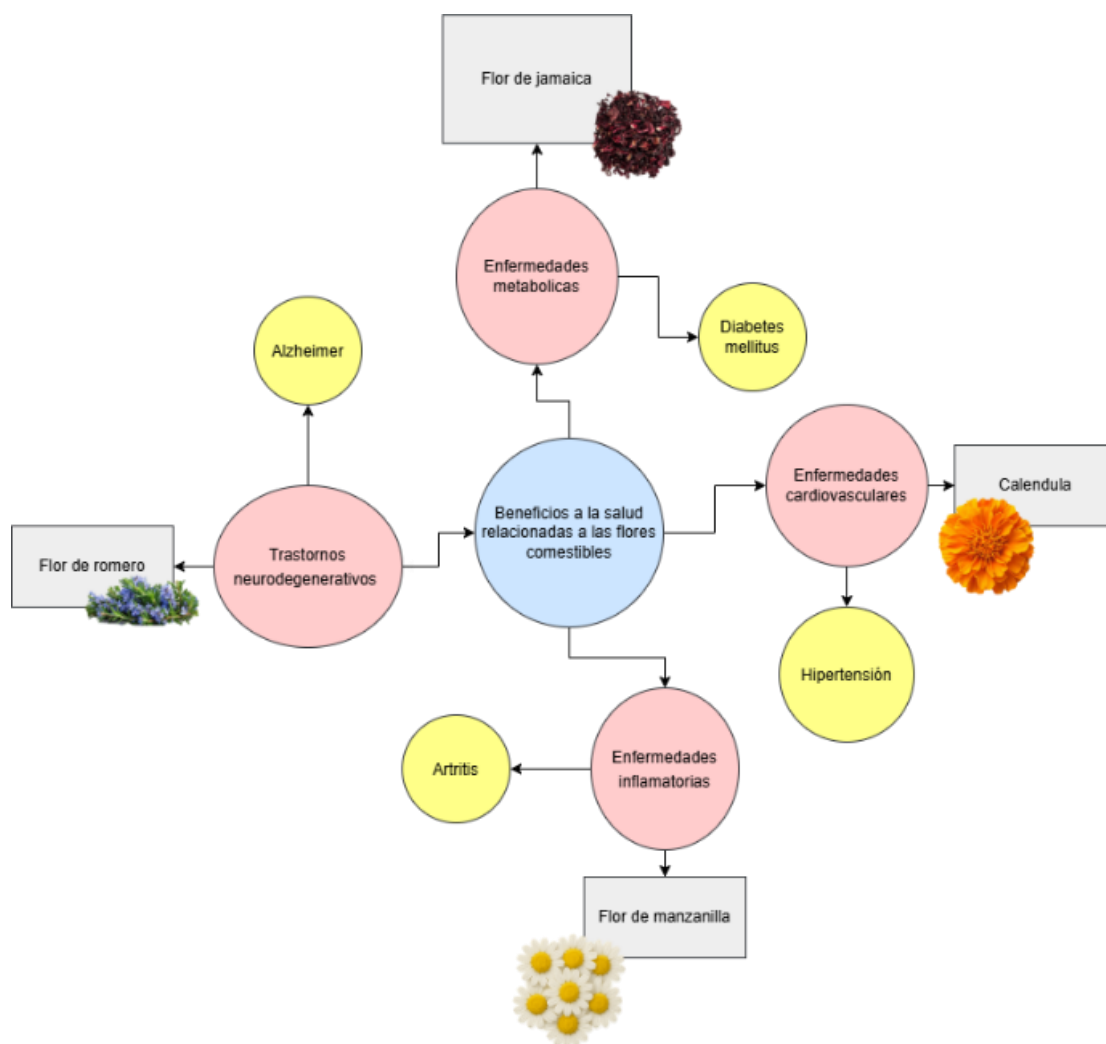


Figura 1. Diagrama que muestra los beneficios de la salud relacionados a las flores comestibles (Lara-Cortez et al., 2013).

En México, el consumo de flores comestibles tiene profundas raíces culturales y culinarias que se remontan a la época prehispánica. Flores como las de calabaza (*Cucurbita pepo*), colorín (*Erythrina americana*), cempasúchil (*Tagetes erecta L.*), dalia (*Dahlia spp.*) y rosita de cacao (*Quararibea funebris*) son ingredientes tradicionales en la gastronomía mexicana, utilizadas en platillos como sopas, tamales, quesadillas y bebidas ceremoniales. (Mulík et.al., 2020). A diferencia de otras culturas donde las flores se emplean principalmente como decoración, en México suelen cocinarse, lo que realza sus sabores y concentra sus nutrientes. Su importancia trasciende lo nutricional, ya que están ligadas a rituales, festividades como el Día de Muertos y prácticas medicinales ancestrales, reflejando una herencia cultural viva y diversa.

Estas flores no solo enriquecen la dieta con proteínas de calidad y minerales, sino que también son fuente de compuestos bioactivos con actividad antioxidante, entre los que destacan los compuestos fenólicos (Pires et al., 2021). Estos no solo contribuyen a la intensidad de sus colores, sino que también han ganado relevancia por sus propiedades farmacológicas y terapéuticas. En particular, los pigmentos antociánicos han despertado un interés significativo debido a la actividad antioxidante de los compuestos fenólicos, que se ha descrito en la prevención de diversas enfermedades degenerativas (Rodríguez et. al., 2019).

2.2. Compuestos bioactivos presentes en las flores comestibles.

Las flores comestibles son una fuente rica y diversa de compuestos bioactivos, los cuales contribuyen tanto a su valor funcional como a sus beneficios para la salud. Entre estos compuestos, destacan principalmente los fenoles, flavonoides, carotenoides, entre otros, que han sido estudiados extensamente por su actividad antioxidante, antimicrobiana y antiinflamatoria, son esenciales para mejorar la calidad y la estabilidad de productos como helados, productos lácteos, y alimentos procesados, promoviendo al mismo tiempo beneficios para la salud del consumidor (Rodríguez et al., 2021).

2.2.1. Fenoles

Los fenoles son compuestos bioactivos ampliamente distribuidos en las plantas, incluidas las flores comestibles. Estos compuestos se caracterizan por su estructura química, que incluye uno o más grupos hidroxilo (-OH) unidos a un anillo aromático (Shahidi & Ambigaipalan, 2015). Los fenoles son conocidos por sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas, lo que los convierte en componentes clave para la salud humana y la estabilidad de los alimentos. (Kandylis et. al., 2022). Dentro de los fenoles, se encuentran subclases como los ácidos fenólicos, flavonoides y taninos, que contribuyen significativamente a las propiedades funcionales de las flores comestibles (*Fig. 2*).

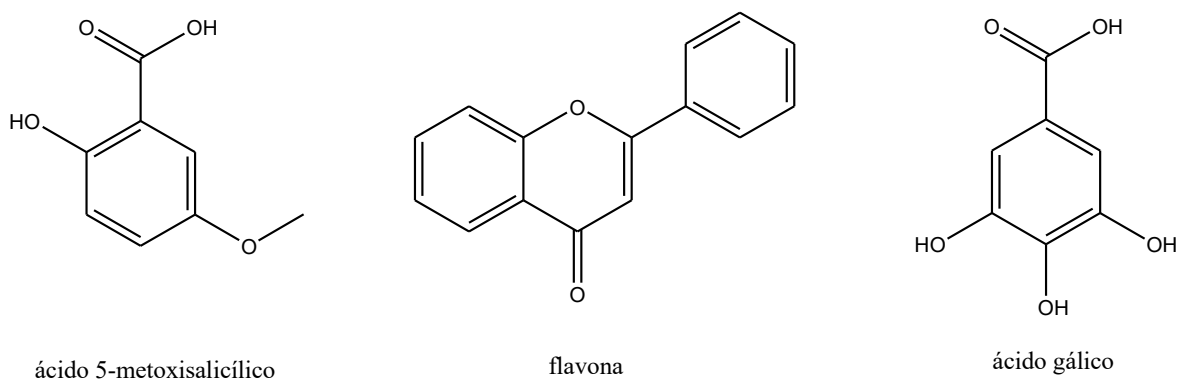


Figura 2. Ejemplos de algunas estructuras de fenoles simples.

Los compuestos polifenólicos son reconocidos por su capacidad para neutralizar radicales libres y reducir el estrés oxidativo, lo que ayuda a prevenir enfermedades degenerativas como enfermedades cardiovasculares, diabetes y cáncer (Rodríguez et.al., 2019). Esta propiedad es particularmente relevante en el contexto de la oxidación de alimentos, donde los fenoles pueden inhibir la rancidez y prolongar la vida útil de los productos (Rodrigues, 2017).

2.2.2. Flavonoides.

Los flavonoides son una clase importante de compuestos fenólicos ampliamente distribuidos en las plantas, incluidas las flores comestibles (Khoo et. al., 2017). Estos compuestos se caracterizan por su estructura química basada en un esqueleto de 15 carbonos.

Los flavonoides se clasifican según su estructura química y grado de oxidación (Fig. 3). Entre las más comunes se encuentran:

- Flavonas: Presentes en flores como la manzanilla (*Matricaria chamomilla*), son conocidas por sus propiedades antiinflamatorias y antioxidantes (Tungmunnithum, 2018).
- Flavonoles: Abundantes en flores como el té verde (*Camellia sinensis*), estos compuestos contribuyen a la protección contra el estrés oxidativo (Khoo et. al., 2017).
- Antocianinas: Responsables de los colores vibrantes en flores como la bugambilia (*Bougainvillea glabra*), tienen propiedades antioxidantes y cardioprotectoras (González-Barrio, 2018).

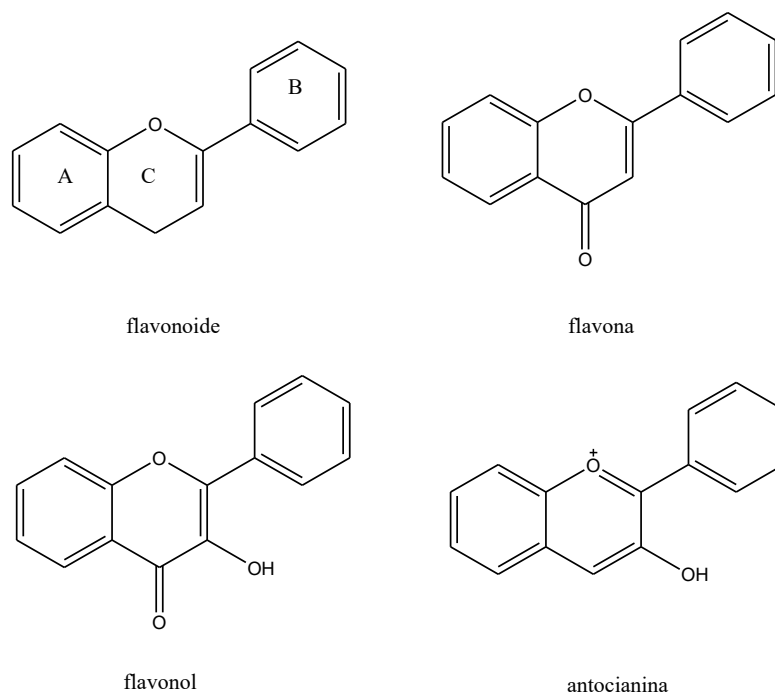


Figura 3. Estructura de los subgrupos de flavonoides.

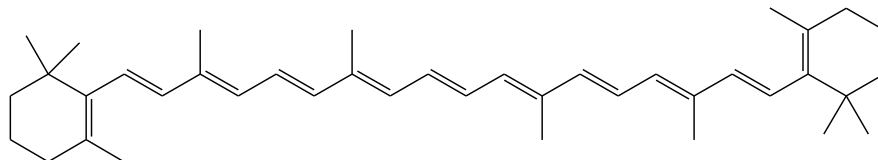
2.2.3. Carotenoides

Los carotenoides son una clase importante de pigmentos naturales ampliamente distribuidos en las plantas, incluidas las flores comestibles. Estos compuestos son responsables de los colores vibrantes que van desde el amarillo hasta el rojo intenso, y desempeñan un papel crucial tanto en la fotosíntesis como en la protección de las plantas contra el estrés oxidativo (Rodríguez-Amaya et. al., 2016). Además de su función en las plantas, los carotenoides tienen propiedades antioxidantes y beneficios para la salud humana, lo que los convierte en componentes valiosos en la industria alimentaria (Pires et al., 2021).

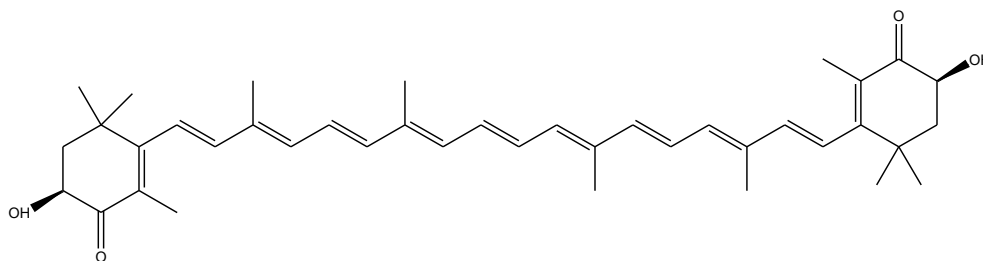
Los carotenoides son compuestos liposolubles con una estructura química basada en una cadena larga de polienos (múltiples dobles enlaces conjugados) y anillos terminales (Rodríguez-Amaya, 2016). Se clasifican en dos grupos principales (*Fig. 4*):

- **Carotenos:** Son hidrocarburos puros, sin grupos funcionales oxigenados. Ejemplos incluyen el β -caroteno y el licopeno.

- Xantófilas: Contienen grupos funcionales oxigenados, como hidroxilos (-OH), cetonas (C=O) o epóxidos. Ejemplos incluyen la luteína, la zeaxantina y la astaxantina.



β-caroteno



astaxantina

Figura 4. Estructuras de algunos ejemplos de carotenoides.

2.3. Caracterización de flores

La caracterización de flores comestibles demanda un enfoque analítico multidisciplinario, integrando técnicas fisicoquímicas e instrumentales para evaluar su composición nutricional, propiedades funcionales y parámetros de calidad. Este proceso se sustenta en metodologías estandarizadas y validadas, las cuales permiten determinar su idoneidad y potencial de aplicación en la industria alimentaria.

2.3.1. Taxonómica

La identificación botánica precisa es el primer paso en la caracterización de flores comestibles (Pires et al., 2021). Esto incluye:

- Clasificación científica completa (familia, género, especie)
- Descripción morfológica detallada (inflorescencia, pétalos, sépalos, estambres)
- Características organolépticas distintivas (color, aroma, textura)

La taxonomía vegetal moderna se basa en sistemas integrados que combinan características morfológicas con marcadores moleculares. Para flores comestibles, es particularmente importante verificar la correcta identificación de especies, ya que algunas pueden confundirse con variedades no comestibles o tóxicas (Pires et al., 2021).

2.3.2. Química

La caracterización química de las flores comestibles es un proceso esencial para determinar su valor nutricional, identificar compuestos bioactivos y evaluar su calidad sensorial. Este análisis no solo permite comprender su potencial como ingredientes funcionales, sino que también garantiza su seguridad y eficacia en aplicaciones alimentarias (Fernández-López et al., 2020).

Se ha observado que las flores comestibles presentan un perfil nutricional notable (AOAC International, 2016), con altos contenidos de vitaminas, minerales, aceites esenciales y fibra, lo que las convierte en una fuente valiosa de nutrientes (Fig. 5). La caracterización de las flores comestibles se puede realizar a partir del análisis de macro- y micro-nutrientes mediante metodologías analíticas validadas, de vía húmeda e instrumentales como la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) y métodos espectrofotométricos (Englyst, 2000).

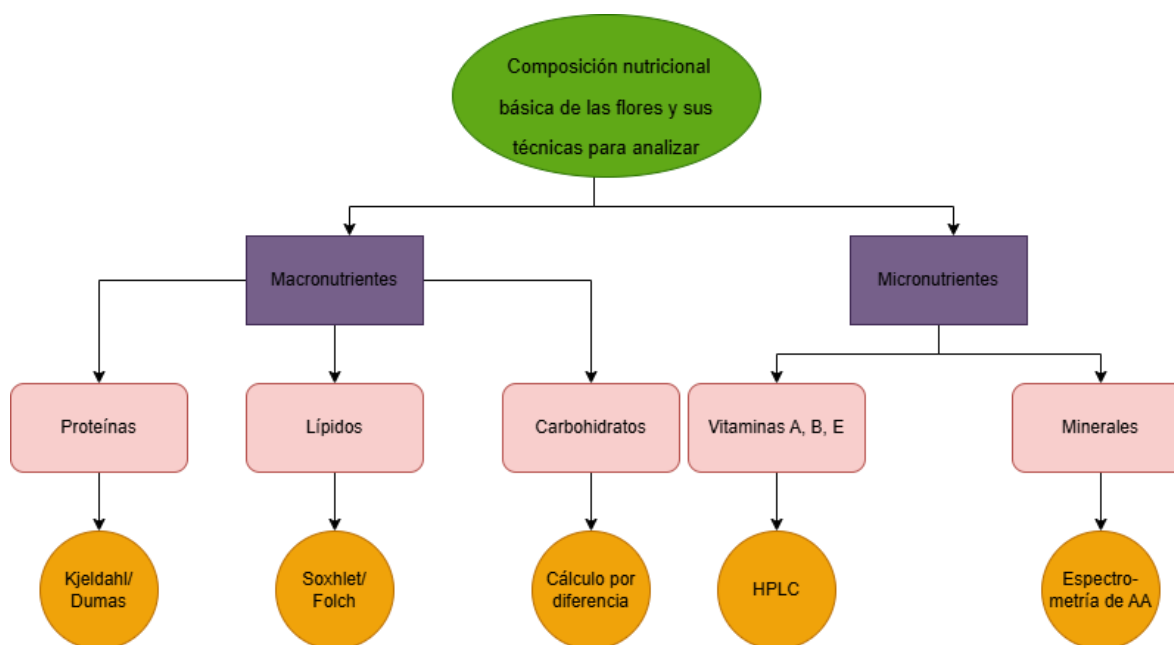


Figura 5. Diagrama con la composición nutricional básica de las flores y sus técnicas para analizar.
Elaboración propia con base en AOAC International (2016).

Diversos estudios han demostrado que las flores comestibles contienen una amplia gama de compuestos bioactivos (Singleton & Rossi, 1965), los cuales poseen propiedades antioxidantes. Dichas propiedades están asociadas a su potencial de oxidación, por lo que se emplean técnicas espectroscópicas como:

- FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power): Evalúa la capacidad reductora de los antioxidantes presentes en las flores mediante la reducción del complejo férrico (Fe^{3+}) a ferroso (Fe^{2+}). Este método es útil para cuantificar la actividad antioxidante total en muestras biológicas (Benzie & Strain, 1996).
- Polifenoles Totales: Se determinan mediante el método de Folin-Ciocalteu, que cuantifica los grupos fenólicos presentes en las flores a través de una reacción colorimétrica. Los resultados se expresan en equivalentes de ácido gálico (GAE) por gramo de muestra (García Martínez et al., 2008).
- TBARS (Sustancias Reactivas al Ácido Tiobarbitúrico): Mide el grado de oxidación lipídica mediante la reacción de malondialdehído (MDA) con el ácido tiobarbitúrico, dicho aldehído es un producto secundario de la peroxidación de grasas insaturadas (Ghani et al., 2017).
- DPPH (2,2-Difenil-1-Picrilhidrazil): Evalúa la capacidad de las flores para neutralizar radicales libres mediante la decoloración del radical DPPH•, que cambia de violeta

a amarillo al ser reducido. Se expresa como porcentaje de inhibición o equivalentes de Trolox (Prior, Wu & Schaich, 2005).

- ABTS (2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico)): determina la capacidad antioxidante a partir de la decoloración del catión radical ABTS, generado químicamente, al reaccionar con donadores de hidrógeno o de electrones; los resultados suelen expresarse como equivalentes de Trolox (TEAC) (Re et al., 1999).

Además de estas técnicas tradicionales, la integración de enfoques complementarios, como la voltamperometría cíclica, el uso de electrodos serigrafiados de bajo costo, permite profundizar en el entendimiento del comportamiento redox de matrices complejas y mejorar la comparabilidad entre métodos. El uso de estas técnicas es eficiente; sin embargo, la búsqueda de métodos alternativos que reduzcan costos y tiempos resulta prioritaria para su adopción en entornos con recursos limitados. En este sentido, la miniaturización de ensayos, la automatización de protocolos, la lectura en microplacas y el acoplamiento selectivo con análisis cromatográficos o espectroscópicos ofrecen rutas viables para incrementar la rapidez, reproducibilidad y sensibilidad, manteniendo la robustez analítica necesaria para el desarrollo de alimentos funcionales basados en flores comestibles.

Las técnicas electroquímicas han sido ampliamente reconocidas como una herramienta viable para la estimación del potencial antioxidante, destacando entre ellas la voltamperometría cíclica (CV) como una de las metodologías más empleadas por su sensibilidad, rapidez y capacidad para ofrecer información detallada sobre los procesos redox de los compuestos fenólicos (Firuzi et al., 2005). Patil et al. (2024) subrayan la utilidad de la CV en el análisis de matrices alimentarias complejas, evidenciando su capacidad para correlacionarse con métodos espectrofotométricos como DPPH, FRAP y ABTS. En esta línea, el estudio de Pastor et al. (2020) demostró la eficacia de la CV al evaluar la actividad antioxidante de compuestos como epigallocatequina galato, rutina y catequina, expresando los resultados en equivalentes de ácido gálico (mmol GAE mol^{-1}), con una correlación significativa respecto a métodos tradicionales. Por su parte, Zielińska y Turemko (2020) aplicaron esta técnica en extractos de manzana, donde el área bajo la curva anódica se relacionó directamente con la capacidad reductora de los compuestos fenólicos presentes. Además, la CV no solo destacó por su menor tiempo de análisis y bajo consumo de reactivos orgánicos, sino que también demostró ser una alternativa más ecológica y rentable para análisis rutinarios en alimentos funcionales y naturales, consolidándose como una herramienta clave en la evaluación de la capacidad antioxidante.

2.4. Uso de plantas comestibles en alimentos

La caracterización química y funcional de plantas comestibles como las flores ha sentado las bases para su integración en sistemas alimentarios complejos. Estos vegetales no solo destacan por su valor nutricional y riqueza en compuestos bioactivos, sino también por su capacidad para intervenir en mecanismos oxidativos dentro de los alimentos, lo cual les otorga un papel destacado en la formulación de productos funcionales (Fernández-López, 2020).

Uno de los procesos más relevantes donde los antioxidantes naturales ejercen su función es en la prevención de la oxidación lipídica. Las grasas en los alimentos, principalmente en forma de triglicéridos, están formadas por ácidos grasos saturados e insaturados (Shahidi & Ambigaipalan, 2015). Los ácidos grasos insaturados, especialmente los poliinsaturados, son altamente susceptibles a la oxidación por la presencia de dobles enlaces en sus cadenas carbonadas. Este proceso ocurre por la acción de especies reactivas de oxígeno (ROS), luz, calor, metales de transición u otras condiciones pro-oxidantes, y se traduce en la formación de hidroperóxidos, radicales libres y productos secundarios de oxidación como el malondialdehído (MDA), hexanal, y otros aldehídos reactivos (Shahidi, et. al., 2015).

El MDA es uno de los marcadores más comúnmente utilizados para evaluar el grado de deterioro oxidativo de las grasas, ya que su formación es indicativa de etapas avanzadas de peroxidación lipídica. Este compuesto tiene la capacidad de reaccionar con diversas biomoléculas, incluyendo proteínas y ADN, pudiendo comprometer tanto la calidad como la inocuidad del alimento. Por ello, la cuantificación del MDA permite estimar la eficacia de ingredientes con actividad antioxidante incorporados en una matriz alimentaria, funcionando como indicador del deterioro oxidativo (Del Rio et al., 2019).

Una de las metodologías más utilizadas para esta evaluación es el ensayo de Sustancias Reactivas al Ácido Tiobarbitúrico (TBARS, por sus siglas en inglés). Este método se basa en la reacción del MDA con ácido tiobarbitúrico bajo condiciones ácidas y de temperatura elevada, formando un aducto coloreado de color rosado, cuya absorbancia máxima se registra a 532 nm mediante espectrofotometría. La intensidad del color formado está directamente relacionada con la concentración de MDA, permitiendo así cuantificar la extensión del daño oxidativo. Aunque se trata de una técnica indirecta, el ensayo TBARS ha sido ampliamente validado y estandarizado en la literatura científica como una

herramienta confiable para monitorear la estabilidad oxidativa de alimentos ricos en lípidos (González & Paulson ,2022).

En el caso de alimentos complejos como los helados, especialmente aquellos formulados con base láctea, la aplicación de extractos vegetales ricos en compuestos antioxidantes ha mostrado efectos protectores frente a la oxidación. Los helados constituyen sistemas heterogéneos con una fracción grasa dispersa, la cual puede oxidarse durante la producción, almacenamiento y distribución. La incorporación de extractos de flores comestibles, como lavanda (*Lavandula angustifolia*) o buganvilia (*Bougainvillea glabra*) pueden mejorar no solo la estabilidad oxidativa, sino también el perfil sensorial y la funcionalidad del producto final, al introducir compuestos fenólicos con capacidad antirradicalaria y propiedades colorantes naturales (Rodríguez et al., 2021).

Estos extractos, ricos en flavonoides, antocianinas y otros fenoles, actúan como agentes antioxidantes naturales, neutralizando los radicales libres. Además, diversos estudios han reportado que su adición no afecta negativamente la textura ni las propiedades físico-químicas del helado, sino que puede incluso mejorar su estabilidad frente a la recristalización y su coloración (Sagdic et al., 2014).

Para lograr una aplicación efectiva en matrices alimentarias, es fundamental no solo conocer la presencia de los compuestos bioactivos, sino también asegurar su adecuada extracción y estabilidad. En este sentido, la selección del método de extracción es determinante, ya que influye directamente en la concentración, actividad biológica y biodisponibilidad de los compuestos obtenidos. Métodos como la extracción asistida por ultrasonido, microondas o el uso de solventes ecológicos (etanol, agua o mezclas binarias) han demostrado ser efectivos para preservar la integridad de los compuestos fenólicos presentes en las flores comestibles (Chemat et al.,2017). Posteriormente, estos extractos pueden ser sometidos a análisis espectrofotométricos (DPPH, ABTS, FRAP), electroquímicos (CV, DPV) o incluso cromatográficos (HPLC-DAD) para evaluar su capacidad antioxidante, perfil polifenólico y comportamiento en alimentos (Prior et al., 2005).

El uso de plantas comestibles, especialmente flores, en alimentos no solo responde a una tendencia estética o cultural, sino que se justifica plenamente desde una perspectiva funcional y tecnológica. Su aplicación en alimentos como los helados representa una alternativa natural para prolongar la vida útil, mejorar la calidad nutricional y sensorial del

producto, y responder a la creciente demanda del consumidor por alimentos más saludables, sostenibles y libres de aditivos sintéticos. La integración de estos ingredientes requiere un enfoque multidisciplinario que considere aspectos botánicos, químicos, tecnológicos y regulatorios, garantizando la seguridad y eficacia de su uso en la industria alimentaria moderna.

Objetivos



3. Objetivos

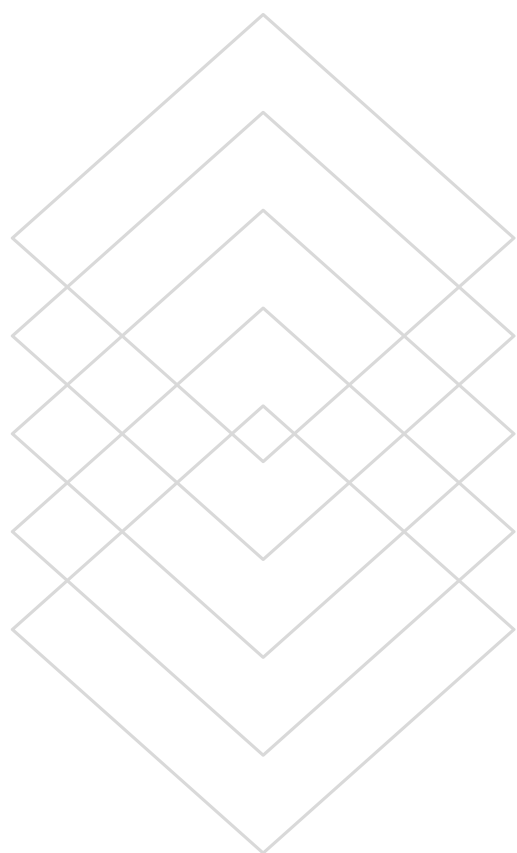
3.1 Objetivo general

Determinar la capacidad antioxidante de flores comestibles mediante voltamperometría cíclica y evaluar su efecto en la estabilidad oxidativa de helados a base de leche

3.2 Objetivos específicos

- Determinar y validar la actividad antioxidante en extractos de flores comestibles empleando voltamperometría cíclica.
- Seleccionar la flor comestible con mayor actividad antioxidante y aplicarla en la formulación de helados a base de leche, evaluando su impacto en la inhibición de la oxidación lipídica.

Metodología



4.1 Reactivos y soluciones

Los estándares utilizados como referencia fueron preparados a partir de la disolución de los reactivos sólidos en metanol (HPLC), ácido cafeico (0.1 M), trolox (0.1 M), ácido gálico (0.1 M), ácido ascórbico (0.1 M), alizarina S (0.1 M) e hidroquinona (0.1 M) todos de la marca Sigma Aldrich. Estos compuestos se seleccionaron por su relevancia en el análisis de propiedades antioxidantes y su uso como estándares en metodologías analíticas para la determinación de la capacidad antioxidante.

El material vegetal objeto de estudio comprendió doce especies de flores comestibles: diente de león (*Taraxacum officinale*), romero silvestre (*Rosmarinus officinalis*), lavanda (*Lavandula angustifolia*), bugambilia (*Bougainvillea glabra spp.*), colorines (*Erythrina coralloides*), durazno (*Prunus persica*), flor de calabaza (*Cucurbita pepo*), garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*), flor de maguey (*Agave spp.*), jamaica (*Hibiscus sabdariffa*), flor de sábila amarilla (*Aloe vera var. chinensis*) y flor de sábila roja (*Aloe arborescens*), las cuales fueron recolectadas en la región de Hidalgo en el municipio de Mineral de la Reforma. Todas las muestras florales fueron sometidas a un proceso de secado a temperatura ambiente durante 2 semanas. Para la preparación de los extractos de cada una de las flores se empleó una solución que contiene metanol, ácido acético glacial y agua desionizada.

La capacidad antioxidante se evaluó con las técnicas de FRAP utilizando los siguientes reactivos: ácido acético, acetato de sodio, agua desionizada, cloruro férrico (FeCl_3), HCl 37%, sulfato de hierro (II) heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), TPTZ (2,4,6-tris(2-piridil)-s-triazina).

Para la determinación de polifenoles totales mediante el método de Folin-Ciocalteu se utilizaron: Carbonato de sodio, ácido gálico, reactivo de Folin-Ciocalteu grado reactivo, metanol grado HPLC (MeOH), y agua desionizada.

4.2 Voltamperometría cíclica

Para ello, se utilizaron extractos preparados a partir de muestras secas de doce especies de flores comestibles.

Las muestras se prepararon a partir de flores secadas durante al menos dos semanas en condiciones ambientales, las cuales se pulverizaron manualmente en un mortero hasta

obtener un polvo homogéneo. Para cada extracto, se pesaron 500 mg del material vegetal y se mezclaron con 10 mL de una solución compuesta por 8 mL de metanol, 0.5 mL de ácido acético glacial y 1.5 mL de agua destilada. Las mezclas se dejaron en reposo durante 24 horas a temperaturas entre 1 y 4 °C para permitir una extracción adecuada de los compuestos bioactivos (Zheng & Wang, 2001). Posteriormente, los extractos se filtraron con papel filtro para eliminar residuos sólidos, se toman 500 µL del extracto metanólico filtrado y se aforaron a 10 mL con la solución tampón de fosfatos, reservándose la dilución hasta su análisis. Para el análisis de los compuestos de referencia se prepararon soluciones metanólicas de concentración 0.1 M y se trataron de forma similar a las muestras.

Para las mediciones electroquímicas, se preparó un tampón de fosfato (0.1 M, pH 7.0). Las medidas electroquímicas se realizaron con un potenciostato DropView µStat200 (Dropsens, España), utilizando un electrodo serigrafiado de carbono como electrodo de trabajo. Las condiciones experimentales incluyeron un intervalo de potencial de -1.5 a +1.5 V, una velocidad de barrido de 0.1 V/s y un tiempo de equilibrio de 5 segundos. En la superficie de electrodo serigrafiado se adiciono un volumen de 35 µL de extracto metanólico diluido para realizar la medida.

Cada medición comenzó con la obtención de un voltamperograma de la solución tampón fosfato, seguida de análisis de los compuestos de referencia: ácido cafeico, Trolox, ácido gálico, ácido ascórbico, alizarina S e hidroquinona, todos marca Sigma Aldrich.

Los resultados se presentaron en curvas I vs. V, donde se observaron claramente los procesos de oxidación (picos anódicos) y reducción (picos catódicos) característicos de los compuestos extraídos de cada especie floral. Esta metodología permitió establecer relaciones estructura-actividad entre los perfiles voltamperométricos y la capacidad antioxidante de los extractos.

4.3 Evaluación de la capacidad antioxidante en extractos metanólicos

Para la determinación de la capacidad antioxidante por el método FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power), requiere la preparación de las siguientes soluciones:

- Tampón de acetatos (0.3 M, pH 3.6) a partir de acetato de sodio y ácido acético glacial en agua desionizada, ajustando el pH con HCl concentrado.
- Solución de HCl 40 mM.

- Solución de TPTZ 10 mM se preparó disolviendo 0.0163 g de TPTZ en 5 mL de HCl 40 mM, almacenándose en oscuridad a 4°C.
- Solución de FeCl_3 20 mM, se prepara en agua desionizada.
- Reactivo FRAP, obtenido de la combinación de 25.0 mL de tampón acetato, 2.5 mL de FeCl_3 20 mM y 2.5 mL de TPTZ 10 mM. El reactivo es estable durante 2 horas posteriores.
- Solución estándar de sulfato de hierro (II) 2 mM, preparada a partir $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en agua desionizada.

Para la curva de calibrado se prepararon diluciones estándar de sulfato de hierro (II) (0.2, 0.4, 0.6 0.8, 1.0. 1.5 y 2.0 mM) en metanol. Para cada punto, se transfirieron 30 μL de cada estándar a un tubo Eppendorf, adicionando 970 μL de reactivo FRAP. Las mezclas se dejaron reaccionar durante 30 minutos a temperatura ambiente esperando diez minutos entre cada preparación siguiente, con el fin de seguir una cinética controlada y uniforme. Las lecturas de absorbancia se realizaron a 593 nm en espectrofotómetro UV-Vis marca Perkin.Elmer lambda 40, calibrando previamente con blanco de tampón acetato.

Para el análisis de las muestras se trataron 30 μL de extracto floral (preparado según protocolo de voltamperometría) y de los estándares, con 970 μL de reactivo FRAP, siguiendo el mismo protocolo de incubación y lectura. La actividad antioxidante se calculó mediante la interpolación en curva de calibración correspondiente expresado como mmol equivalentes de Fe^{2+} por gramo de muestra (Benzie, & Strain, 1996).

4.4 Elaboración y evaluación helado base leche

Como parte del desarrollo del producto alimenticio funcional, se diseñaron y prepararon tres formulaciones experimentales de helado base leche utilizando flor de lavanda (*Lavandula angustifolia*) como ingrediente funcional principal, siguiendo un protocolo estandarizado para maximizar la transferencia de compuestos bioactivos. Incorporando flor fresca o seca y caramelo de lavanda como fuentes naturales de compuestos antioxidantes y aromáticos. La formulación se planteó con base en ingredientes de uso común en la industria de postres lácteos, considerando proporciones reproducibles y condiciones higiénico-sanitarias controladas. Las tres formulaciones desarrolladas fueron las siguientes:

Tabla 1. Ingredientes y cantidades por formulación. Las marcas especificadas corresponden a los productos utilizados en el estudio.

Formulación	Caramelo de lavanda artesanal (g)	Flor de lavanda seca (g)	Flor de lavanda fresca (g)	Crema para batir Lyncott (mL)	Leche condensada Aurrera (mL)
Control	100	0	0	500	355
Flor 1	150	15	0	500	355
Flor 2	0	15	150	500	355

La elaboración del helado se llevó a cabo siguiendo un procedimiento estandarizado. En todos los casos que incluyeron caramelo de lavanda, éste se fundió previamente mediante calentamiento indirecto durante 5 minutos hasta alcanzar una textura líquida homogénea. El caramelo derretido se incorporó directamente a la crema para batir caliente (previamente calentada a aproximadamente 60 °C), asegurando así una dispersión uniforme y facilitando su integración.

Para las formulaciones que incluyeron flor de lavanda fresca o seca, las flores fueron previamente desinfectadas mediante inmersión en una solución sanitizante marca Microdyn apta para alimentos durante 5 minutos, enjuagadas con agua purificada y escurridas. Una vez listas, las flores fueron añadidas a la leche caliente, ya sea de forma conjunta con el caramelo (si aplicaba), o como única fuente botánica, permitiendo la extracción de fenoles solubles y pigmentos durante aproximadamente 10 minutos con agitación constante. Posteriormente, la mezcla fue sometida a filtración utilizando una malla fina, con el propósito de remover los restos sólidos vegetales y conservar únicamente el extracto líquido enriquecido.

Una vez obtenido el extracto floral en crema para batir, se adicionó la leche condensada y se homogenizó la mezcla final utilizando una máquina de helados de marca genérica durante 5 minutos, hasta obtener una emulsión cremosa, característica de las bases para helado. Las mezclas elaboradas se almacenaron por 24 horas a -20 °C antes de ser sometidas al proceso de evaluación.

La cuantificación del deterioro oxidativo en las formulaciones de helado se llevó a cabo mediante el ensayo de sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS), basado en el protocolo original descrito por Vincke (1975). Esta metodología permite estimar la concentración de malondialdehído (MDA), uno de los principales productos secundarios de la peroxidación lipídica, mediante una reacción colorimétrica con ácido tiobarbitúrico (TBA) en medio ácido. El complejo MDA–TBA presenta una coloración rosa-rojiza cuya intensidad

se correlaciona directamente con la concentración de compuestos oxidativos en la muestra, medible espectrofotométricamente a 532 nm.

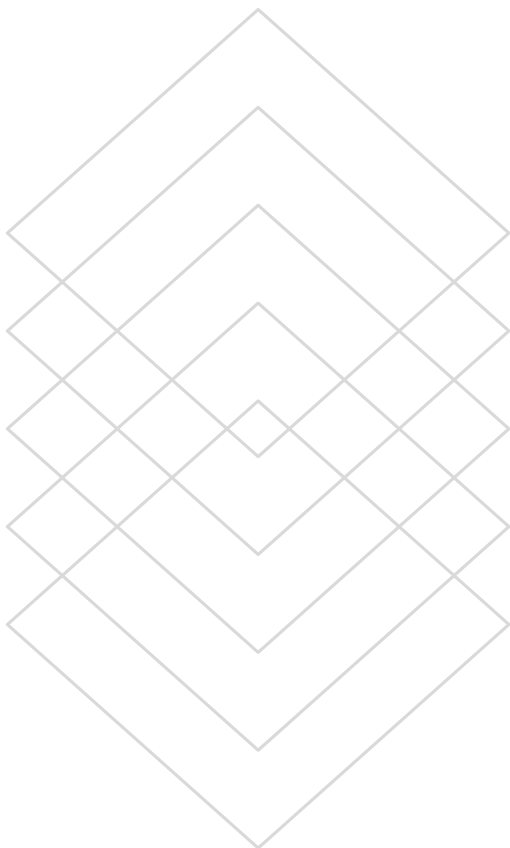
- Reactivo de TBA 0.02 M, preparado disolviendo 0.2883 g de ácido tiobarbitúrico en 100 mL de agua destilada, protegiendo la solución de la luz directa con papel aluminio.
- Solución de ácido tricloroacético (TCA) 5% (p/v), preparada disolviendo 5 g de ácido tricloroacético en 100 mL de agua destilada.
- Solución estándar de 1,1,3,3-tetraetoxipropano (TEP), utilizada como precursor del MDA:
 - Solución A, obtenida disolviendo 48 μL de TEP en 200 mL de agua desionizada.
 - Solución B, preparada diluyendo 1 mL de la solución A en 5 mL de agua desionizada.
- Puntos estándar de calibración con concentraciones de MDA entre 1.00×10^{-9} y 4.60×10^{-8} moles, elaborados tomando 5, 10, 40, 80, 130, 150, 200 y 230 μL de solución B. Cada punto se mezcló con 5 mL de TCA al 5% y 5 mL de TBA al 0.02 M, incubándose en baño de agua a 97 °C durante 40 minutos, seguido de enfriamiento a temperatura ambiente y desgasificación en baño ultrasónico durante 15 minutos.

La calibración del equipo se realizó utilizando como blanco una mezcla de TCA y TBA sin muestra

Para la preparación de las muestras, se pesaron 2.00 g de hielo previamente homogeneizado, los cuales se transfirieron a tubos de polipropileno de 15 mL. A cada muestra se le añadieron 10 mL de una solución de ácido tricloroacético (TCA) al 5% (m/v), manteniéndose todas las manipulaciones sobre una cama de hielo. La homogenización se realizó utilizando un equipo vortex durante 2 minutos, asegurando la preservación de la integridad oxidativa mediante el uso de vasos de precipitado con hielo como baño térmico. Las muestras homogenizadas se dejaron en baño de hielo durante 10 minutos para facilitar la precipitación de proteínas, y se sometieron posteriormente a centrifugación a 2,500 rpm durante 10 minutos. El sobrenadante se filtró, recolectando el extracto claro en tubos de polipropileno limpios y secos.

Para el análisis de las muestras tratadas, se mezclaron 5 mL del extracto filtrado con 5 mL del reactivo de TBA, repitiendo las mismas condiciones de incubación y desgasificación descritas para la muestra. Las mediciones se realizaron en un espectrofotómetro UV-Vis marca Perkin.Elmer lambda 40, empleando celdas de cuarzo. Cada análisis se realizó por triplicado. Este protocolo permitió una evaluación del daño oxidativo en las muestras de helado enriquecidas con lavanda, brindando una herramienta útil para correlacionar la composición de la formulación con la estabilidad lipídica del producto final.

Resultados y discusión



5.1 Análisis de compuestos de referencia

5.1.1 Voltamperometría cíclica de los compuestos de referencia

La técnica de voltamperometría cíclica fue empleada con el objetivo de evaluar la actividad electroquímica y el potencial antioxidante de los extractos de flores comestibles. Con el propósito de establecer un marco comparativo sólido para evaluar la capacidad antioxidante de los extractos florales, se emplearon seis compuestos de referencia con actividad antioxidante reconocida: ácido ascórbico, ácido gálico, ácido cafeico, alizarina S, hidroquinona y trolox. Estos compuestos fueron seleccionados por su frecuente aparición en estudios de actividad antioxidante y por su diversidad estructural dentro de los fenoles y derivados lo que permite cubrir un amplio espectro de mecanismos redox (Prior, Wu & Schaich, 2005). En los voltamperogramas obtenidos (Fig. 6), se observan claramente los procesos de oxidación anódica, característicos de cada molécula, lo que permite inferir su comportamiento electroquímico y su potencial antioxidante.

- El ácido ascórbico (5×10^{-3} M) mostró una señal de anódica definida en el potencial de 0.42 V (vs.Ag), con una corriente de pico de 2.4 μ A, lo cual indica una oxidación eficiente del compuesto (Fig. 6). Esta oxidación corresponde al paso del ácido ascórbico a ácido dehidroascórbico. Cuando se invierte el sentido del barrido del potencial, no se observa un pico catódico, lo que sugiere que la oxidación es un proceso irreversible. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Zhang y Dong (2004), quienes demostraron que la oxidación del ácido ascórbico en electrodos de polianilina modificados con ácido camforsulfónico (PANI-CSA) es irreversible, presentando únicamente un pico anódico en ~ 0.4 V y ausencia de señal de reducción. La irreversibilidad se atribuye a la rápida hidrólisis del ácido dehidroascórbico formado, el cual no es electroactivo en el intervalo de potencial estudiado. La coincidencia en el potencial (0.4-0.5 V vs. Ag/AgCl) y el perfil voltamperométrico respaldan que la señal a 0.42 V (vs Ag) corresponde a una transferencia electrónica directa e irreversible en las condiciones experimentales (Zhang & Dong, 2004).

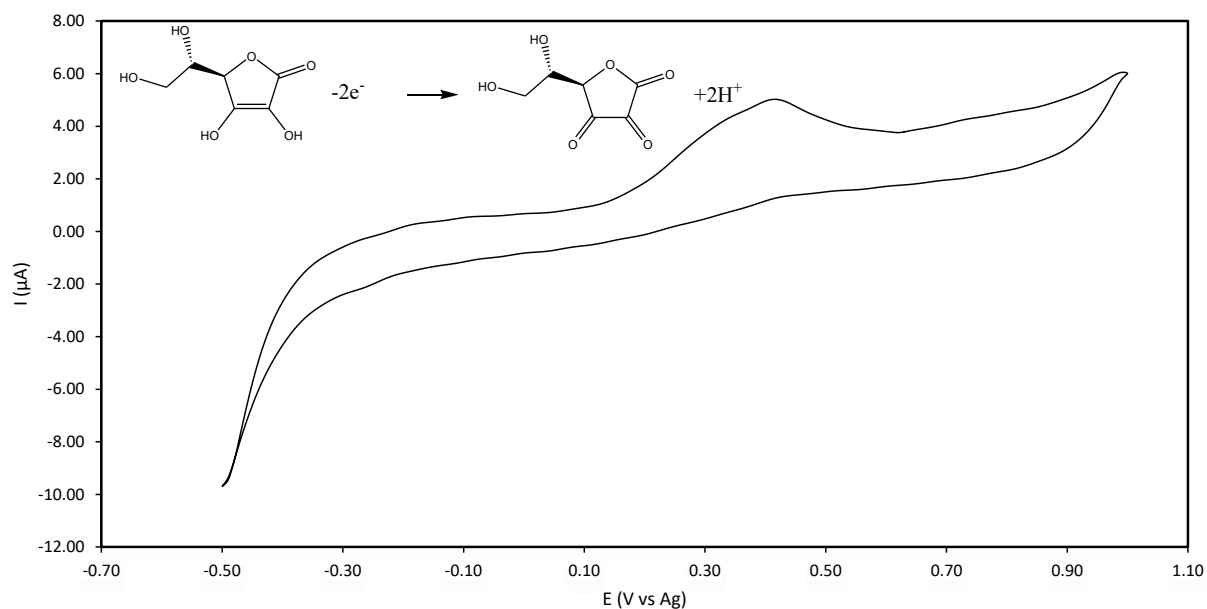


Figura 6. Voltamperograma cíclico del ácido ascórbico y su reacción de oxidación asociada

- Ácido gálico (5×10^{-3} M) presentó dos señales de oxidación, la primera en +0.32 V (vs Ag), con una corriente de pico de 2.44 μA (Fig. 7) característica de la oxidación una primera oxidación de un grupo fenol. La segunda señal en +0.62 V corresponde a la oxidación secuencial de fenol en posición *p*- al ácido carboxílico presente en la molécula, proceso que, de acuerdo con Abdel-Hamid & Newair (2011) conduce a la formación de quinonas que sufren hidrólisis, impidiendo procesos de reducción reversibles. Dicho comportamiento es característico de polifenoles con múltiples grupos -OH o-disustituídos.

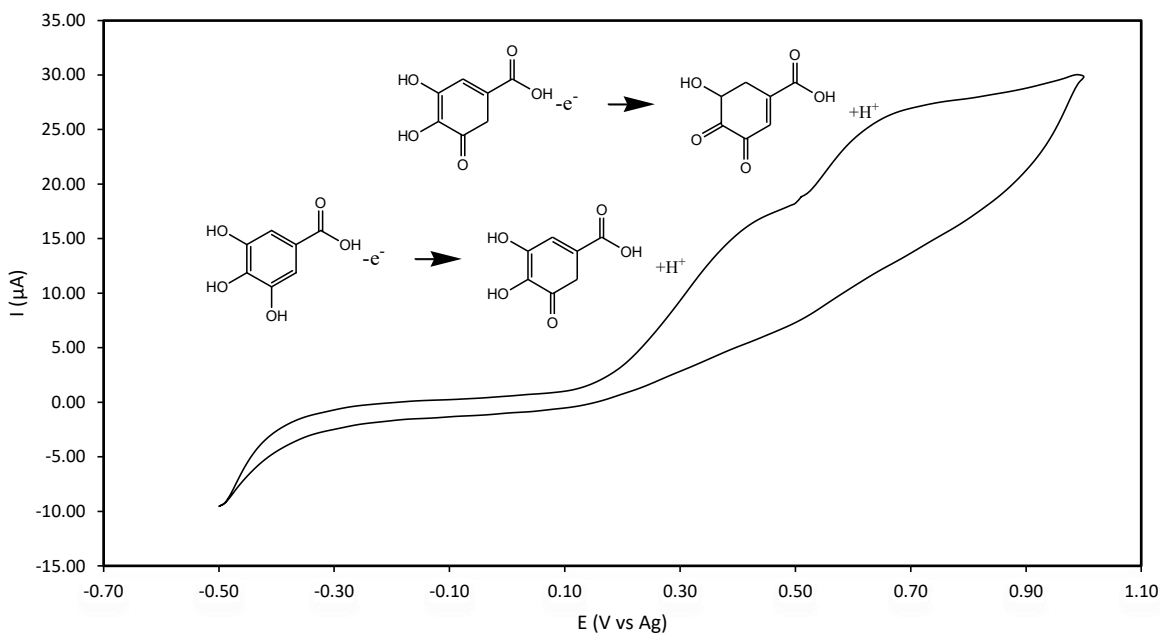


Figura 7. Voltamperograma cíclico del ácido gálico y su reacción de oxidación asociada

- Ácido cafeico (5×10^{-3} M) muestra un perfil característico de un compuesto fenólico con estructura tipo catecol, evidenciando una oxidación electroquímica claramente definida (Fig. 8). Se observa un pico anódico bien delimitado alrededor de +0.28V (vs Ag), con una corriente de pico de $9.153 \mu\text{A}$ correspondiente a la oxidación del sistema catecol/quinona. Este proceso implica la transferencia de 2 electrones y 2 protones, mecanismo típico en o-dihidroxifenilos donde la proximidad espacial de los grupos -OH facilita la deprotonación oxidativa. Además, la presencia de una onda catódica indica un comportamiento parcialmente reversible, atribuible a la capacidad del sistema redox para regenerar el compuesto reducido. Este tipo de reversibilidad es consistente con la alta capacidad antioxidante del ácido cafeico, relacionada con su facilidad para estabilizar especies reactivas a través de mecanismos de donación electrónica (Oliveira-Brett et al., 2020))

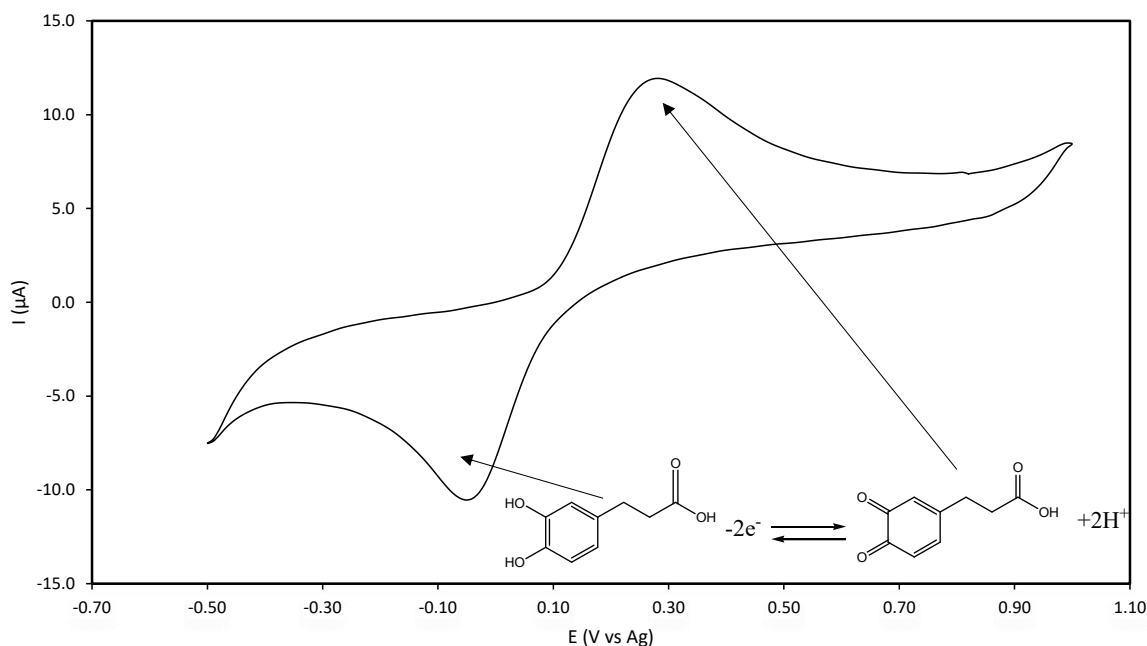


Figura 8. Voltamperograma cíclico del ácido cafeico y su reacción de oxidación asociada

- Alizarina S (5×10^{-3} M), un derivado sulfonado de antraquinona, presentó un pico anódico desplazado a +0.29 V (vs Ag), con una corriente de pico de 0.905 μA (Fig.9), atribuible a la oxidación reversible de los grupos hidroxilo, proceso que sigue un mecanismo de 2 electrones/2 protones (Turcanu & Bechtold, 2011). La conjugación aromática extensa del sistema estabiliza el intermedio semiquinónico mediante resonancia, desplazando el potencial hacia valores más positivos (+0.25 a +0.35 V) comparado con catecoles simples. La baja corriente observada es consistente con la lenta cinética de transferencia electrónica típica de este tipo de pigmentos, los cuales se encuentran naturalmente en flores como la bugambilia (*Bougainvillea glabra* spp.), contribuyendo a su coloración y actividad antioxidante.

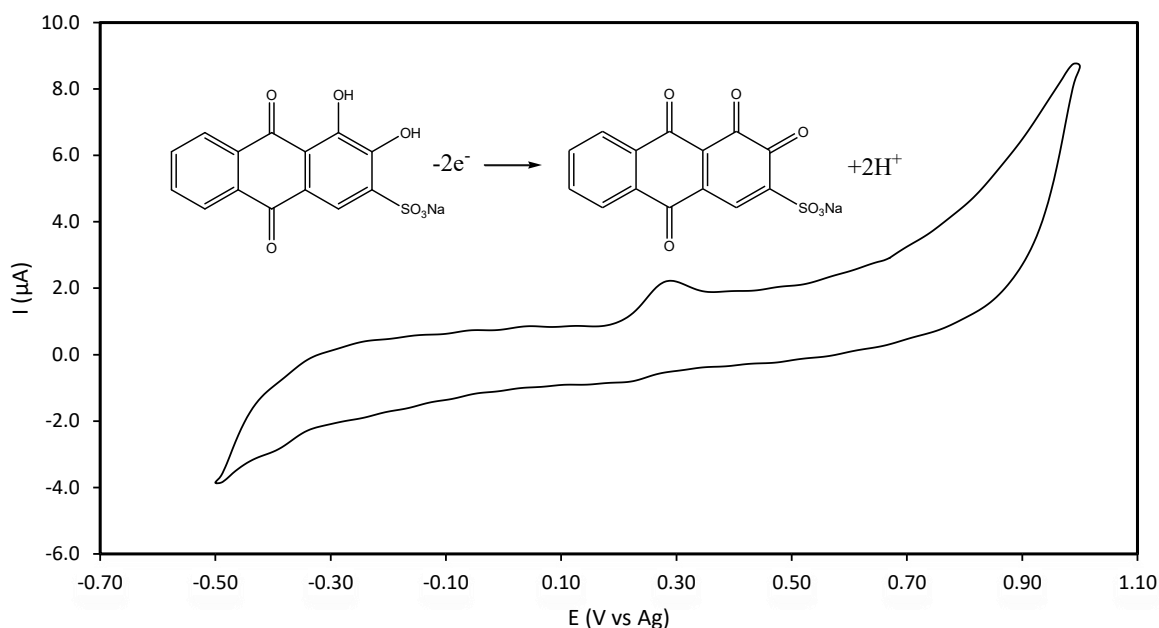


Figura 9. Voltamperograma cíclico de la Alizarina S y su reacción de oxidación asociada

- Hidroquinona (5×10^{-3} M), mostró un perfil redox cuasi-reversible, evidenciado por un par redox bien definido en el voltamperograma (Fig. 10). El pico anódico apareció a +0.20 V vs Ag, con una corriente de pico de 16.49 μ A, valores que concuerdan con lo reportado por Ji et al. (2007), quienes describen la oxidación de hidroquinona a benzoquinona como un proceso reversible con potenciales entre +0.20 y +0.30 V, según el medio. La elevada corriente de pico observada está relacionada con una alta cinética de transferencia electrónica y un coeficiente de difusión favorable, característicos del sistema hidroquinona/benzoquinona. Este tipo de comportamiento es típico de antioxidantes eficientes, cuya capacidad de oxidarse y regenerarse se traduce en una elevada eficacia frente a radicales libres (Ji et al.,

2007).

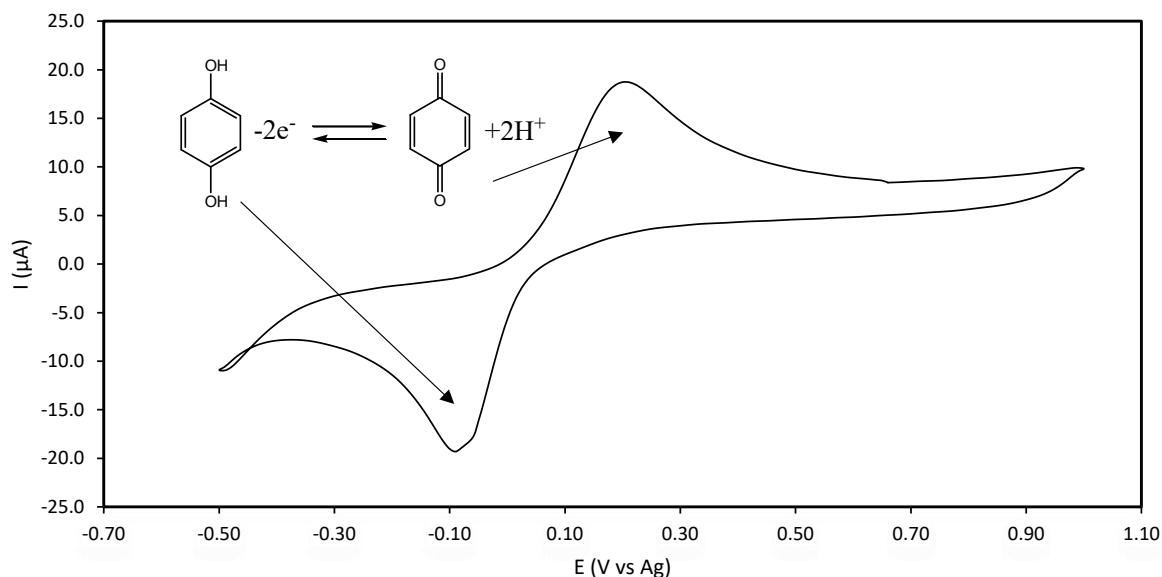


Figura 10. Voltamperograma cíclico de la Hidroquinona y su reacción de oxidación asociada

- Trolox (5×10^{-3} M), presentó un pico anódico bien definido a -0.07 V vs Ag, con una corriente de pico de $1.473 \mu\text{A}$ (Fig. 11), correspondiente al sistema quinona-hidroquinona presente en su estructura. Este potencial anódico más negativo, en comparación con otros estudios que reportan valores positivos ($+0.075$ V a $+0.829$ V), podría atribuirse a las condiciones experimentales específicas empleadas, como el pH del medio, el tipo de electrodo y la naturaleza del electrolito. La facilidad con la que Trolox cede electrones refleja su eficacia como agente antioxidante, ya que neutraliza especies reactivas de oxígeno (ROS) mediante un mecanismo de transferencia de electrones. Además, la presencia de un pico catódico en el barrido inverso indica un comportamiento electroquímico parcialmente reversible, típico de antioxidantes fenólicos capaces de regenerarse tras la oxidación. Este comportamiento ha sido descrito por Skeva & Girousi (2012), quienes observaron una oxidación cuasi-reversible del Trolox asociada a su capacidad antioxidante que depende de las condiciones experimentales.

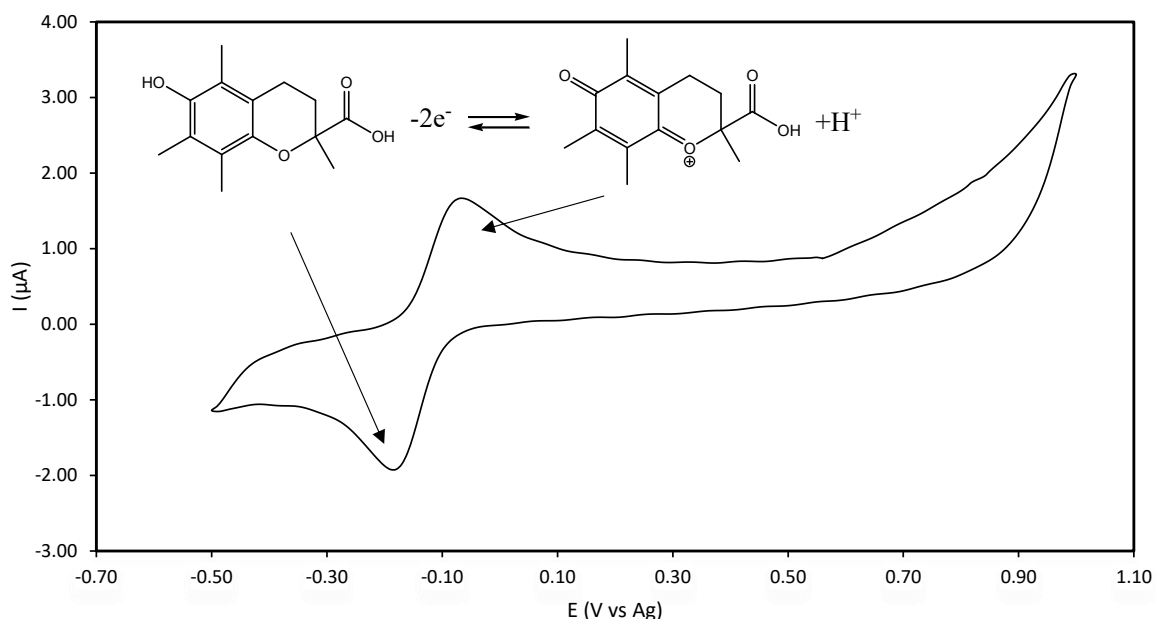
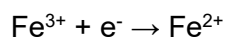


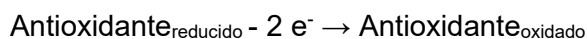
Figura 11. Voltamperograma cíclico de Trolox y su reacción de oxidación asociada

5.1.2 Ensayo FRAP para los compuestos de referencia

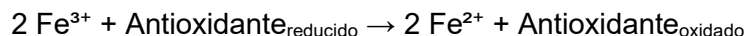
El ensayo FRAP se empleó una técnica basada en la capacidad de los compuestos antioxidantes para reducir el ion férrico (Fe^{3+}) a ferroso (Fe^{2+}), el cual forma un cromóforo color azul con TPTZ (2,4,6-tris(2-piridil)-s-triazina), detectable por espectrofotometría a una longitud de onda de 593 nm. Este cambio de color se debe al paso del complejo incoloro Fe (III)-TPTZ a la forma azulada Fe (II)-TPTZ , reacción que ocurre a pH ácido. La intensidad del color desarrollado es proporcional a la capacidad reductora total de los antioxidantes presentes en la muestra (Benzie, & Strain, 1996). La metodología se empleó para evaluar la capacidad reductora de los compuestos de referencia frente a Fe^{3+} , proporcionando una medida cuantitativa de su capacidad antioxidante. El Fe^{3+} se reduce a Fe^{2+} mediante la siguiente semi-reacción:



La señal anódica de los antioxidantes estudiados mediante voltamperometría cíclica involucra el intercambio de 2 electrones, de forma representativa se ajustan a la siguiente semi-reacción:



Por lo tanto, la reacción involucrada en el análisis FRAP es:



Con la finalidad de evaluar la validez del modelo FRAP se realizó la comparación de los resultados de FRAP teóricos (mmol Fe²⁺/g) estimados a partir del peso molecular con los resultados experimentales. La Tabla 1 muestra los valores teóricos obtenidos para los compuestos de referencia, así como los resultados experimentales correspondientes. Empleando una prueba t de pares de valores, no se observan diferencias significativas (p>0.05) entre los resultados teóricos y experimentales.

Tabla 2. Datos de compuestos de referencia obtenidos de la prueba FRAP y voltamperometría cíclica

Compuesto	Peso molecular (g/mol)	FRAP _{Teórico} (mmol/g)	FRAP _{Experimental} (mmol/g)	E _{ox} (V vs Ag)
Ac. Ascórbico	176.12	11.36	11.32	0.35
Ac. Gálico	170.12	11.76	10.00	0.31
Ac. Cafeico	180.16	11.10	9.86	0.30
Alizarina	360.28	5.55	6.29	0.29
Hidroquinona	110.11	18.17	17.47	0.42

Adicionalmente, se estableció una correlación entre el potencial de oxidación obtenido por voltamperometría cíclica y la capacidad antioxidante determinada por FRAP. Como se muestra en la Figura 12, se evidenció una tendencia lineal entre el potencial de oxidación y los valores de FRAP, con un coeficiente de determinación R² = 0.9193, lo cual indica una fuerte correlación entre ambos métodos. Firuzi et al. (2005) evaluaron la actividad antioxidante de 18 flavonoides estructuralmente diferentes utilizando el ensayo FRAP y midieron sus potenciales de oxidación mediante voltamperometría cíclica y concluyeron que existe una buena correlación entre los potenciales de oxidación y los valores de FRAP, con un coeficiente de correlación de R² = 0.907, respaldando los datos obtenidos.

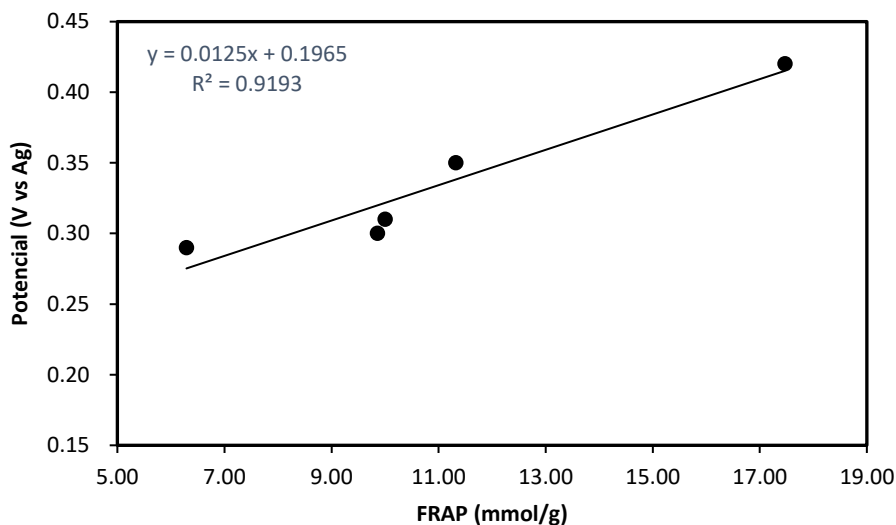


Figura 12. Tabla de datos FRAP vs voltaje de compuestos de referencia

En resumen, se corrobora que los compuestos evaluados funcionan como antioxidantes, la espontaneidad de la reacción depende del $E_{\text{oxidación}}$ y podemos concluir que aquellos compuestos que presentan $E_{\text{oxidación}} < 0.42$ (vs. Ag) presentaran actividad antioxidante expresada como FRAP.

El análisis conjunto de los métodos electroquímicos y FRAP proporciona un enfoque integral que permite validar los resultados y comprender mejor los mecanismos subyacentes a la actividad antioxidante. Mientras que la voltamperometría ofrece información sobre el potencial de oxidación y reversibilidad de los compuestos. Si bien el potencial redox es un indicador útil, factores como la estabilidad de intermediarios, reversibilidad de reacciones y mecanismos alternativos regulan significativamente la actividad antioxidante medida por FRAP.

5.2 Análisis de extractos florales metanólicos

5.2.1 Voltamperometría cíclica para los extractos flores

Con el fin de evaluar la actividad electroquímica y el potencial antioxidante de matrices naturales complejas, se aplicó la técnica de voltamperometría cíclica a extractos metanólicos obtenidos de doce especies de flores comestibles. La preparación cuidadosa de los extractos, junto con las condiciones estandarizadas de análisis, permitió obtener perfiles voltamperométricos reproducibles, útiles para caracterizar el comportamiento redox

de los compuestos bioactivos presentes en cada muestra. Se obtuvieron los siguientes perfiles:

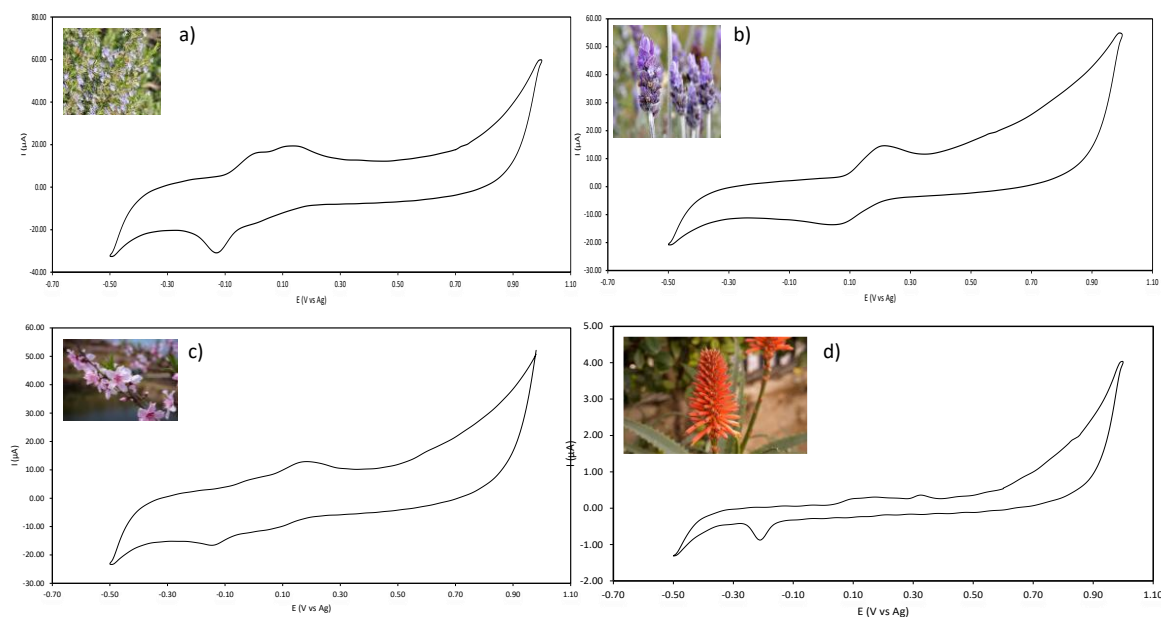


Figura 13. Voltamperogramas cíclicos del extracto metanólico para las flores: a) romero silvestre, b) lavanda, c) flor de durazno, d) flor de sábila roja.

- Romero silvestre (*Rosmarinus officinalis*): En el voltamperograma de la flor de romero (Fig 13.a), presenta dos señales de oxidación bien definidas. Con valores de 0.08 y 0.24 V vs Ag., estas señales pueden atribuirse a la presencia de ácido rosmarínico, un compuesto fenólico característico de esta especie. El ácido rosmarínico está formado por dos unidades con grupos catecol, uno proveniente del ácido cafeico y otro del ácido 3,4-dihidroxifenil láctico (Fig. 14). Cada uno de estos grupos puede oxidarse de forma independiente, lo cual genera dos picos en el voltamperograma. Este comportamiento ha sido descrito en estudios electroquímicos previos, donde se demostró que el ácido rosmarínico presenta dos procesos redox debido a estas estructuras fenólicas (Mohamadi et al., 2015).

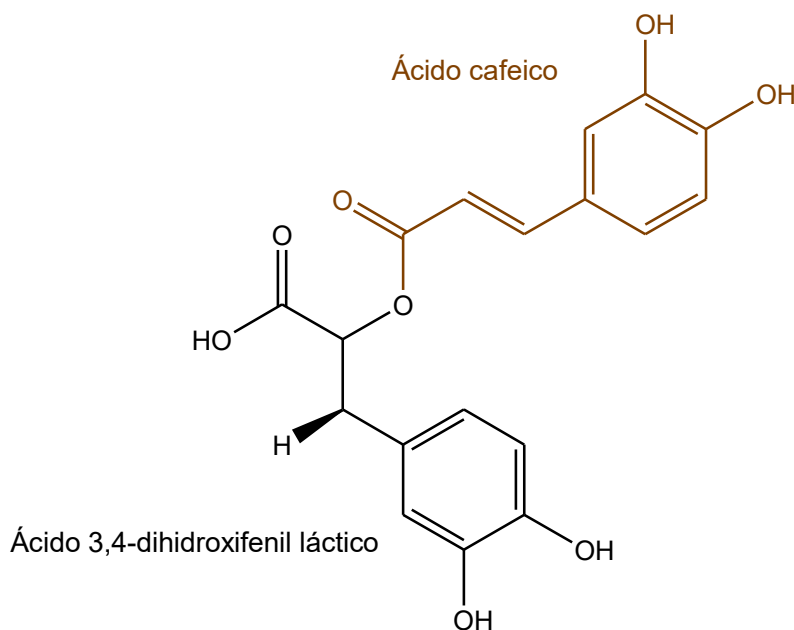


Figura 14. Estructura del ácido rosmarínico

- Lavanda (*Lavandula angustifolia*): El voltamperograma obtenido para el extracto metanólico de flor de lavanda, (Fig 13.b), mostró una señal anódica bien definida, con un potencial de oxidación cercano a +0.21 V vs Ag. Este comportamiento sugiere la presencia de un compuesto fenólico con un único grupo funcional electroactivo, fácilmente oxidable en condiciones neutras o ligeramente ácidas. Entre los compuestos descritos en la flor de lavanda están: el ácido vanílico (Fig. 15) el cual se presenta como el candidato más probable, debido a que su estructura contiene un grupo hidroxilo fenólico y un grupo metoxi, lo que permite su oxidación en un solo paso. Además, su potencial de oxidación se ha documentado entre +0.20 y +0.30 V (Ag/AgCl), tomando en cuenta las diferentes condiciones en cada experimento, nuestros valores que concuerdan con los observados en este trabajo (Zagoraios et al., 2021). Este resultado, junto con el valor de FRAP obtenido para esta flor, apoya su selección como ingrediente antioxidante para la formulación de alimentos funcionales como los helados evaluados en este estudio.

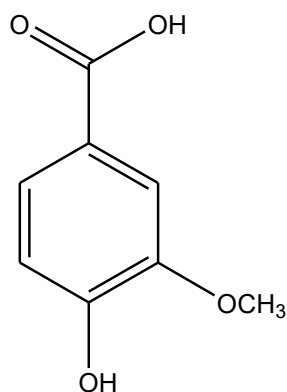


Figura 15. Estructura del ácido vanílico.

- Durazno (*Prunus persica*): El voltamperograma del extracto metanólico de flor de durazno (Fig 13.c), mostró una señal anódica única a +0.18 V vs Ag, lo cual indica la presencia de un compuesto fenólico fácilmente oxidable. Considerando estudios previos sobre la composición de flores de *Prunus persica* y el comportamiento electroquímico de ácidos cafeoilquínicos, el compuesto más probable responsable de esta señal es el 3,5-di-o-cafeoilquínico (Fig. 16). Este compuesto ha sido identificado en flores de durazno mediante técnicas cromatográficas avanzadas, y se sabe que presenta un potencial de oxidación bajo, alrededor de +0.20 V, cuando se analiza en electrodos de carbono por voltamperometría diferencial de pulsos (Tomic & Seruga, 2016). Estos valores coinciden estrechamente con el resultado obtenido en este estudio. La estructura del 3,5-di-O-cafeoilquínico, que contiene dos grupos derivados del ácido cafeico, puede generar una señal única debido a la cercanía de sus potenciales de oxidación.

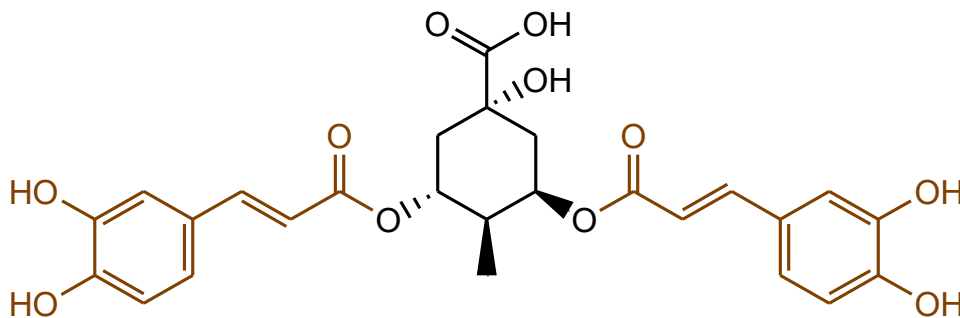


Figura 16. Estructura del ácido 3,5-di-O-cafeoilquínico

- Flor de sábila roja (*Aloe arborescens*): El voltamperograma obtenido para el extracto metanólico de flor de sábila roja (Fig 13.d), presentó un perfil redox complejo, caracterizado por múltiples señales anódicas distribuidas a lo largo del barrido de potencial. Entre ellas, destaca un pico principal en +0.33 V vs Ag, acompañado de otras señales menores a potenciales más positivos. Esta respuesta sugiere la presencia de varios compuestos fenólicos electroactivos, con diferentes grados de facilidad para oxidarse. Uno de los compuestos más plausibles responsables de la señal principal es el ácido 5-O-cafeoilquínico (Fig. 17), que ha sido identificado en flores de *Aloe vera* y *Aloe arborescens*, incluidas sus variantes pigmentadas como la sábila roja. De acuerdo con el estudio de Añibarro-Ortega et al. (2019), el ácido 5-O-cafeoilquínico se encuentra en concentraciones relevantes en las flores, particularmente en las fracciones polares del extracto metanólico, y contribuye significativamente a su capacidad antioxidante. Desde el punto de vista electroquímico, este compuesto se oxida típicamente en una o dos etapas, dependiendo del medio y del electrodo utilizado, y puede generar una señal principal en torno a 0.30–0.40 V vs Ag, además de otras señales asociadas a productos intermedios o estructuras relacionadas (como derivados del ácido cafeico). Por tanto, el comportamiento voltamperométrico observado en esta muestra es consistente con la presencia de una mezcla compleja de compuestos fenólicos, en la que el ácido 5-O-cafeoilquínico destaca como el principal contribuyente de la señal redox más intensa.

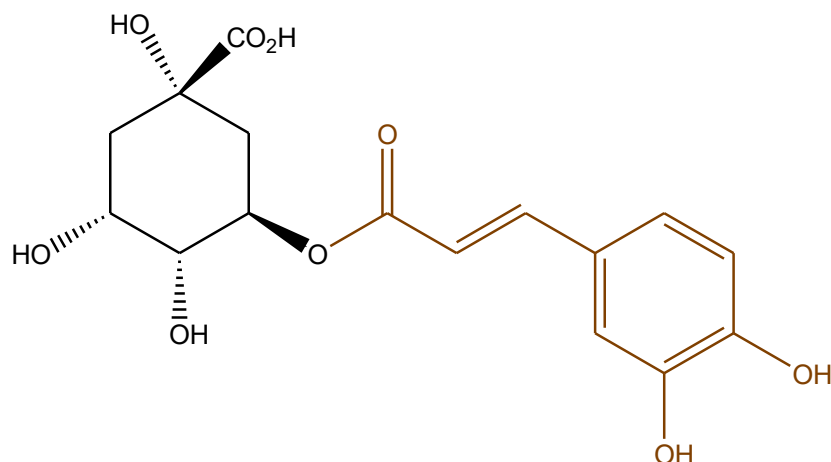


Figura 17. Estructura del ácido 5-O-cafeoilquínico.

Asimismo, se realizaron los voltamperogramas de las flores restantes mostrando los siguientes resultados:

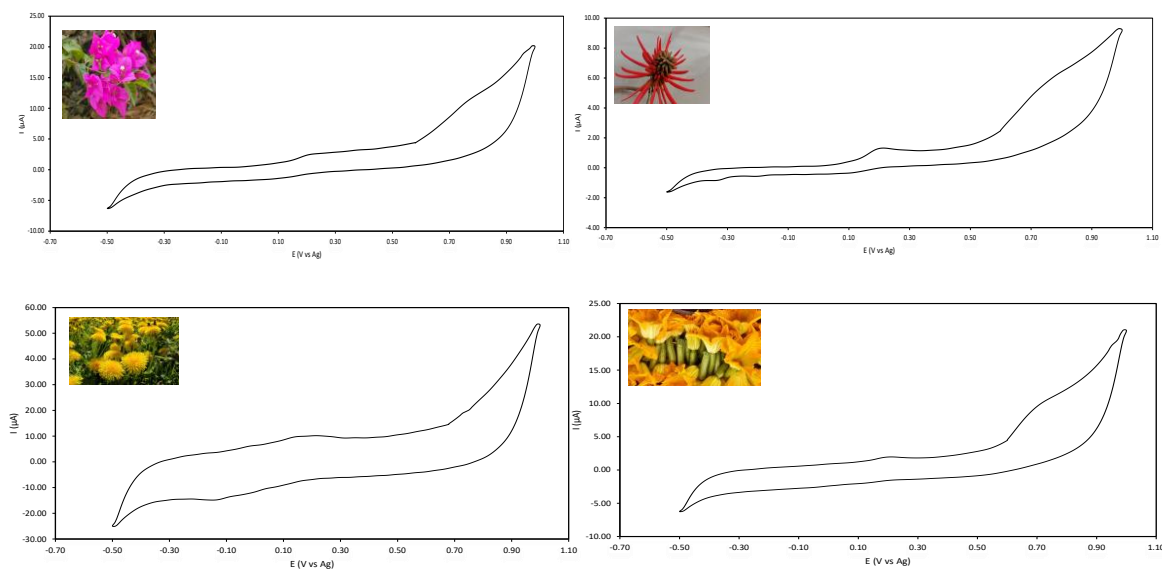


Figura 18. Voltamperograma de flor de buganvilia, flor de colorín, flor de diente de león y flor de calabaza.

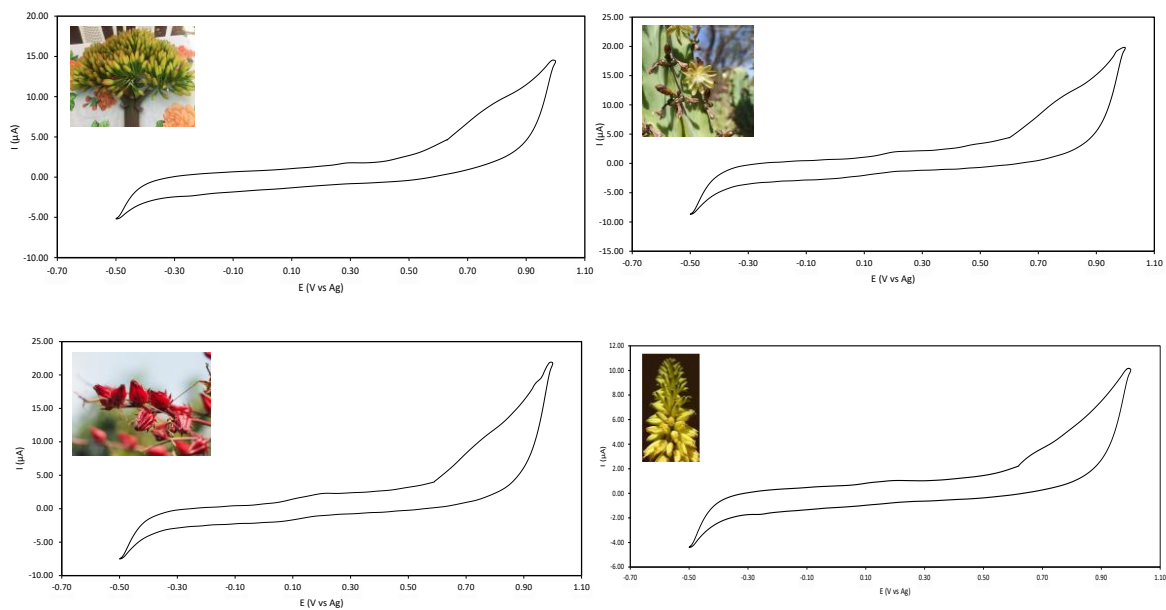


Figura 19. Voltamperograma de flor de maguey, flor de garambullo, flor de jamaica y flor de sábila amarilla.

Tabla 3. Valores de FRAP experimentales obtenidos de los extractos metanólicos florales

Extracto floral	E _{oxidación} (V vs. Ag)	i _{oxidación} (μA)	FRAP (mmol Fe ²⁺ /g)*
Romero silvestre	0.28	10.93	0.04
Lavanda	0.21	7.123	0.04
Durazno	0.18	4.502	0.03
Sábila roja	0.33	0.123	0.04
Buganvilia	0.32	0.048	0.02
Colorín	0.21	0.562	0.02
Diente de león	0.18	1.965	0.02
Flor de calabaza	0.21	0.371	0.01
Flor de maguey	0.31	0.045	0.01
Garambullo	0.28	0.114	0.01
Jamaica	0.25	0.217	0.01
Sábila amarilla	0.21	0.113	0.01

* base seca

La comparación entre los perfiles voltamperométricos y los valores experimentales de FRAP permitió establecer criterios complementarios para la selección de la flor con mayor potencial antioxidante bajo condiciones compatibles con aplicaciones alimentarias. Si bien el potencial de oxidación (E_{ox}) obtenido por voltamperometría cíclica es un parámetro útil para evaluar la facilidad con la que un compuesto cede electrones, este valor por sí solo no determina completamente la capacidad antioxidante, ya que no considera aspectos como la estabilidad de los productos intermedios, la reversibilidad de las reacciones redox, ni la eficiencia global del sistema antioxidante.

En este contexto, el ensayo FRAP ofreció una visión más directa sobre la capacidad antioxidante de cada extracto. Bajo esta perspectiva, la flor de lavanda se destacó por presentar un potencial de oxidación bajo (+0.21 V vs Ag) junto con uno de los valores de FRAP más altos (0.04 mmol Fe²⁺/g) entre las especies analizadas. Esta concordancia entre ambas metodologías refuerza su perfil como una fuente eficaz de compuestos antioxidantes.

5.2. Análisis de helado base leche

De forma inicial, se elaboraron dos formulaciones de helado base leche que contenían leche condensada y crema para batir. La primera formulación se le adicionaron 15 g de caramelos sabor lavanda (control) y a la segunda se incorporaron 15 g de flor de lavanda deshidratada (Flor 1). Posteriormente se evaluó la estabilidad oxidativa mediante la cuantificación de malondialdehído (MDA) utilizando el método TBARS en ambas formulaciones, de forma

que se puede estimar el nivel de deterioro oxidativo durante un almacenamiento simulado de cinco semanas. Los resultados obtenidos del índice de TBA (iTBA) se presentan en la Tabla 3.

Tabla 4. Resultados obtenidos de la prueba TBARS aplicada a las muestras de helado a base leche con la flor de lavanda y caramelo, y helado con caramelo de lavanda

Semana	iTBA (mg _{MDA} /Kg muestra)		t _{exp}
	Control	Flor 1	
0	1.55 (0.33)	1.36 (0.52)	40.31
1	1.65 (0.44)	1.44 (0.95)	21.92
2	1.80 (0.32)	1.57 (0.68)	26.46
3	1.90 (1.75)	1.63 (0.57)	22.49
4	2.01 (1.14)	1.72 (1.39)	36.91
5	2.10 (2.08)	1.84 (0.52)	9.41

$$t_{\text{crit}} (n=4, \alpha=0.05) = 2.77$$

A partir de los resultados obtenidos en las dos formulaciones iniciales, se observa que existen diferencias significativas entre los valores de iTBA ($t_{\text{exp}} > t_{\text{crit}}$), siendo mayores los valores encontrados en la fórmula control. La presencia de flor de lavanda resultó determinante para disminuir el contenido de malondialdehído (MDA) en un 12% de forma inicial, sin embargo, se observa un incremento del valor de iTBA respecto al tiempo en ambas formulaciones.

Este comportamiento es interesante, ya que los componentes de partida de las formulaciones tienen la presencia de MDA de formar inicial. Al observarse una disminución del iTBA desde el punto inicial, nos hace suponer que existe una reacción asociada entre el MDA y los polifenoles presentes en la muestra. Con la finalidad de corroborar esta hipótesis, se elaboró una nueva formulación donde se adicionaron 150 g de flor de lavanda (Flor 2), encontrándose un valor menor de iTBA de 1.18 mg_{MDA}/Kg_{muestra}., la disminución puede estar asociada a lo descrito por Zamora et. al. (2024) quienes han descrito que el MDA en presencia de formaldehído y fenoles pueden dar lugar a la formación de compuestos derivados de 4H-cromeno de acuerdo con la siguiente reacción (Fig. 20):

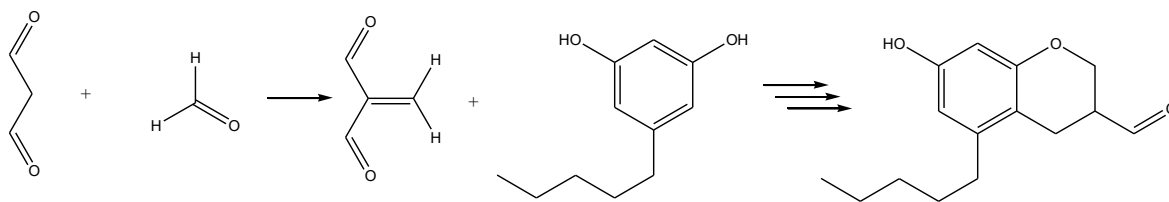


Figura 20. Síntesis de 7-hidroxi-5-pentil-4H-cromeno-4,4-d₂-3-carbaldehído

Respecto a los contenidos de iTBA en las formulaciones, los valores obtenidos son menores a los descritos por Ghorbani et. al. (2023), para helados de *Lactobacillus casei*/*Lactobacillus plantarum* donde se han descritos valores de iTBA en el intervalo de 1.35 mg_{MDA}/Kg_{muestra} a 2.85 mg_{MDA}/Kg_{muestra}. Por el contrario, la formulación que contenía únicamente caramelo registró los valores más altos de iTBA. Con base en estos hallazgos, se desarrolló una tercera formulación, compuesta exclusivamente por flor de lavanda en una concentración más elevada, con el propósito de potenciar el aporte de compuestos fenólicos y evaluar si un aumento significativo en la carga antioxidante de origen floral podría suprimir aún más la formación de productos de oxidación secundaria.

La representación del incremento de los valores de iTBA de las tres formulaciones elaboradas se presenta en la Figura 21. En todos los casos se observa un incremento lineal de los valores de iTBA respecto al tiempo, con la finalidad de corroborar el comportamiento, se compararon los valores de las pendientes de las formulaciones Flor 1 (Fig. 21 b) y Flor 2 (Fig. 21 c) vs. Control (Fig. 21 a).

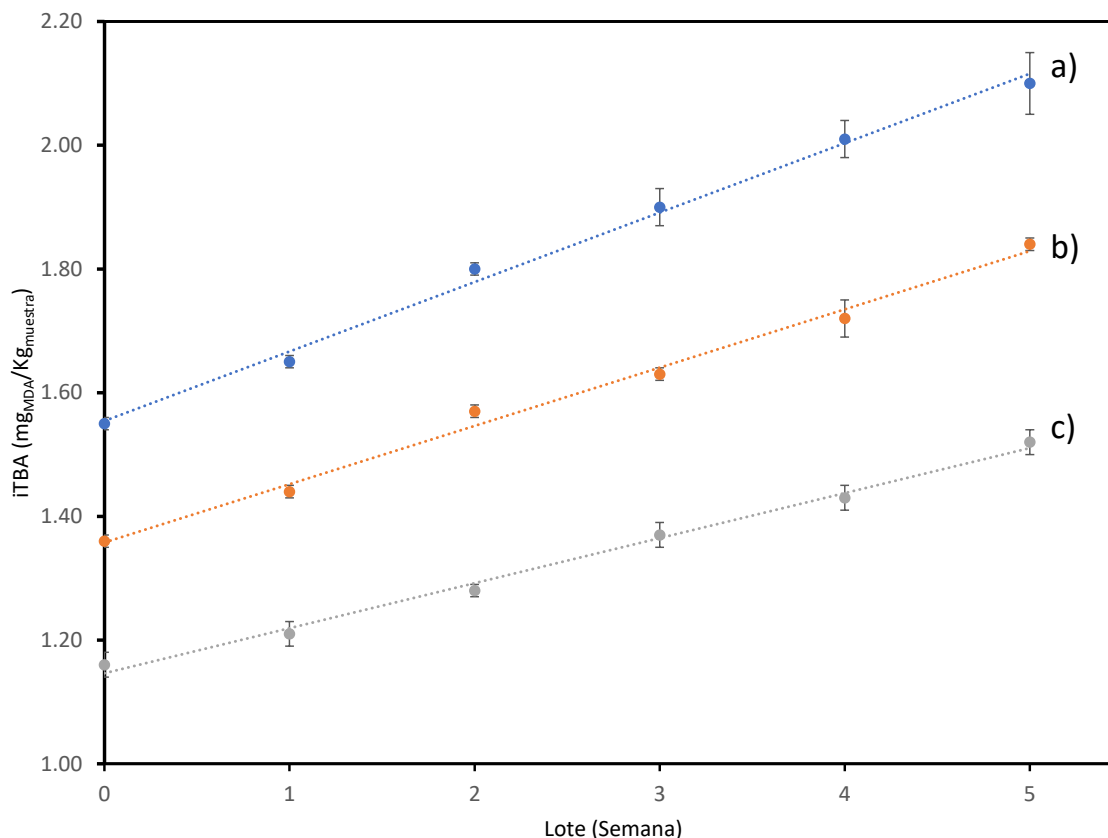


Figura 21. Evolución del índice TBA (iTBA, expresado en mg de MDA por kg de muestra) durante el almacenamiento en refrigeración de helados a base de leche. Donde a) Muestra control, b) Muestra Flor 1, c) Muestra Flor 2

Empleando una prueba de comparación de pendientes (Massart, 1997) y los datos de la Tabla 4 se encontraron diferencias significativas ($t_{\text{exp}} > t_{\text{crit}}$). El valor de la pendiente es menor en la formulación Flor 2, seguida de Flor 1 y por último el Control, lo que se traduce en un doble efecto: de manera inicial el contenido de MDA disminuye por la reacción con los polifenoles de las flores y la degradación es menor debido al efecto antioxidante de los mismos.

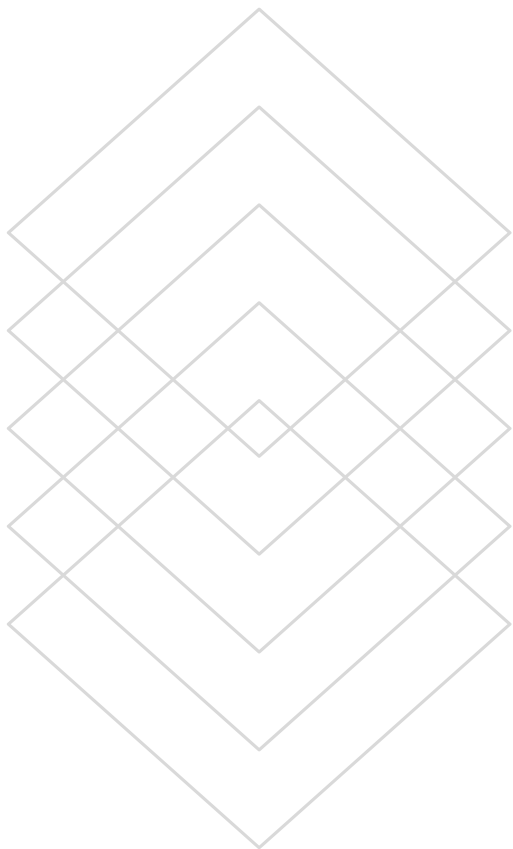
Tabla 5. Comparación de las pendientes de incremento de iTBA (mg MDA/kg muestra) durante el almacenamiento de las distintas formulaciones de helado.

Formulación	Control	Flor 1	Flor 2
Pendiente	0.1123	0.0943	0.0729
Se ²	2.77E-04	2.90E-04	1.48E-04
t_{exp} (vs control)		3.16	8.00

t_{crit} (n=8, $\alpha=0.05$) = 2.31

Aunque la hipótesis inicial proponía que los compuestos bioactivos presentes en las muestras florales inhibirían la formación de productos de oxidación lipídica, los resultados sugieren un mecanismo más complejo. Los resultados obtenidos demuestran que la incorporación de flor de *Lavandula angustifolia* reduce de forma significativa los niveles detectables de MDA y adicionalmente también se ve suprimida parcialmente la oxidación lipídica subyacente. Así, la flor de lavanda ejerce un efecto protector dual: neutraliza productos secundarios y ralentiza el inicio de la oxidación, lo que confirma su eficacia antioxidante, aunque reconoce que las reacciones oxidativas continúan a nivel molecular debido a la complejidad de la matriz del helado a base de leche.

Conclusión



6. Conclusión.

- La técnica de voltamperometría cíclica permitió caracterizar adecuadamente la actividad redox de compuestos fenólicos de referencia y de extractos florales, identificando los potenciales de oxidación como indicadores clave de su capacidad antioxidante.
- La comparación entre los perfiles voltamperométricos y los valores experimentales de FRAP permitió establecer criterios complementarios para la selección de la flor con mayor potencial antioxidante bajo condiciones compatibles con aplicaciones alimentarias.
- Entre las doce especies evaluadas, la flor de *Lavandula angustifolia* presentó un perfil electroquímico favorable y uno de los valores FRAP más elevados, lo que la posicionó como una de las fuentes naturales más efectivas de compuestos antioxidantes.
- En las pruebas realizadas con helado base leche, la incorporación de flor de lavanda demostró eficacia en la reducción de productos de oxidación lipídica, como el malondialdehído (MDA).
- Aunque todas las formulaciones mostraron un aumento gradual de MDA, los niveles fueron significativamente menores en presencia de flor de lavanda, lo que sugiere una acción dual de sus compuestos fenólicos: neutralización de aldehídos reactivos, así como la inhibición de la oxidación lipídica.

Referencias



7. Referencias

- Abdel-Hamid, R., & Newair, E. F. (2011). Electrochemical behavior of antioxidants: I. Mechanistic study on electrochemical oxidation of gallic acid in aqueous solutions at glassy-carbon electrode. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 657(1-2), 107–112.
- AOAC International. (2016). *Official Methods of Analysis* (20th ed.).
- Baessa, M., Rodrigues, M. J., Pereira, C., Santos, T., da Rosa Neng, N., Nogueira, J. M. F., Barreira, L., Varela, J., Ahmed, H., Asif, S., Boukhari, S. A., Kayani, W. K., Ahmad, K. S., Zengin, G., Mollica, A., & Custódio, L. (2019). A comparative study of the in vitro enzyme inhibitory and antioxidant activities of *Butea monosperma* (Lam.) Taub. and *Sesbania grandiflora* (L.) Poiret from Pakistan: New sources of natural products for public health problems. *South African Journal of Botany*, 120, 146–156.
- Benzie, I. F. F., & Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": The FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239(1), 70–76.
- Benzie, I. F. F., & Strain, J. J. (1999). Ferric reducing/antioxidant power assay: Direct measure of total antioxidant activity of biological fluids and modified version for simultaneous measurement of total antioxidant power and ascorbic acid concentration. *Methods in Enzymology*, 299, 15–27.
- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A. G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A. S., & Abert-Vian, M. (2017). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540–560.
- Del Rio, D., Stewart, A. J., & Pellegrini, N. (2005). A review of recent studies on malondialdehyde as toxic molecule and biological marker of oxidative stress. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 15(4), 316–328.
- Englyst, K. N., et al. (2000). Measurement of carbohydrates in foods. *Journal of AOAC International*, 83(3), 687–689.
- Fernández-López, J., Viuda-Martos, M., Sayas-Barberá, E., Navarro-Rodríguez de Vera, C., & Pérez-Álvarez, J. A. (2020). Edible flowers as a health promoter: An evidence-based review. *Trends in Food Science & Technology*, 100, 292–309.
- Firuzi, O., Lacanna, A., Petrucci, R., Marrosu, G., & Saso, L. (2005). Evaluation of the antioxidant activity of flavonoids by 'Ferric Reducing Antioxidant Power' assay and cyclic voltammetry. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, 1721(1-3), 174–184.
- García Martínez, E., Fernández Segovia, I., & Fuentes López, A. (2008). Determinación de polifenoles totales por el método de Folin-Ciocalteu. Universidad Politécnica de València.

- Ghani, M. A., Barril, C., Bedgood Jr, D. R., & Prenzler, P. D. (2017). Measurement of antioxidant activity with the thiobarbituric acid reactive substances assay. *Food Chemistry*, 230, 195–207.
- Ghorbani, S., Shekarforoush, S. S., Niakousari, M., Gheisari, H. R., & Janipour, R. (2023). Formulation and assessing characteristics of probiotic ice cream fortified with free and encapsulated iron. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17, 499–507.
- Gonzalez, D. H., & Paulson, S. E. (2022). Quantification of malondialdehyde in atmospheric aerosols: Application of the thiobarbituric acid method. *Aerosol and Air Quality Research*, 22, 220037.
- González-Barrio, R., Periago, M. J., Luna-Recio, C., Garcia-Alonso, F. J., & Navarro-González, I. (2018). Chemical composition of the edible flowers, pansy (*Viola wittrockiana*) and snapdragon (*Antirrhinum majus*) as new sources of bioactive compounds. *Food Chemistry*, 252, 373–380.
- International Journal of Electrochemical Science. (2016). Electrochemical properties of chlorogenic acids and determination of their content in coffee using differential pulse voltammetry. *International Journal of Electrochemical Science*, 11, 2871–2886.
- Ji, X., Banks, C. E., Silvester, D. S., Wain, A. J., & Compton, R. G. (2007). Electrode kinetic studies of the hydroquinone–benzoquinone system and the reaction between hydroquinone and ammonia in propylene carbonate: Application to the indirect electroanalytical sensing of ammonia. *The Journal of Physical Chemistry C*, 111(4), 1496–1504.
- Kandyli, P. (2022). Phytochemicals and antioxidant properties of edible flowers. *Applied Sciences*, 12(19), 9937.
- Khoo, H. E., Azlan, A., Tang, S. T., & Lim, S. M. (2017). Anthocyanidins and anthocyanins: Colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits. *Food & Nutrition Research*, 61(1), 1361779.
- Lara-Cortés, E., Osorio-Díaz, P., Jiménez-Aparicio, A., & Bautista-Baños, S. (2013). Contenido nutricional, propiedades funcionales y conservación de flores comestibles: Revisión. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 63(3), 197–208.
- Massart, D. L. (Ed.). (1997). *Handbook of chemometrics and qualimetrics: Part A (Vol. 20A)*. Elsevier Science. p 208.
- Mohamadi, M., Mostafavi, A., & Torkzadeh Mahani, M. (2015). Voltammetric determination of rosmarinic acid on chitosan/carbon nanotube composite modified carbon paste electrode covered with DNA. *Journal of The Electrochemical Society*, 162(12), B344–B349.
- Mulík, S., & Ozuna, C. (2020). Mexican edible flowers: Cultural background, traditional culinary uses, and potential health benefits. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 21, 100235.

- N.D. Patil, A., Bains, K., Sridhar, K., et al. (2024). Recent advances in the analytical methods for quantitative determination of antioxidants in food matrices. *Food Chemistry*.
- Oliveira-Brett, A. M., Piedade, J. A. P., Silva, L. A., & Abrantes, L. M. (2002). Electrochemistry of caffeic acid aqueous solutions with pH 2.0 to 8.5. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 13(3), 332–338.
- Pastor, F. T., Šegan, D. M., Gorjanović, S. Ž., Kalušević, A. M., & Sužnjević, D. Ž. (2020). Development of voltammetric methods for antioxidant activity determination based on Fe(III) reduction. *Microchemical Journal*, 155, 104721.
- Pires, E. de O., Jr., Di Gioia, F., Rouphael, Y., Ferreira, I. C. F. R., Caleja, C., Barros, L., & Petropoulos, S. A. (2021). The compositional aspects of edible flowers as an emerging horticultural product. *Molecules*, 26(22), 6940.
- Prior, R. L., Wu, X., & Schaich, K. (2005). Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(10), 4290–4302.
- Rodriguez-Amaya, D. B. (2016). Natural food pigments and colorants. *Current Opinion in Food Science*, 7, 20–26.
- Rodríguez, M. J., Ramos, M., Jiménez, A., & Fernández-Bolaños, J. (2021). Edible flowers as sources of bioactive compounds: Characterization and application in frozen dairy desserts. *Food Chemistry*, 343, 128414.
- Rodrigues, M. J., Gangadhar, K. N., Vizzotto, M., Petropoulos, S. A., Pereira, C., & Barros, L. (2017). Nutritional and chemical characterization of edible petals and corresponding infusions: Valorization as new food ingredients. *Food Chemistry*, 220, 337–343.
- Sagdic, O., Ozturk, I., Yilmaz, M. T., & Yetim, H. (2014). Effect of grape pomace extracts obtained from different grape varieties on the quality of cooked pork sausages. *LWT - Food Science and Technology*, 59(2), 794–799.
- Shahidi, F., & Ambigaipalan, P. (2015). Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects—A review. *Journal of Functional Foods*, 18, 820–897.
- Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144–158.
- Skeva, E., & Girousi, S. (2012). A study of the antioxidative behavior of phenolic acids, in aqueous herb extracts, using a dsDNA biosensor. *Central European Journal of Chemistry*, 10(4), 1280–1289.
- Turcanu, A., & Bechtold, T. (2011). pH dependent redox behaviour of Alizarin Red S (1,2-dihydroxy-9,10-anthraquinone-3-sulfonate) – Cyclic voltammetry in presence of dispersed vat dye. *Dyes and Pigments*, 91(3), 324–331.

- Tungmunthum, D., Thongboonyou, A., Pholboon, A., & Yangsabai, A. (2018). Flavonoids and other phenolic compounds from medicinal plants for pharmaceutical and medical aspects: An overview. *Medicines*, 5(3), 93.
- Vincke, R. (1975). Méthode de détermination des substances réagissant au TBA. *Revue Française des Corps Gras*, 22(4), 217–223.
- Zagoraios, D., Ioakeimidis, C., Kyriakou, G., & Katsaounis, A. (2021). Glassy Carbon Electrochemical Sensor for Gallic and Vanillic Acid Detection in Aqueous Solutions. *Applied Sciences*, 11(17), 8045.
- Zamora, R., Alcon, E., & Hidalgo, F. J. (2023). Malondialdehyde trapping by food phenolics. *Food Chemistry*, 417, 135915.
- Zhang, L., & Dong, S. (2004). The electrocatalytic oxidation of ascorbic acid on polyaniline film synthesized in the presence of camphorsulfonic acid. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 568, 189–194.
- Zheng, W., & Wang, S. Y. (2001). Antioxidant activity and phenolic compounds in selected herbs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(11), 5165–5170.
- Zielińska, D., & Turemko, M. (2020). Electroactive phenolic contributors and antioxidant capacity of flesh and peel of 11 apple cultivars measured by cyclic voltammetry and HPLC-DAD-MS/MS. *Antioxidants*, 9(11), 1054.